

基于岭回归的低压配电系统接线错误漏电用户识别方法

周义博¹, 李泽贤¹, 杨正权¹, 张乔¹, 李秋实¹, 薛振业¹, 苏盛²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 530221; 2. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 长沙 410014)

摘要: 低压配电系统用户侧零线、地线接线错误是工程实际中常见的漏电故障, 隐蔽性高而定位排查困难, 是低压配电系统运维检修中的难题。当前漏电故障用户定位方法难以克服样本量不足及用户间电流多重共线性问题, 在用户规模较大的低压供电台区难以快速准确定位漏电故障用户。首先结合目前低压配电系统分级漏保及接地系统防护配置, 分析用户侧接线错误漏电故障的影响及危害; 进一步研究单个用户及多用户零线、地线接线错误时负荷电流对台区剩余电流的影响差异; 考虑台区量测能力限制导致的样本量不足及用户负荷电流曲线之间存在的多重共线性问题, 提出基于岭回归的低压配电系统接线错误漏电用户识别方法, 可在小样本情况下准确识别漏电故障用户。进一步考虑故障数量及所处相别差异开展不同接线错误漏电故障场景的仿真实验验证了所提方法有效性, 并与多元线性回归方法开展对比实验验证了所提方法的优越性。

关键词: 低压配电系统; 零线、地线接线错误; 漏电故障用户定位; 岭回归

Location Method of Leakage User Caused by Wiring Fault in Low-Voltage Distribution Systems Based on Ridge Regression

ZHOU Yibo¹, LI Zexian¹, YANG Zhengquan¹, ZHANG Qiao¹, LI Qiushi¹, XUE Zhenye¹, SU Sheng²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 530221, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction for Power Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: Neutral and ground lines wiring faults on the user side of low-voltage distribution systems (LVDS) lead to common yet highly concealed leakage current faults in practical engineering, posing significant challenges for operation and maintenance in LVDS. Existing methods for locating leakage faults struggle to address insufficient sample sizes and multicollinearity problems among users currents, making it difficult to rapidly and accurately identify leakage fault users in large-scale low-voltage power substation area. Firstly, the impacts and hazards of user-side wiring faults and leakage faults in the context of current graded residual current protection (RCD) and grounding system protection configurations in LVDS are analyzed. Further, the differences in the impact of load current on residual current in the substation area when there are faults in the neutral and ground wire connections for individual and multiple users are investigated. To address the limitations of insufficient samples due to restricted measurement capabilities in substation area and the multicollinearity among user load current curves, a ridge regression-based method is proposed for identifying leakage user caused by wiring fault in LVDS. This method can accurately identify leakage fault user in small sample sizes. Further considering the number of faults and the differences in their phases, simulation experiments of different wiring fault leakage scenarios are carried out to verify the effectiveness of the proposed method, and comparative tests against multiple linear regression method demonstrate its superiority.

Key words: low-voltage distribution systems; neutral and ground lines wiring fault; leakage fault user location; ridge regression

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1966207); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20230433(031900KC23040019))。

Foundation item: Supported by the Joint Fund Program of National Natural Science Foundation of China (U1966207); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20230433 (031900KC23040019)).

0 引言

低压配电系统线路及设备众多、环境复杂,漏电故障普遍存在于供电线路及居民用户的生活场景中,是人身触电及电气火灾事件多发的重要原因^[1-2]。其中用户侧零线、地线接线错误时本应从零线回流的负荷电流会从接地保护线流出,并在台区配变低压出线侧转化为漏电保护装置(residual current protection, RCD)主回路的电流矢量和的有效值,即剩余电流。此类漏电故障普遍存在,且隐蔽性较强、排查困难。

文献[3]首先提出了户内零线、地线接线错误的异常现象,分析其危害并指出此漏电故障将导致低压台区一级、二级剩余电流保护频繁跳闸,影响供电可靠性。但由于目前低压台区可用信息不足,漏电故障定位困难,相当数量的台区为保障供电可靠性,其RCD常处于未投运状态,这也对用电安全构成了严重威胁^[4-7]。如何快速准确定位排查漏电故障,提高台区剩余电流保护投运率,是保障低压用电安全的关键问题。

近年来物联网、大数据等技术的发展有效推动低压台区透明化建设,以高速电力线载波(high power line carrier, HPLC)智能电表、融合终端为代表的新型低压智能终端已在台区得到大量应用^[8],为台区状态感知和漏电故障排查提供了关键的数据支撑^[9-12]。文献[13]基于当前台区用户的电气量计量数据,结合台区配电低压侧剩余电流量测数据进行耦合关联特性分析,提出接线错误漏电故障时用户负荷电流与台区剩余电流之间的关联特性并建立剩余电流关于各用户负荷电流的线性关系模型,从而区分异常用户。文献[14]在此基础上引入正则化,提升异常用户识别准确度。但当前台区用户电气量计量数据采集能力有限,短时间内难以获取大量电气量样本,同时台区规模较大,用户数量往往较多,在样本量不足的情况下模型拟合能力较差,求解结果并不可靠。且同一台区用户性质相似,用电行为模式接近,其电气量时序变化数据存在严重的多重共线性问题,现有研究方法难以克服上述问题,难以在复杂场景下快速可靠识别异常用户。

针对接线错误漏电故障用户定位困难的问题,本文采用岭回归求解方法消除用户负荷曲线相近所导致的多重共线性问题,在样本量较少的情况下获

得可靠的模型求解结果。首先结合低压配电系统中主要的接地形式及剩余电流保护配置初步介绍接线错误漏电故障场景特性,分析不同接地系统中用户零线、地线接线错误的剩余电流表征差异,进一步研究基于岭回归的接线错误漏电用户识别方法。在不同接线错误漏电故障场景下开展仿真实验,考虑台区用户数量影响与多元线性回归方法进行对比实验,验证了所提方法的有效性及其优越性。

1 低压配电接地形式

根据GB14050—2008《系统接地型式及安全技术要求》^[15],低压配电系统接地型式可分为TT、TN、IT系统3种,其中TN、TT系统为台区常用系统,TN系统具体又可细分为TN-C、TN-C-S和TN-S接地形式,并与三级剩余电流保护装置配合实现漏电故障防护。如图1所示,黄、绿、红色分别标识A、B、C三相火线,蓝色为中性线(N线),黄绿间隔为接地保护线(protective earth, PE线)。

图1(a)中TN-C接地系统采用三相四线制供电,将PE和N线合并。为避免断线,系统中性线要多点重复接地,以便将线路各处都钳位在零电位上。否则若发生中性线断线故障,因为失去接地将导致中性线电位升高,容易烧毁电器,亦可能导致用户电器外壳将带上危险的电压。但由于其PE线和N线是一条线,IEC 60364-4-41^[16]及中国的《低压配电设计规范》^[17]都有规定:TN-C系统不能使用RCD,因此目前该类接地方式在低压台区中已很少应用,并不存在接线错误故障。

