

基于数据与物理驱动的低压配电网零线断线诊断与定位方法

刘林鹏¹, 陈 诚², 舒乐明², 戚沁雅¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 国网江西省电力有限公司鹰潭供电分公司, 江西 鹰潭 335001)

摘 要: 针对低压配电网零线断线特征隐蔽标量电表相位缺失导致复杂工况下误报率高的问题, 提出一种数据与物理驱动融合的在线诊断与定位方法。构建虚拟中性点位移与相间电压互补相关系数, 利用孤立森林算法进行异常无监督初筛; 引入动态线性回归残差、综合能量漂移及电压功率映射等物理规律作为约束边界, 剔除三相不平衡、高压缺相等特殊工况干扰; 基于有向无环图与交集相似度实现了故障层级的定位。仿真测试表明, 该方法召回率为98.2%, 误报率为1.4%, 并在数据部分缺失情况下, 实现了至末端表箱的精确定位, 并在仅依托标量数据的条件下, 实现了复杂环境中零线断线故障的识别与定位。

关键词: 低压配电网; 零线断线; 故障诊断; 故障定位; 数据与物理驱动; 孤立森林算法

中图分类号: TM 726 ; TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2026)03-0029-07

0 引言

低压配电网作为连接输电骨干网与末端用户的核心枢纽, 其供电可靠性与设备运行安全性直接关系到电力系统的整体服务质量。在广泛采用的TN-C或TN-C-S三相四线制配电系统中, 零线(中性线或保护接地兼中性线)承担着传导不平衡电流、确立系统参考零电位及保障设备接地的基础物理作用。受设备自然老化、接触电阻非线性增大及复杂运行环境等因素影响, 零线易发生高阻连接或断线故障。该类故障属于典型的开路电气异常, 发生后将导致配电台区拓扑结构由闭合回路转变为负载中性点悬浮系统, 进而引发中性点电位偏移与三相电压的不对称波动。在此状态下, 系统呈现重载相欠压与轻载相过压的稳态特征, 长期的过电压现象会加速用电设备的绝缘劣化, 并显著增加接触危险电压的安全隐患。由于零线断线通常不产生足以触发传统过电流保护装置的短路电流, 使得基于底层硬件保护的被动响应模式难以实现有效隔离

与隐患排查。因此, 深入研究零线断线故障的演化机理, 探索有效的在线监测与诊断方法, 对提升现代智能配电网的安全防御能力具有重要的工程应用价值。

在配电网断线及相关不对称故障的监测与诊断方面, 国内外学者已开展了大量研究并取得了阶段性成果。传统的物理诊断与保护方法通常依赖于硬件检测装置的升级与多维测量信息的融合, 如利用改进型剩余电流保护器识别漏电突变特征, 或依托分布式的微型相量测量单元与馈线终端设备, 直接采集双端电气量与零序特征, 从而实现单相断线、漏电或复合故障的快速隔离与定位^[1-4]。然而, 与上述带有显著故障电流或相量突变的相线故障不同, 低压配电网零线断线属于特征极度隐蔽的开路异常, 且台区底层普遍缺乏高精度的高频监测设备, 导致传统的基于硬件的诊断模型难以直接迁移应用。近年来, 随着用电信息采集体系的普及, 基于智能电表海量量测数据的数据驱动类诊断方法成为本领域的热点, 为解决上述隐蔽性故障的监测提供了新思路。部分学者引入机器学习、人工神经网络、随机森林以及数字孪生技术, 通过挖掘节点相电压时序特征或估

收稿日期: 2026-04-10

基金项目: 国网江西省电力有限公司重点研究科技项目(52182025000B)。

作者简介: 刘林鹏(1996), 男, 硕士, 工程师, 从事智能配电网运行与维护、电力大数据分析与人工智能应用研究。

算对称分量,实现了配电网高阻接地与断线故障的分类识别^[5-8]。然而,现有的纯数据驱动模型在实际工程应用中仍面临多重局限,亟需进一步的深入研究。首先,现役智能电表普遍仅采集标量数据而缺失相位角信息,导致传统基于相量的解析诊断模型难以直接应用;其次,实际配电网中客观存在 Yyn0 变压器三相不平衡、配变高压侧缺相、分布式光伏逆向潮流以及计量装置自身参考电位偏移等复杂工况,这些工况在标量电压上的表征与零线断线特征高度交叉,传统算法难以进行物理机理解耦,容易产生高频误报;最后,面对拓扑结构错综复杂的低压分支网络,在底层量测数据存在丢失情况或通信非理想的约束下,现有研究尚未提出能够实现高容错率的故障区段精准定位方法。