图1(b)中TN-C-S接地系统在变压器中性点直接接地,在供电线路部分采用三相四线制,在用电负荷附近将N线分开形成单独的N线和PE线。因为电源首端至用户负荷之间的供电线路采用PEN线,TN-C-S接地系统无法装设一级剩余电流保护,在三相不平衡系统中若不平衡电流较大,线路供电的保护接零设备外壳可能带有危险电压。目前TN-C-S系统主要应用于老旧住房,二、三级RCD投运率较低,接线错误漏电故障情况并不少见。

图1(c)中TN-S接地系统中的N线和PE线严格分开。配电变压器中性点直接接地,并从接地点引出N线和PE线至用电设备处,可配置三级RCD防护,用电设备的外壳与PE线相接。目前已广泛应用于城区的新建小区,亦存在普遍的接线错误漏电

故障情况。

图 1(d) 中 TT 接地系统的电源中性点直接接地, 用电设备外露可导电部分直接接地。同一建筑内多个用户用电设备可共用同一保护接地。TT 接地系统在居民分散居住的农村以及早期的城镇住宅楼宇应用较为普遍, 多采用台区、分支线和末端用户分级剩余电流保护选择性感知隔离漏电故障, 系统中用电设备保护接地可有效降低接触电压, 减小触电风险。然而 TT 系统中发生接线错误漏电故障将在用户侧接地极上产生大电压, 与之相连的所有相邻用户的设备外壳均将带有危险电压, 故障影响具有传导性。

综上所述, 在 TN-C-S、TN-S 系统和 TT 系统中, 由于低压电气工作人员主观意识疏忽、技术水平不足, 用户本身又无足够的质量评估能力, 表箱处零线、地线接线错误是普遍存在的工作失误。异常用户的负荷电流将从 PE 线返回变压器中性点, 导致该用户末级剩余电流保护动作。如用户未配置末级剩余电流保护或未级剩余电流保护未正常动作, 将导致上级剩余电流越级跳闸, 扩大停电范围。此类故障位置隐蔽, 往往发生在用户表后, 并不表现为绝缘性破坏的特征, 常规故障排查手段如线路对地绝缘法难以生效, 排查困难。用户为保障用电常常擅自退出用户保护, 显著增大用电安全风险。

如何感知辨识接线错误漏电故障, 精准定位接线错误漏电用户, 是当前提高 RCD 投运率、保障用电安全亟待解决的瓶颈问题。有必要针对此类故障进行机理分析及特征总结, 为故障排查提供经验指导。

2 接线错误漏电故障电流特征分析

用户零线、地线接线错误的故障位置隐蔽在用户户内, 配电运维人员不便入户排查, 加之接线错误是台区内常见的异常故障, 长期存在导致低压台区 RCD 投运率低下。传统上, 由于低压台区缺乏剩余电流数据记录, 正常及故障场景下剩余电流波动特性的相关研究较少, 且目前漏电保护仅能选择性速动隔离故障而不提供故障本身的相关信息, 快速定位和排查漏电故障始终无从下手。

2.1 台区剩余电流监测

基于物联网技术, 低压台区多数低压电表已升级支持宽带载波通信^[18-20], 使得报送计量数据的采集频度可提升到 15 min 间隔, 台区内部报送数据的频度还可升级到分钟级, 能为数据挖掘分析和应用提供必要的基础数据。IR46 国际计量标准^[21]要求电表计量功能与拓展业务功能相互独立, 可根据业务需要选配不同功能模块^[22]。台区智能终端和分支线监测终端可选配剩余电流监测模块, 从根本上弥

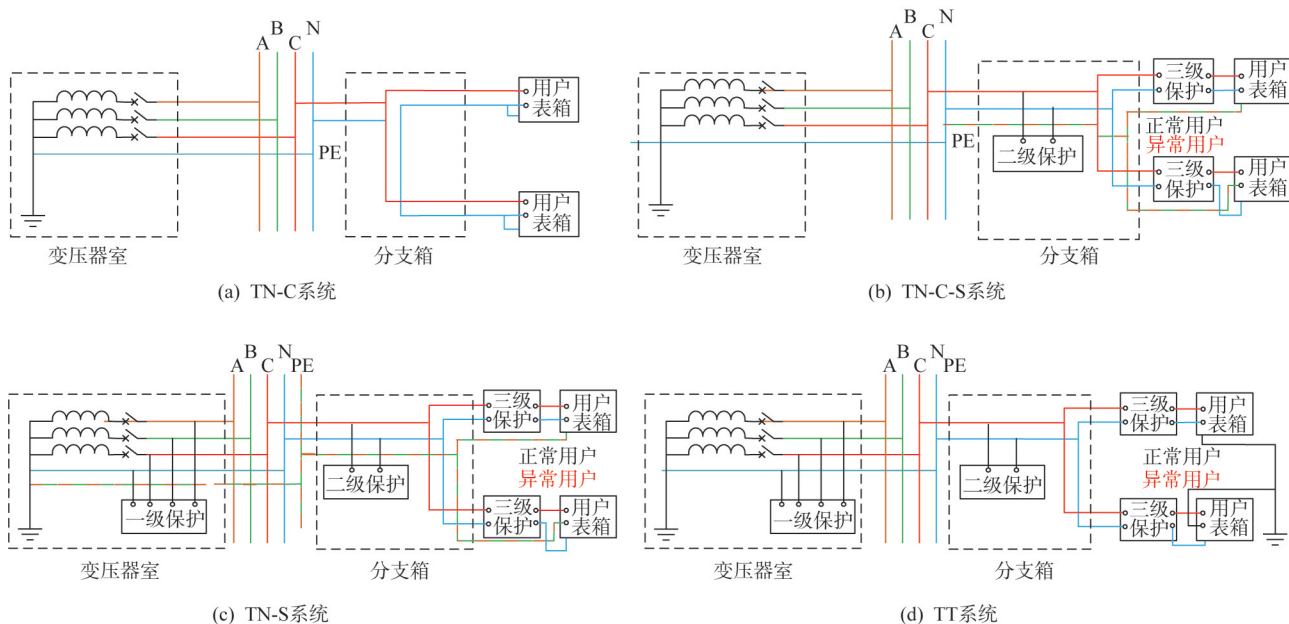


图 1 低压配电系统接线图

Fig. 1 Wiring diagram of LVDS

补漏电保护不能提供剩余电流监测数据的不足,实现台区剩余电流的持续在线监测。基于台区高密度多元电气量数据,利用零线、地线接线错误用户的负荷电流转化为台区剩余电流的特点,可进一步通过数据分析量化评估台区剩余电流与用户电流之间的关联程度来甄别定位接线错误用户,加速漏电故障排查和恢复剩余电流保护正常投运,保障用电安全。

由于用户接线错误时,对应的分支线和台区剩余电流会同步异动,采用分支线或台区剩余电流监测终端记录的剩余电流数据识别接线错误用户在技术上没有差异,后文统一按照台区剩余电流与用户负荷电流之间的因果关系来分析和阐述识别接线错误用户的方法。以下结合真型配电网模拟实验室的接线错误漏电故障实验数据,分析正常条件下和不同类型零线、地线接线错误时台区剩余电流的变化规律。