为突破标量数据维度缺失及复杂工况特征混淆的技术瓶颈,文中提出一种基于数据与物理驱动深度融合的低压配电网零线断线故障在线监测理论与定位方法,以实现海量台区数据下的高置信度故障识别。首先,构建了基于无监督学习与物理约束校验的双层研判架构,在特征提取阶段,重构了表征电压离散度的虚拟中性点位移指标与相间互补相关系数,并利用孤立森林算法实现海量数据异常状态的无监督初筛,创新性地引入综合能量漂移指标、动态线性回归残差检验法及电压-功率时空因果映射逻辑,通过底层基尔霍夫定律等物理规则,为数据驱动模型施加强理论约束边界,以求精准剔除光伏倒送、高压缺相等典型干扰工况;其次,文中建立了基于有向无环图的配电网拓扑计算模型,结合交集相似度算法,将底层电气特征的数值突变映射至物理拓扑空间。研究结果表明,所提方法能够在智能电表数据部分缺失的非理想状态下,有效剥离无关分支的干扰,实现从配电变压器低压侧至末端表箱的故障层级精确定位。该研究成果实现了零线断线故障的准确监测,为基层运维班组的精准抢修与配电网的主动消缺提供了可靠的理论依据与决策支撑。

1 基于无监督学习与多维机理解耦的零线断线诊断方法的研究

该研究旨在建立一套适用于无相位角量测条件下的低压配电网零线断线故障在线监测与定位理论

框架。针对海量智能电表数据的高维特性及配电网复杂运行工况的干扰,文中提出一种“数据驱动初筛+物理机理精判”的双层融合诊断算法,并结合图论交集分析法实现故障区段的空间拓扑推演。具体研究方法 with 模型构建过程如下。

1.1 缺失相位条件下的特征工程重构

在正常运行的三相四线制配电系统中,依据弥尔曼定理,负载侧中性点位移电压受三相电源电压、负载导纳及零线导纳的共同约束^[9]。当零线发生断线或高阻连接时,零线等效导纳趋近于零,中性点位移电压演变为由三相负载导纳的不对称性主导,进而导致相电压幅值呈现互补偏移特征。

由于智能电表普遍仅采集标量电压数据,无法直接利用复数域对称分量法解析故障。为此,文中构造了二维统计学特征向量以表征电压矢量畸变规律:

1) 虚拟中性点位移指标 U_{ND} : 利用三相电压幅值的均方差近似表征中性点位移程度。

$$U_{ND}(t) = \sqrt{\frac{(U_A(t) - \bar{U})^2 + (U_B(t) - \bar{U})^2 + (U_C(t) - \bar{U})^2}{3}} \quad (1)$$

式中: $\bar{U}$ 为三相电压算术平均值; $U_A(t)$ 、 $U_B(t)$ 、 $U_C(t)$ 分别表示 A、B、C 三相在 t 时刻的电压有效值。

2) 相间电压互补相关系数 R_{xy} : 基于滑动时间窗口(如 15 min 量测周期),计算相电压变化率之间的皮尔逊相关系数。由于断线导致中性点漂移遵循能量与矢量守恒定律,相间电压呈现“一升一降”或“两升一降”等负相关特征,这与上级电网调压引起的同升同降具有显著区别。

$$R_{AB} = \frac{\sum (U_A^i - \bar{U}_A)(U_B^i - \bar{U}_B)}{\sqrt{\sum (U_A^i - \bar{U}_A)^2} \sqrt{\sum (U_B^i - \bar{U}_B)^2}} \quad (2)$$

式中: R_{AB} 为 A 相与 B 相电压的时间序列皮尔逊相关系数,取值范围为 $[-1, 1]$; i 为滑动时间窗口内的采样点序号; U_A^i 、 U_B^i 分别表示在第 i 个采样时刻实际测量到的 A 相和 B 相电压有效值; $\bar{U}_A$ 、 $\bar{U}_B$ 分别表示在当前设定的采样时间窗口内, A 相电压和 B 相电压的算术平均值。