2.2 台区剩余电流分析

2.2.1 漏电故障真型配电台区设计

模拟供电 80 户低压用户的 TT 接地系统配电台区中发生接线错误漏电故障场景,并监测记录台区配变侧总剩余电流及各供带用户负荷电流数据。台区拓扑结构如图 2 所示。

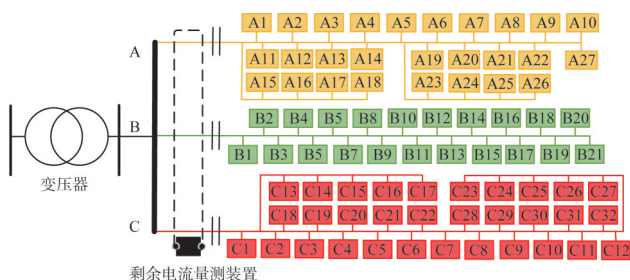


图2 TT接地真型低压配电系统拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of the TT grounded true type LVDS

其中,台区电压等级为 380 V,变压器容量为 200 kVA,以可调负载模拟用户用电,A相供电 27 户,B相供电 21 户,C相供电 32 户。

2.2.2 单用户接线错误的台区剩余电流分析

图 3 为模拟台区在有、无接线错误用户前后两天按 15 min 间隔采集剩余电流曲线,竖直虚线左边为台区正常时的剩余电流,其中小框子图为放大后的台区剩余电流,右边为有接线错误用户接入时的台区剩余电流。

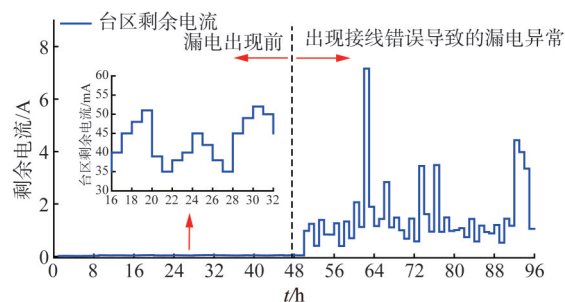


图3 有无接线错误用户时的台区剩余电流

Fig. 3 Residual currents of substation area with and without wiring fault

图 3 左侧表示台区正常运行时台区剩余电流在 50 mA 上下波动,对应为正常的自然泄漏电流,自然泄漏电流是无绝缘故障时从设备的带电部件流入地的电流,可认为在该时段无明显漏电异常。

图 3 右侧表示 t 时刻台区接入零线、地线接线错误用户时,由于用户负荷电流幅值明显大于正常线路剩余电流,接线错误异常用户的负荷电流会成为台区剩余电流的主导部分,使得剩余电流大幅波动、超过保护整定值造成频繁跳闸,影响供电可靠性。

台区剩余电流为三相剩余电流的矢量和。因一级剩余电流保护一般整定为 300 mA,无漏电故障时台区剩余电流为线路剩余电流的矢量和,数值在 300 mA 以下。在线路剩余电流无明显变化前提下,单个用户零线、火线接线错误时台区剩余电流为叠加该用户负荷电流(I_{load})的矢量和,数值上介于 $I_{load} + 300$ mA 到 $I_{load} - 300$ mA 区间内。

工程实践中发生漏电故障时剩余电流保护装置并不立刻跳闸、而是随机延后一段时间再跳闸,这是比较常见的棘手问题。若是发生接线错误漏电故障,台区剩余电流随接线错误用户负荷电流起伏,若接线错误异常用户处于不用电或少量用电时段,亦无法触发 RCD 跳闸,这亦可能是现场常见的 RCD 重合闸后不立即跳闸、而是延后随机时间后跳闸这一现象的主要原因。

2.2.3 两用户接线错误的台区剩余电流分析

台区中也可能同时有两个用户存在零线、地线接反错误,此时台区剩余电流需按两用户同相或异相分开讨论。

1) 当接线错误两用户同相时台区剩余电流为该两用户负荷电流和自然剩余电流的矢量和,由于同

相两用户负荷电流相位相近,合成电流幅值将显著高于其中任一用户。

2)当不同相的两个用户接线错误时,由于两个用户电压间始终存在 120° 的相位差,其负荷电流相位相差较大,合成电流将小于二者之间的较大值。

为直观呈现两用户接线错误时电流合成结果及对于台区剩余电流的影响,以下分别针对同相两用户接线错误和异相两用户接线异常场景的台区电流时序数据进行分析,结果如图4所示。

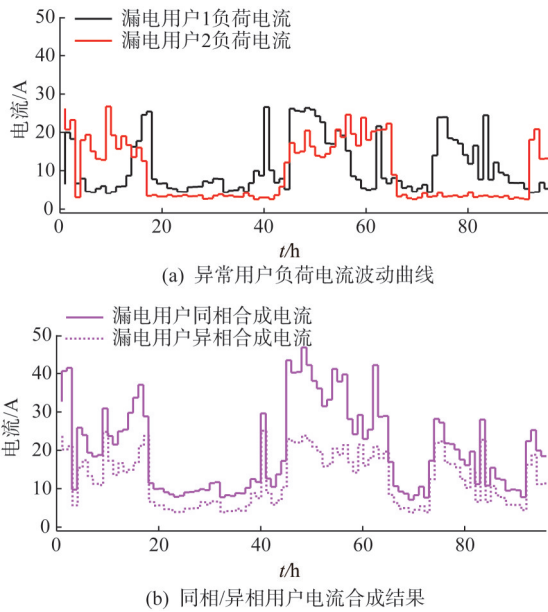


图4 同相/异相用户负荷电流合成结果

Fig. 4 Synthesis results of in-phase/diff-phase user load currents

由图4(b)可知,同相用户接线错误时,电流矢量和近似为两者算术和,合成剩余电流明显大于任一用户负荷电流;异相用户接线错误时,合成剩余电流数值上与两用户电流相对数值有关,在一个用户负荷电流为0或两个用户负荷电流相等时,合成的剩余电流达到最大值,等于最大负荷用户的电流;其他情况下均小于两用户中较大负荷用户的电流。因为台区正常条件下线路剩余电流有限(小于300 mA),剩余电流保护动作时的异常剩余电流主要源于接线错误用户负荷电流。

3 基于岭回归的接线错误漏电用户感知定位方法

工程实际中,低压用户零线、地线接反是高发

故障。台区中各用户均存在接线错误的可能,从而造成剩余电流超标、引起保护跳闸。对台区剩余电流进行归因分析,根据各用户对台区剩余电流的影响来识别接线错误的异常用户,可以及时排除漏电故障、恢复一级和二级剩余电流保护正常运行,保障用电安全。

多元线性回归分析是一种常用的、可判断变量之间因果关系的模型^[23]。利用台区各用户负荷电流和台区剩余电流时间序列可构建多元线性回归模型,识别造成台区剩余电流波动的接线错误用户。低压台区多为居民用户,部分用户生活起居和用电行为习惯大致相似,在用电曲线上会有相同变化趋势,其负荷时间序列间可能存在多重共线性。采用多元线性回归模型要求变量间不存在相关性,用户用电时间序列的相关性违背了解释变量间不存在相关性的古典假定,必须进行多重共线性检验^[24-25]。