1.2 基于无监督学习与物理约束的双层异常检测模型

面对配电网海量正常负荷波动背景数据以及故障样本严重匮乏的现状,该研究构建了双层异常检测

模型,以保障研判的计算效率与置信度。

第一层基于无监督的孤立森林算法,进行异常初筛。孤立森林算法基于“异常数据在特征空间中具有低密度与短路径长度”的原理,无需依赖先验标注样本即可实现异常聚类^[10]。将构建的二维特征向量输入由多棵随机二叉树组成的森林模型中,计算样本 x 的异常得分 $s(x,n)$:

$$s(x,n) = 2^{\frac{E(h(x))}{c(n)}} \quad (3)$$

式中: $E(h(x))$ 为样本在所有树中的平均路径长度; $c(n)$ 为样本量 n 的归一化因子。当 $s(x,n)$ 逼近1时,判定该数据簇为疑似断线异常。

第二层基于物理特征进行二次校验。依据基尔霍夫定律,零线断线时满足以下特征:存在至少一相电压越限,且低压侧三相电压的平均值的时间微商保持相对稳定。

$$\exists \phi \in \{A, B, C\}, |U_{\phi} - U_{\text{nom}}| > \delta_{\text{thre}} \quad (4)$$

$$\left| \frac{d\bar{U}}{dt} \right| < \epsilon \quad (5)$$

式中: U_{ϕ} 为任意相电压有效值; U_{nom} 为额定相电压; δ_{thre} 为电压越限容差阈值; ϵ 为允许的波动裕度。该物理约束有效剥离了非故障类的整体电压偏移扰动。

1.3 复杂运行工况的干扰排除算法

电网实际运行中存在多类复杂运行工况,其标量电压表征与零线断线高度相似。为降低误报率,文中建立了针对复杂运行工况的干扰排除算法。

1) Yyn0 变压器三相不平衡干扰排除

Yyn0 联结组别变压器具有较大的零序阻抗,三相不平衡电流会中性线上产生显著的压降,造成类似断线的电压偏移,其中性点位移电压 $\dot{U}_N$ 由零序电流 $\dot{I}_0$ 和变压器零序阻抗 Z_0 决定,由于变压器 Z_0 为定值,电压偏离量与电流不平衡量呈线性关系:

$$\dot{U}_N = -\dot{I}_0 \cdot Z_0 \quad (6)$$

然而,中性点位移不再遵循 Z_0 的线性压降,而是由三相负载导纳 Y_A, Y_B, Y_C 的不对称性决定,表现为非线性突变:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (7)$$

文中提出“动态线性回归残差检验法”,实时拟合该台区历史正常运行数据构建的电压-电流线性回归

模型:

$$\hat{\delta}_U(t) = \alpha \cdot \beta_I(t) + \epsilon \quad (8)$$

$$\beta_I(t) = \frac{\max(I_A, I_B, I_C) - \min(I_A, I_B, I_C)}{\bar{I}_{\text{avg}}} \quad (9)$$

$$\delta_U(t) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{\phi \in \{A, B, C\}} (U_{\phi}(t) - \bar{U}_{\text{avg}})^2} \quad (10)$$

式中: α 为历史拟合斜率,表征该台区的等效阻抗特性; ϵ 为截距项; $\bar{U}_{\text{avg}}, \bar{I}_{\text{avg}}$ 分别为当前时刻三相电压、电流的算术平均值; $\beta_I(t)$ 为电流不平衡度,是对零序电流的近似替代; $\hat{\delta}_U(t), \delta_U(t)$ 分别为当前时刻电压离散度预测值和实测值,他们是对中性点位移的近似替代。通过计算当前时刻 $\delta_U(t)$ 与 $\hat{\delta}_U(t)$ 的残差,若残差超出预设阈值,则表明电压偏离无法用电流不平衡度解释,判定为零线断线;反之则滤除该Yyn0变压器三相不平衡干扰。

2) 配变高压侧缺相干扰排除

配电变压器高压侧(10 kV)发生单相断线或跌落式熔断器熔断故障时,由于铁芯磁通耦合及负载回馈作用,低压侧(0.4 kV)将呈现出复杂的电压异常模式,在特定条件下容易与零线断线故障混淆。

零线断线故障的核心物理特征是相电压异常,但线电压维持正常,总能量守恒。而高压缺相的本质是“电源侧缺损”,低压侧线电压异常,总输入能量缺失。尽管智能电表无实测线电压,但可构建三相电压均方根值的综合漂移指标 $\mu_{\text{RMS}}(t)$ 来衡量总能量的偏差:

$$\mu_{\text{RMS}}(t) = \sqrt{\frac{U_A(t)^2 + U_B(t)^2 + U_C(t)^2}{3}} \quad (11)$$