3.1 多重共线性分析

具有相近用电行为习惯居民用户可能出现图5所示两个或多个用户用电负荷曲线高度相似的情况,这种多个时间序列相关性即为多重共线性。

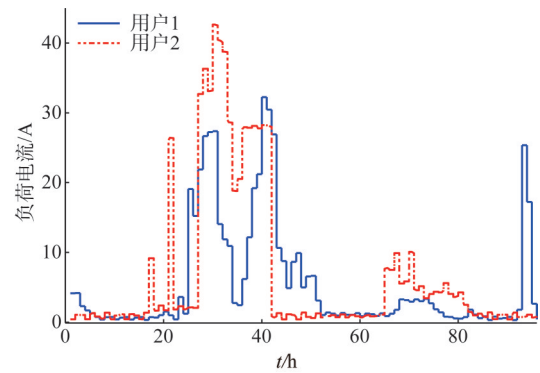


图5 两用户的多重共线性

Fig. 5 Multicollinearity of two users

对多用户数据进行回归模型分析时,用户间的相关性可能增大回归系数的方差,影响回归系数的稳定性,导致系数无法可靠地进行解释,进而导致误判或漏判。因此,首先需要针对多重共线性进行检验。假设有线性回归模型为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

式中: X_i 为用户 i 的负荷电流, 向量长度为 m ; Y 为台区剩余电流, 向量长度为 m ; β_i 为 X_i 关于 Y 的相关系数大小; ε 为低压线路泄漏电流, 服从多元正态分布 $N(0, \sigma^2)$; n 为台区用户数量。假设是自变

量 X_i 间不存在严格线性关系, 将此线性回归模型写为:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

式中: X 为 X_i 组成的为 $m \times n$ 矩阵; β 为 β_i 组成的向量。

参数 β_0 的最小二乘 (least square, LS) 估计值为:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} = \sum_{i=1}^m y_i / m \quad (3)$$

式中: $\hat{\beta}_0$ 、 $\bar{Y}$ 、 y_i 分别为截距项参数 β_0 的最小二乘估计值、因变量 Y 的样本均值和 Y 的第 i 个观测值。

回归系数的 LS 估计值为:

$$\hat{\beta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_n)^T = (X^T Y)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

式中: $\hat{\beta}$ 为回归系数向量 β 的最小二乘估计量; $\hat{\beta}_i$ 为 β 中第 i 个分量的最小二乘估计量。

此时获得的 LS 估计值是无偏的, 估计值的均方误差为:

$$E_{MSE}(\hat{\beta}) = E(\hat{\beta} - \beta)^T (\hat{\beta} - \beta) = \sigma^2 \sum_{i=1}^n 1/\lambda_i \quad (5)$$

式中: $E_{MSE}(\hat{\beta})$ 为估计量 $\hat{\beta}$ 的均方误差; $E(\cdot)$ 为数学期望; λ_i 为 $(X^T X)$ 的特征根, $\lambda_i \geq 0$ 。若 $(X^T X)$ 有至少一个特征根接近 0, 则 $E_{MSE}(\hat{\beta})$ 的值将非常大, $\hat{\beta}$ 不能成为 β 较好估计值, 也代表着矩阵 X 的列向量间有近似的线性关系; σ 为线性回归模型中随机误差项的标准差。

如果存在不全为 0 的数 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, 使得:

$$\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_n X_n = 0 \quad (6)$$

则此线性回归模型存在完全共线性。如果存在随机误差 v 使得:

$$\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_n X_n + v = 0 \quad (7)$$

则此线性回归模型存在非完全共线性。若线性回归模型存在完全共线性, 则回归系数的 LS 估计就不存在, 因此需要讨论的回归模型为非完全共线性, 也称复共线性。

方差膨胀系数 (variance inflation factor, VIF) 是用来表征多重共线性的值, F_{VIF} 计算表达式为:

$$F_{VIF} = (1 - R_n^2)^{-1} \quad (8)$$

式中: R_n^2 为第 n 个自变量 X_n 与其余自变量之间的判定系数, 该自变量与其余自变量间相关程度越高, R_n^2 就会越接近 1, 对应 F_{VIF} 也会越大; 同理该自变量与其余自变量间的相关程度越低, R_n^2 就会越接近 0, 对应 F_{VIF} 就会接近 1。一般来说, F_{VIF} 超过 10 即

可说明回归模型存在严重的多重共线性。

3.2 岭回归分析

数据的多重共线性问题一般可用增加数据量、剔除干扰自变量以及岭回归分析等方法解决。增加数据量需要等待更长的数据采集时间, 不利于快速定位故障点以恢复一级、二级剩余电流保护投运、保障用电安全。剔除干扰自变量可在已有数据量的条件下降低回归模型共线性, 但选择需剔除自变量的难度较大, 难以工程推广应用。本文选取岭回归方法展开分析。

岭回归又称脊回归、吉洪诺夫正则化, 是一种改良的最小二乘估计方法, 通过放弃最小二乘法的无偏性以损失部分信息、降低精度为代价获得回归系数更为符合实际、更可靠的回归方法, 对病态数据的拟合要强于最小二乘法^[26]。对于数据分析问题为:

$$X\theta = y \quad (9)$$

式中 θ 和 y 分别为待求的回归系数向量和响应变量向量。

采用最小二乘法时定义损失函数为 $\|X\theta - y\|^2$, 上问题的解为:

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (10)$$

当数据矩阵 X 不是列满秩或某些列的相关性较强时, 将成为不适定问题, 此时计算 $(X^T X)^{-1}$ 误差会很大, 使得传统最小二乘法失去稳定性。为解决以上问题, 在损失函数上加上正则化项, 即 $\|X\theta - y\|^2 + \|\Gamma\theta\|^2$, 其中有 $\Gamma = \alpha I$, I 为单位矩阵。于是原解变为:

$$\theta(\alpha) = (X^T X + \alpha I)^{-1} X^T y \quad (11)$$

式中: $\theta(\alpha)$ 为岭回归估计量; α 为惩罚系数。

由式(11)可知, α 增大时, $\theta(\alpha)$ 中的各元素的绝对值将随之减小, 相对于正确值的偏差也随之增大。 $\theta(\alpha)$ 随着 α 的变化而变化的轨迹被称为岭迹, 本文采用标准化系数和作为参数指标衡量不同惩罚系数大小的影响, 此参数在不同惩罚系数下的结果, 可描述岭回归模型的岭迹变化, 并筛选出最优岭回归模型。绘制标准化系数和变化曲线, 标准化系数和计算公式为:

$$\theta(\alpha)_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N \theta(\alpha)_i \quad (12)$$

式中: $\theta(\alpha)_{\text{sum}}$ 为惩罚系数 α 的标准化系数; $\theta(\alpha)_i$ 为 $\theta(\alpha)$ 的第 i 个分量的绝对值; N 为回归系数的数量。

岭回归增加L1正则化有压缩权重系数的效果,因此惩罚系数越大,相应系数压缩程度越重,标准化系数越小,而标准化系数和也逐渐减小并趋于平缓。根据标准化系数和变化曲线最早趋于稳定时选取对应的最小的 α 值,根据该值确定最终的回归模型。

综上所述,接线错误漏电用户岭回归分析定位方法其步骤总结如下。

步骤1:采集15 min级台区剩余电流时序数据及各用户负荷电流时序数据;

步骤2:计算各用户的方差膨胀因子,评估用户之间多重共线性;

步骤3:基于剩余电流时序数据和用户负荷电流时序数据构建岭回归模型;

步骤4:根据标准化系数和的变化选择最佳惩罚系数 α ,确定最终回归模型;

步骤5:根据最终回归模型回归结果中各用户岭系数值筛选异常用户。

其过程如图6所示。

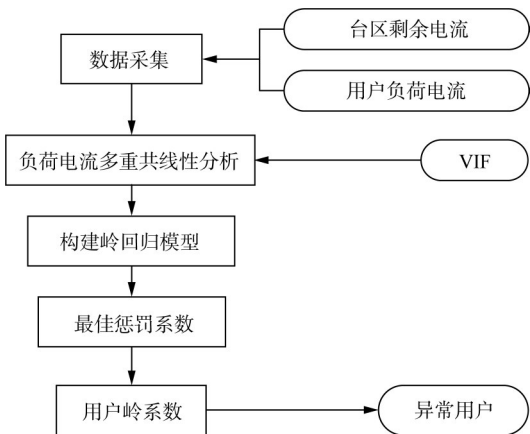


图6 接线错误用户岭回归分析流程图

Fig. 6 Flow chart of ridge regression analysis of wiring fault user

4 仿真算例

为验证方法有效性,在供电80个用户的真型配电仿真实验平台进行零线、地线接线错误漏电用户的定位仿真。以15 min间隔采集台区用户负荷电流数据及台区剩余电流数据。为提高岭回归模型的稳定性与预测精度,需对原始数据进行系统性的预处理。首先,对原始数据进行清洗,包括缺失值填补与异常值剔除。针对缺失数据,采用线性插值、前向或后向填充等方法进行补全;对于异常值则进

行识别并剔除短时突变数据;其次,确保所有用户数据与台区剩余电流数据在时间维度上对齐与同步,若存在时间戳偏移问题,可通过时间对齐算法加以校正。此外,为消除变量量纲对回归系数的影响,对所有输入变量进行归一化或标准化处理。

4.1 单用户接线错误的检测

首先将用户A15的保护接地线和零线反接,记录在此条件下持续2 d的30 min时间间隔计量数据进行分析。对台区居民用电数据进行多重共线性检验,检验结果如表1所示。表1中VIF值大于10的用户采用字体加粗标识。由表1可知,台区居民中VIF值大于10的用户较多,数据存在明显的多重共线性。对上述数据进行岭回归分析,绘制的标准化系数和变化曲线如图7所示。

表1 多重共线性检验结果

Tab. 1 Test results of multicollinearity

用户序号	VIF值	用户序号	VIF值	用户序号	VIF值	用户序号	VIF值
A1	10.46	A21	8.30	B14	6.66	C13	13.86
A2	5.96	A22	7.48	B15	12.38	C14	10.72
A3	7.82	A23	43.31	B16	10.12	C15	7.16
A4	7.08	A24	12.10	B17	35.90	C16	15.37
A5	21.00	A25	15.12	B18	13.86	C17	14.91
A6	14.29	A26	11.05	B19	5.41	C18	21.64
A7	29.45	A27	23.21	B20	11.77	C19	6.79
A8	5.13	B1	13.66	B21	8.26	C20	3.34
A9	6.32	B2	8.19	C1	7.71	C21	9.34
A10	16.47	B3	7.69	C2	5.19	C22	5.26
A11	19.17	B4	17.63	C3	6.22	C23	23.89
A12	6.25	B5	17.90	C4	9.50	C24	8.66
A13	9.021	B6	9.17	C5	24.03	C25	28.53
A14	15.95	B7	11.41	C6	6.44	C26	13.72
A15	43.18	B8	6.35	C7	13.66	C27	6.18
A16	15.09	B9	6.92	C8	3.98	C28	9.63
A17	6.69	B10	8.24	C9	10.38	C29	10.50
A18	8.91	B11	16.29	C10	13.08	C30	8.00
A19	20.36	B12	8.87	C11	9.34	C31	6.36
A20	21.66	B13	12.08	C12	10.72	C32	8.22

岭模型标识了岭回归的岭迹情况,其中标准化系数描述岭迹变化趋势。图7中,将岭迹变化第一次趋于平缓的位置标识为红色方块,所对应的惩罚值为0.22,对应岭系数结果列如表2所示。由2表可知,用户A15的岭系数明显大于其余所有用户,

其负荷电流对台区剩余电流影响最大, 可判定为接线错误的疑似用户, 与设定结果相符。

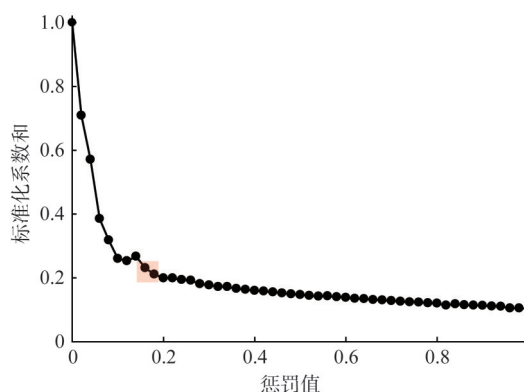


图 7 标准化系数和变化曲线

Fig. 7 Variation curves of normalized coefficient sum

表 2 单用户岭系数

Tab. 2 Ridge coefficients of single wiring fault user

用户序号	岭系数	用户序号	岭系数	用户序号	岭系数	用户序号	岭系数
A1	-0.046	A21	0.013	B14	0.060	C13	0.007
A2	0.008	A22	0.004	B15	-0.054	C14	0.021
A3	-0.024	A23	0.033	B16	0.012	C15	0.044
A4	0.045	A24	0.044	B17	0.024	C16	0.070
A5	-0.014	A25	0.017	B18	-0.015	C17	0.055
A6	0.088	A26	-0.037	B19	0.018	C18	0.020
A7	0.084	A27	-0.052	B20	0.014	C19	0.026
A8	0.026	B1	0.038	B21	-0.023	C20	0.071
A9	0.056	B2	0.032	C1	-0.065	C21	0.041
A10	0.026	B3	0.007	C2	-0.026	C22	0.068
A11	-0.035	B4	0.031	C3	-0.071	C23	0.014
A12	-0.060	B5	-0.024	C4	-0.039	C24	0.014
A13	0.022	B6	0.039	C5	-0.014	C25	0.011
A14	0.040	B7	-0.008	C6	-0.048	C26	0.060
A15	0.321	B8	0.069	C7	-0.047	C27	0.042
A16	-0.040	B9	-0.019	C8	0.031	C28	0.062
A17	-0.032	B10	0.056	C9	0.075	C29	0.013
A18	0.020	B11	0.051	C10	0.035	C30	0.054
A19	0.087	B12	-0.054	C11	0.023	C31	0.049
A20	-0.018	B13	0.065	C12	0.010	C32	0.013