若 $\mu_{\text{RMS}} < 190$ V,则优先判定为高压缺相。

3) 分布式光伏倒送引发的电压异动排除

光伏高渗透台区在午间大发时段易因反向潮流产生线路压降抬升,形成“光伏相电压偏高、重载相电压偏低”的伪断线现象。文中构建了电压-功率特征判别模型。若升高的相电压与该相的反向有功功率呈强正相关(皮尔逊相关系数 $\lambda > 0.7$),则判定为光伏倒送干扰,避免了由潮流改变引发的误判^[11-12]。

4) 计量装置自身零线异常干扰排除

当台区总表计量零线端子松动时,表内采样参考点悬浮导致的数据突变与一次侧物理断线特征一致^[13]。文中提出基于空间一致性的交叉验证算法,提

取总表电压的方差时间序列 $H_{TT}(t)$ 与下辖用户群电压平均值的方差时间序列 $H_{\Omega}(t)$ 。在发生异常的滑动时间窗 ΔT 内, 计算两者的皮尔逊时序相关系数 R_{space_time} :

$$R_{space_time} = \frac{\int_{\Delta T} [H_{TT}(t) - \mu_{TT}] [H_{\Omega}(t) - \mu_{\Omega}] dt}{\sqrt{\int_{\Delta T} [H_{TT}(t) - \mu_{TT}]^2 dt} \cdot \sqrt{\int_{\Delta T} [H_{\Omega}(t) - \mu_{\Omega}]^2 dt}} \quad (12)$$

式中: μ_{TT} 、 μ_{Ω} 分别表示 $H_{TT}(t)$ 、 $H_{\Omega}(t)$ 在滑动时间窗 ΔT 内的平均值。

1.4 基于有向无环图与交集分析的故障层级定位方法

完成故障识别后, 需将电气特征突变映射至物理空间实现区段定位。文中将低压配电台区的“变压器-主干线-分支箱-表箱-用户”物理连接关系抽象为一棵树型有向无环图 $T=(V, E)$ 。其中, 节点集合 $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$, 根节点 v_0 为台区变压器低压侧出线桩头, 其余节点为各级分支箱、表箱或接线盒。叶子节点集合 $M \subset V$, 代表末端智能电表(受电用户)。边集合 $E=\{e_0, e_1, \dots, e_m\}$, 代表连接各节点的低压电缆或导线^[14-18]。

所提零线断线故障定位的本质是寻找引发下游群发性电压畸变的“最小公共上游节点”。定义某节点 v_k 的所有下游挂载用户集合为 $D(v_k)$, 当前台区实际发生异常的用户集合为 S_{abnorm} 。

首先, 进行主干线/桩头断线判别。计算台区整体异常覆盖率 r_{root} :

$$r_{root} = \frac{|D(v_0) \cap S_{abnorm}|}{|D(v_0)|} \quad (13)$$

若 $r_{root} \geq \Gamma_{global}$ (全局故障阈值, 通常取 $\Gamma_{global} = 0.85$), 则判定为变压器主干线或桩头故障。

其次, 针对分支线/表箱故障, 引入杰卡德相似系数构建节点寻优目标函数 $J(v_k)$:

$$J(v_k) = \frac{|D(v_k) \cap S_{abnorm}|}{|D(v_k) \cup S_{abnorm}|} \quad (14)$$

故障定位转化为在节点集合中求解使得 $J(v_k)$ 最优值 v_{fault} :

$$v_{fault} = \arg \max_{v_k \in V \setminus \{v_0\}} J(v_k) \quad (15)$$

为确保定位鲁棒性, 定位结果需通过以下校验:

$$J(v_{fault}) > \lambda_{loc} \quad (16)$$

$$|D(v_{fault}) \cap S_{abnorm}| \geq N_{min} \quad (17)$$

式中: λ_{loc} 为相似度阈值, 一般取 0.8; N_{min} 为最小异常用户数, 通常取 2, 以排除单表自身故障。

2 算例分析

为验证文中所提基于数据与物理驱动深度融合的零线断线诊断与定位方法的有效性, 依托 Matlab/Simulink 平台搭建了典型低压配电网仿真模型, 并结合国内某省电网真实高频台区量测数据构建了包含多类复杂工况的综合测试集。如图 1 所示, 仿真台区采用 Yyn0 型配电变压器(容量 400 kVA, 10/0.4 kV), 拓扑结构划分为“变压器-主干线-分支箱-表箱-用户”五个层级, 包含主干线 2 条, 各级分支箱 8 个, 居民与工商业用户共计 142 户, 并含分布式光伏渗透户 15 户。智能电表数据采样周期设定为 15 min。