4.2 同相两用户接线异常仿真

选择同相用户 A8 和 A27 进行零线、地线反接, 记录 2 d 的运行数据, 并基于该数据进行仿真计算。对居民负荷电流与台区剩余电流做岭回归分析, 绘制标准化系数和关于惩罚值变化曲线如图 8 所示。

图 8 中将岭迹变化第一次趋于平缓的位置以红色方块标识, 其所对应的惩罚值为 0.32, 对应的岭系数结果列如表 3 所示。由表 3 中可知, 用户 A8 和用户 A27 的岭系数明显大于其余所有用户, 其负荷电流对台区剩余电流影响最大, 可判定为接线错误的疑似用户, 与设定结果相符。

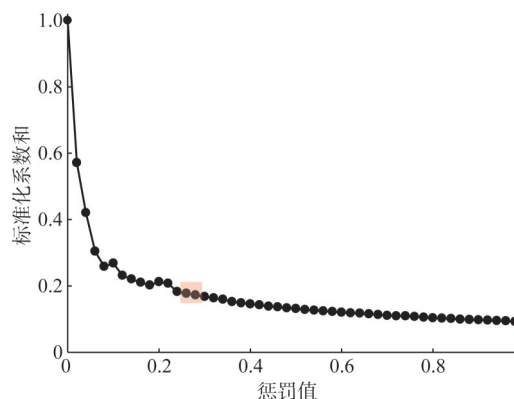


图 8 同相两用户标准化系数和变化曲线

Fig. 8 Variation curve of normalized coefficient sums of two users in the same phase

表 3 同相两用户岭系数

Tab. 3 Ridge coefficients of two users in the same phase

用户序号	岭系数	用户序号	岭系数	用户序号	岭系数	用户序号	岭系数
A1	-0.018	A21	-0.028	B14	-0.073	C13	0.010
A2	-0.064	A22	0.050	B15	0.019	C14	0.054
A3	0.021	A23	-0.029	B16	0.012	C15	0.023
A4	-0.042	A24	-0.044	B17	0.013	C16	0.046
A5	-0.045	A25	0.024	B18	0.019	C17	0.064
A6	-0.058	A26	0.032	B19	0.034	C18	0.015
A7	0.034	A27	0.161	B20	-0.067	C19	0.027
A8	0.233	B1	0.010	B21	0.017	C20	0.005
A9	-0.064	B2	0.045	C1	-0.082	C21	0.042
A10	0.015	B3	0.000	C2	0.003	C22	0.054
A11	0.044	B4	0.054	C3	-0.023	C23	0.039
A12	-0.038	B5	-0.018	C4	-0.036	C24	0.046
A13	-0.045	B6	-0.060	C5	-0.071	C25	0.086
A14	-0.013	B7	-0.021	C6	0.050	C26	0.048
A15	-0.036	B8	-0.010	C7	-0.031	C27	0.030
A16	-0.008	B9	-0.009	C8	0.046	C28	0.006
A17	-0.024	B10	-0.027	C9	0.024	C29	0.017
A18	0.014	B11	0.072	C10	-0.013	C30	0.041
A19	-0.007	B12	0.040	C11	0.009	C31	0.021
A20	0.021	B13	0.002	C12	-0.011	C32	0.029

4.3 两相两用户接线异常仿真

选择不同相的用户 A14 与用户 B18 为接线异常用户。按不同相两用户同时发生接线异常的情况进行 24 h 实验测试数据记录, 然后采用计量的剩余电流和用户负荷数据进行定位识别。绘制标准化系数和关于惩罚值变化曲线如图 9 所示。

图 9 中将岭迹变化第一次趋于平缓的位置以红色方块标识, 其所对应的惩罚值为 0.34, 对应此惩罚值的岭系数结果列如表 4 所示。由表 4 可知, 用户 A14 和用户 B18 的岭系数明显大于其余所有用户, 其负荷电流对台区剩余电流影响最大, 可判定为接线错误的疑似用户, 与设定结果相符。

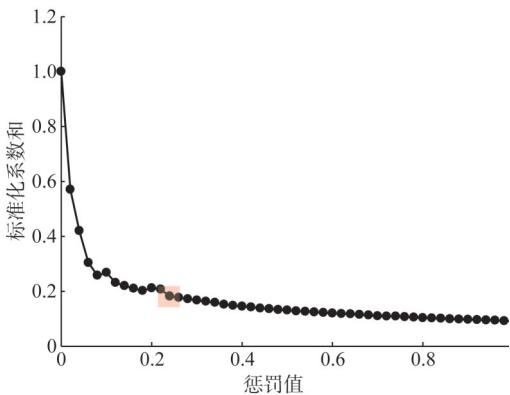


图 9 不同相两用户标准化系数和变化曲线

Fig. 9 Variation curve of normalized coefficient sums of two users of different phase

4.4 对比实验

为了证明所提方法的有效性, 还利用基于多元线性回归 (mixed logistic regression, MLR) 的方法对 2 个不同相用户的接线故障进行了识别, 结果如表 5 所示。结果表明, 在样本量较大的情况下, 例如 96 个样本点, 所提方法和 MLR 方法对用户 A14 和用户 B18 的识别效果良好, 异常用户的相关系数明显高于正常用户, 趋近于 1。但是, 当样本量较小 (例如 48 个数据点) 时, 归因分析结果出现明显差异。在 MLR 方法中, 由于样本量不足 (观测值少于变量) 导致矩阵奇异性, 权重系数在用户之间的分布不再能够区分异常用户, 使回归结果不可靠。相比之下, 岭回归方法对于异常用户的系数有所降低, 同时与正常用户保持了统计上的显著差异, 从而能够可靠地识别异常。

根据结果对比可以看出, 所提出的方法在线路故障识别方面具有有效性, 即使在样本量较小的情

表 4 不同相两用户岭系数

Tab. 4 Ridge coefficients of two users in different phases

用户 序号	岭系数	用户 序号	岭系数	用户 序号	岭系数	用户 序号	岭系数
A1	0.005	A21	0	B14	0	C13	0.001
A2	0.001	A22	0	B15	-0.001	C14	0.002
A3	-0.001	A23	0	B16	0.001	C15	0.004
A4	0	A24	0	B17	0.001	C16	0
A5	-0.001	A25	0	B18	0.996	C17	0
A6	0	A26	0	B19	0	C18	-0.001
A7	0.001	A27	0.001	B20	0	C19	0
A8	0	B1	0.004	B21	-0.001	C20	-0.001
A9	0	B2	-0.001	C1	0.002	C21	0
A10	-0.002	B3	0	C2	0	C22	0.001
A11	0	B4	-0.001	C3	0	C23	0
A12	0	B5	-0.001	C4	-0.006	C24	-0.001
A13	0.002	B6	-0.001	C5	0.005	C25	0
A14	1	B7	0	C6	0	C26	0
A15	0	B8	-0.001	C7	0.003	C27	0
A16	0	B9	0	C8	0.001	C28	-0.001
A17	0.001	B10	0	C9	-0.001	C29	0.001
A18	0.002	B11	0	C10	-0.002	C30	0.001
A19	-0.002	B12	0	C11	0	C31	0.002
A20	-0.003	B13	0	C12	0	C32	0.001