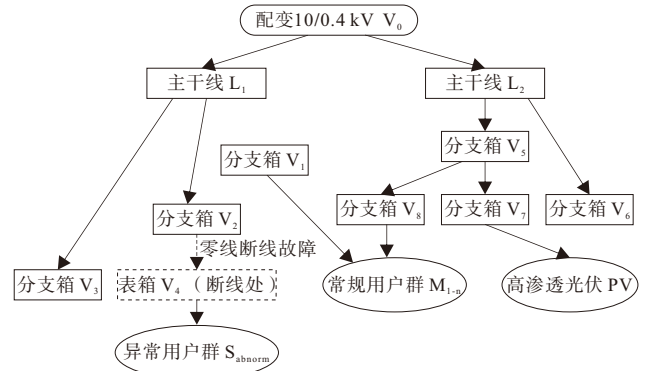


图1 仿真低压配电台区拓扑结构图

2.1 特征重构与无监督初筛有效性验证

首先, 对缺失相位条件下的特征重构与双层异常检测模型进行验证。在仿真时间轴 $t=24$ (即第6小时末) 处, 设置台区主干线 L_1 发生高阻零线断线故障(过渡电阻设定为 150Ω)。提取典型表箱节点量测数据, 计算其虚拟中性点位移指标 U_{ND} 、相间电压互补相关系数 R_{xy} 及孤立森林异常得分 $s(x, n)$, 演化趋势如图 2 所示。在 $t < 24$ 的正常运行阶段, 受三相负载随机波动影响, U_{ND} 在 $[0, 10]$ 区间内微小震荡, 相间特征不明显, 异常得分维持在 0.35 左右。当 $t \geq 24$ 发生断线后, U_{ND} 跃升至 45 以上; 同时, A 相因轻载电压骤升, B、C 相因重载跌落, 使得 R_{AB} 和 R_{AC} 迅速下降至 -0.85, 呈现强负相关。此时异常得分 $s(x, n)$ 上升至 0.92, 且 $d\bar{U}/dt$ 维持在 0.02 V/min, 系统成功触发异常初筛。

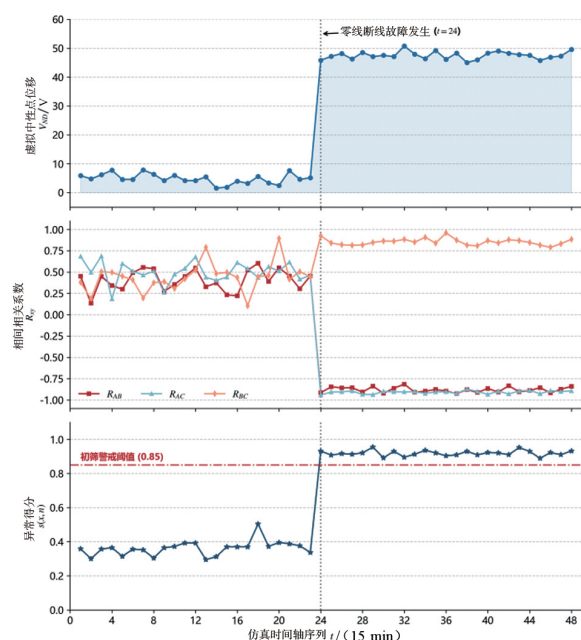


图2 零线断线前后特征向量及异常得分演变趋势

2.2 复杂运行工况抗干扰性能分析

为验证物理机理解耦算法在降低误报率方面的优越性,针对纯数据驱动模型易误判的四类典型复杂工况进行验证。

1) Yyn0变压器三相不平衡干扰的排除

针对Yyn0变压器三相负荷不对称引发的中性点偏移,文中采用动态线性回归残差检验法。如图3所示,利用历史数据拟合的回归基线能够表征不平衡电流造成的线性压降。当仅发生三相不平衡时(蓝色散点),实测电压离散度 $\delta_v(t)$ 与预测基线基本贴合,残差较小;而在零线断线工况下(红色散点),中性点位移受非线性导纳主导, $\delta_v(t)$ 偏离回归基线,残差超过设定的阈值。证明该方法实现了三相不平衡与零线断线的精准区分。