况下也能可靠地区分异常用户。

表 5 不同归因分析方法与不同样本的比较

Tab. 5 Comparison of different attribution analysis methods with different samples

样本点 用户序号	96		48	
	岭回归	MLR	岭回归	MLR
A1	0.005	0.003	-0.010	-9.95
A2	0.001	0.001	-0.029	-0.489
A3	-0.001	-0.001	-0.013	-2.252
A4	0	0	0.030	1.224
A5	-0.001	-0.001	0.040	-1.044
A6	0	0	-0.020	-0.235
A7	0.001	0.001	-0.079	0.45
A8	0	0	-0.052	-0.548
A9	0	-0.001	0.047	-2.968
A10	-0.002	-0.001	0.078	-0.613
A11	0	0	0.012	1.04
A12	0	0	0.058	-0.679
A13	0.002	0	-0.022	-2.393
A14	1	1	0.253	1.735
A15	0	0	0.070	-0.298

续表				
样本点 用户序号	96		48	
	岭回归	MLR	岭回归	MLR
A16	0	0	-0.048	-0.478
A17	0.001	0.001	0.042	0.531
A18	0.002	0.002	-0.031	-8.136
A19	-0.002	-0.002	0.043	-1.771
A20	-0.003	-0.002	0.040	-1.224
A21	0	0	-0.036	0.247
A22	0	0	-0.040	-0.721
A23	0	0	0.032	0.042
A24	0	0	-0.034	-1.022
A25	0	0	0.025	-1.954
A26	0	-0.001	-0.066	-1.842
A27	0.001	0	-0.008	-0.371
B1	0.004	0.004	-0.011	-0.33
B2	-0.001	0	-0.021	0.678
B3	0	-0.001	0.049	-1.443
B4	-0.001	-0.001	0.013	0.143
B5	-0.001	-0.001	0.033	-1.077
B6	-0.001	-0.001	0.041	0.65
B7	0	0	0.043	-3.397
B8	-0.001	0	-0.035	0.049
B9	0	0	0.007	-0.362
B10	0	0	0.033	0.686
B11	0	0	0.024	-0.392
B12	0	0	0.039	-0.379
B13	0	0.001	0.061	0.668
B14	0	0	0.008	-1.37
B15	-0.001	-0.001	-0.018	0.079
B16	0.001	0.002	0.047	0.73
B17	0.001	0.001	0.058	-0.613
B18	0.996	0.999	0.116	2.143
B19	0	0	-0.055	0.544
B20	0	0.001	0.069	-1.004
B21	-0.001	-0.001	-0.038	1.751
C1	0.002	0.002	0.015	-3.684
C2	0	0	0.013	-1.481
C3	0	0	0.043	0.881
C4	-0.006	-0.005	0.013	-4.614
C5	0.005	0.002	-0.097	-1.38
C6	0	0	0.069	-0.372
C7	0.003	0.001	0.065	-7.875
C8	0.001	0.004	-0.038	11.243
C9	-0.001	-0.001	0.028	-0.518
C10	-0.002	0	-0.074	10.134

续表				
样本点 用户序号	96		48	
	岭回归	MLR	岭回归	MLR
C11	0	0.001	0.015	0.112
C12	0	0	-0.073	-2.406
C13	0.001	0	0.050	-0.629
C14	0.002	0.001	-0.070	0.806
C15	0.004	0.004	-0.031	1.499
C16	0	0	-0.028	0.171
C17	0	0	-0.038	-1.132
C18	-0.001	0	0.034	0.014
C19	0	0	-0.010	-1.376
C20	-0.001	0.002	0.002	-1.383
C21	0	0	0.068	0.607
C22	0.001	0	-0.036	0.804
C23	0	0	-0.033	3.529
C24	-0.001	-0.001	-0.054	0.456
C25	0	0	-0.047	2.803
C26	0	0	0.030	-0.581
C27	0	0	0.014	-0.188
C28	-0.001	0	-0.048	-9.711
C29	0.001	0	0.047	1.283
C30	0.001	0.001	0.066	3.786
C31	0.002	0.001	0.005	0.023
C32	0.001	0.001	0.015	-0.559

与此同时, 低压台区的用户数量对模型的训练效果及定位精度有显著影响。随着台区用户数量的增加, 样本数据的多样性与复杂度逐步提升, 这可能加重模型的计算负担, 并进而影响其稳定性与预测精度。为评估这一影响, 在不同用户数量的台区中开展接线错误漏电故障用户识别仿真, 并计算各方法的定位准确率。实验结果如表6所示。

表6 不同用户数量定位准确率		
Tab. 6 Positioning accuracies of different number of users		
用户数量	岭回归/%	多元线性回归/%
80	100	100
100	99	93
150	96	85
200	94	80

随着用户数量的增加, 岭回归模型的定位准确率虽然呈现一定波动, 但仍能保持较高的稳定性和较好的定位效果。当台区用户数量为200户时岭回归模型仍能保持94 %的准确率。相比之下, 其他3

种归因分析方法的定位准确率在用户数量增加时明显下降,当用户数量为 200 户时定位准确率分别下降至 80%(多元线性回归)。这表明,岭回归在用户基数较大,也就是变量数较大时表现出较强的鲁棒性,有限的样本中能够获得较高的异常用户识别准确率。

5 结论

低压配电系统接线复杂、漏电故障隐蔽,如何快速准确定位漏电故障以恢复剩余电流保护投运,一直是保障用电安全的关键难点问题。本文针对用户户内零线、地线接线错误漏电故障,分析故障存在时台区电气量之间耦合关系,基于智能台区剩余电流及用户负荷电流计量数据,提出了多重共线性影响的接线错误用户岭回归分析识别方法。基于真型配电台区试验数据进行测试,验证了所提方法的可行性。考虑不同样本点数量与多元线性回归方法进行对比实验,并考虑不同用户数量的影响,验证所提方法的优越性。而低压台区系统情况复杂,漏电故障形式多样,工程实际中仍然存在数据缺失、环境影响等干扰因素,不同漏电故障同时存在时台区电气量之间关联特性也将进一步削弱,仍需进行针对性的优化改进以提高所提方法在工程实际中的适用性。需要指出的是当前研究结论在方法有效性和异常识别准确性方面主要适用于纯居民负荷场景,对于包含其他负荷类型的台区仍需进一步研究与验证,以确保方法的普适性和适应性。

参考文献

- [1] 李天友,黄伟达,邱智勇.低压配电公共安全问题分析[J].供用电,2021 38(12):9-14.
LI Tianyou, HUANG Weida, QIU Zhiyong. Analysis of public safety issues in low voltage power distribution[J]. Distribution & Utilization, 2021 38(12): 9-14.
- [2] 李天友,郭峰.低压配电的触电保护技术及其发展[J].供用电,2019,36(12):2-8.
LI Tianyou, GUO Feng. Electric shock protection technology and its development in low voltage power distribution[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(12): 2-8.
- [3] 林志超,单玉凯.惠州低压配电网触电保护运行情况[J].供用电,2019,36(12):35-39.
LIN Zhichao, SHAN Yukai. Operation situation of electric shock protection in low-voltage distribution system of huizhou[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(12): 35-39.
- [4] 黄超艺,陈宏,王晨.低压配电网接地方式及三级剩余电流保护应用实践.供用电,2019 36(12):29-34.
HUANG Chaoyi, CHEN Hong, WANG Chen. Grounding method of low voltage distribution network and application practice of three-level residual current protection[J]. Distribution & Utilization, 2019 36(12): 29-34.
- [5] 李天友.低压配电防人身触电保护的技术研究及进展[J].供用电,2019,36(12):1.
LI Tianyou. Technical research and progress of low-voltage power distribution protection against electric shock[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(12): 1.
- [6] 杨智奇,李天友,陈航宇.低压配电网的保护配置及其适应性分析[J].电气技术,2020,21(12):40-44,73.
YANG Zhiqi, LI Tianyou, CHEN Hangyu. Protection configuration and adaptability analysis of low voltage distribution network[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(12): 40-44, 73.
- [7] 郭峰,李天友,郑文迪,等.配电网用户设备接地-接零保护混用风险分析[J].电气技术,2019,20(8):85-89.
GUO Feng, LI Tianyou, ZHENG Wendi, et al. Risk analysis of mixed use of grounding and zero protection for user equipment in distribution network[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(8): 85-89.
- [8] 张勇军,秦绍基,孙健,等.低压台区透明化技术研究综述[J].南方电网技术,2025,19(8):116-127,149.
ZHANG Yongjun, QIN Shaoji, SUN Jian, et al. Review of transparent technology of low-voltage substation area[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 116-127, 149.
- [9] 郑雅文,李巍,易启淋,等.基于多元数据特征的低压配电网线户关系识别[J].南方电网技术,2024,18(5):124-134.
ZHENG Yawen, LI Wei, YI Qilin, et al. Identification method of feeder-consumer connectivity in low-voltage distribution network based on multivariate data feature[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 124-134.
- [10] 王华佳,曹文君,张岩,等.基于随机森林与内核岭回归的配电网线损在线计算[J].南方电网技术,2023,17(8):104-112.
WANG Huajia, CAO Wenjun, ZHANG Yan, et al. Online calculation of distribution network line loss based on RF and KRR[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 104-112.
- [11] 慕静茹,喻锐,曾祥君,等.考虑多扰动因子的含光伏电源低压台区漏电故障检测[J].南方电网技术,2024,18(10):130-141.
MU Jingru, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Leakage fault detection in low-voltage station area with photovoltaic power supply considering multi-disturbance factors[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 130-141.
- [12] 辜弘,王政,杨皓涵,等.10 kV 配电线路单相树线故障零序电压变化特性[J/OL].南方电网技术,1-9[2025-04-30].
<https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240923010>.
- [13] 赖志强,李彬,李文松,等.基于台区剩余电流监测的接线错误用户漏电故障定位[J].中国电机工程学报,2024,44(1):85-94.
LAI Zhiqiang, LI Bin, LI Wensong, et al. Leakage fault loca-

- tion of users with abnormal wiring based on residual current monitoring in serving zone of distribution transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 85–94.
- [14] 周凯欣, 冯萧飞, 苏盛, 等. 基于时序关联特性的错误接线漏电用户定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 247–259.
- ZHOU Kaixin, FENG Xiaofei, SU Sheng, et al. User location method for wrong wiring and leakage electricity based on timing correlation characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 247–259.
- [15] 全国电气安全标准化技术委员会. 系统接地的型式及安全技术要求; GB 14050—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] International Electrotechnical Commission. Low voltage electrical installations-part 4-41: protection for safety-protection against electric shock consolidated edition; IEC 60364-4-41 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低压配电设计规范: GB 50054—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [18] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002–5017.
- LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022 42(14): 5002–5017.
- [19] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术的发展思路. 中国电机工程学报, 2020 40(1): 70–82.
- ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development ideas of key technologies for intelligent sensing of ubiquitous power Internet of Things [J]. Proceedings of the CSEE, 2020 40(1): 70–82.
- [20] 刘杰荣, 张耀宇, 关家华, 等. 基于量测大数据和数学形态学的配电网故障检测及定位方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 97–104.
- LIU Jierong, ZHANG Yaoyu, GUAN Jiahua, et al. Research on distribution network fault detection and location method based on measurement big data and mathematical morphology [J]. Smart Power, 2020, 48(1): 97–104.
- [21] 国际法制计量组织. 有功电能表: OIML R 46–1&2: 2012 [S]. 巴黎: 国际法制计量局, 2012.
- [22] 李高扬, 王宁, 高若田, 等. 面向新型电力系统智能化提效的多源异构数据融合技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 116–121.
- LI Gaoyang, WANG Ning, GAO Ruotian, et al. Research on multi-source heterogeneous data fusion technology for intelligent efficiency improvement of new power systems [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2024, 61(11): 116–121.
- [23] 张丽强, 丛伟, 董罡, 等. 基于多元线性回归的单相电表相别判断方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 144–156, 187.
- ZHANG Liqiang, CONG Wei, DONG Gang, et al. Method for single-phase electric meter phase identification based on multiple linear regression [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 144–156, 187.
- [24] MOHANPURKAR M, SURYANARAYANAN S. Regression modeling for accommodating unscheduled flows in electric grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2569–2570.
- [25] 陈丽丹, 马永良, 张哲, 等. 基于广义交叉验证和吉洪诺夫正则化参数的智能电表计量异常识别方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 125–133.
- CHEN Lidan, MA Yongliang, ZHANG Zhe, et al. Smart meter measurement anomaly identification method based on generalized cross validation and Tikhonov regularization parameter [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 125–133.
- [26] 王华佳, 曹文君, 张岩, 等. 基于随机森林与内核岭回归的配电网线损在线计算[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 104–112.
- WANG Huajia, CAO Wenjun, ZHANG Yan, et al. Online calculation of distribution network line loss based on random forest and kernel ridge regression [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 104–112.

收稿日期: 2025-02-14; 网络首发日期: 2025-06-09

作者简介:

周义博(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智能用电和用电异常检测, zhouyibo@dg.gd.csg.cn;

李泽贤(2000), 男, 工程师, 学士, 研究方向为配电运维, 15989907000@163.com;

杨正权(1987), 男, 工程师, 学士, 研究方向为电气设备故障诊断与健康管理, 164021317@qq.com。