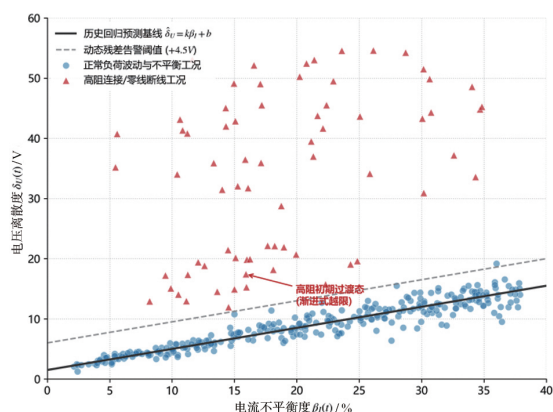


图3 三相不平衡与零线断线工况下的残差分布对比

2) 配变高压侧缺相干扰的排除

配变10 kV侧跌落式熔断器动作后,会在低压侧造成与零线断线相似的相电压不对称。如图4所示,文中通过综合能量漂移指标 $\mu_{RMS}(t)$ 对两者进行区分。高压缺相本质为能量输入缺失,发生故障后从额定值下降至165 V左右;而零线断线仅改变内部电位参考点,满足总能量守恒准则,其 $\mu_{RMS}(t)$ 在190~220 V的正常范围波动。基于此能量边界条件,成功排除了高压缺相的干扰。

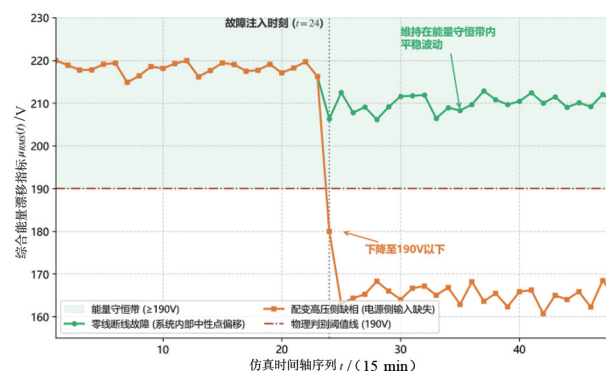


图4 高压缺相与零线断线 μ_{RMS} 响应曲线对比

3) 光伏倒送干扰的排除

图5选取了含高比例分布式光伏接入的真实台区午间实测数据。在11:00—14:00期间,光伏接入相(A相)因并网反向有功功率增加,导致该相节点电压被动抬升至245 V;同时,由于另一相(B相)正处于午间用电高峰,其节点电压跌落至195 V。该特征与零线断线故障相似,易导致传统纯数据驱动模型产生误判。因此,所提方法提取了越限相电压与该相有功功率的时序关联特征,A相升高的节点电压与对应的反向有功功率呈现强正相关(皮尔逊相关系数0.88),并据此准确判定当前电压异常为“光伏倒送叠加重载”引起,有效降低了此类工况下的误报率。

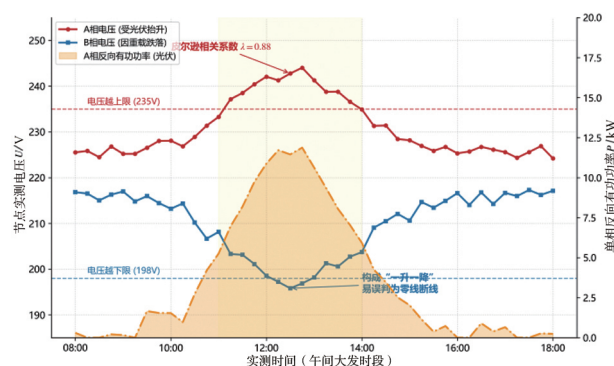


图5 光伏台区倒送功率与节点电压时序相关性分析

4) 计量装置自身零线异常干扰的排除

针对台区总表计量零线端子松动导致的采集电压异常现象,文中采用基于空间一致性的交叉验证算法进行特征解耦。提取某台区总表及下辖45户用户的真实量测数据,在14:00—16:00时间段内模拟总表零线采样端子接触不良故障。如图6所示,当计量零线发生异常时(14:30时),总表自身记录的相电压方差增加且剧烈波动。然而,通过计算下辖用户群的电压均值构建的电压方差却始终平稳的小波动。在滑动时间窗内,计算两者之间的皮尔逊时序相关系数 R_{space_time} 为0.12,低于设定阈值,因此排除一次侧零线断线。

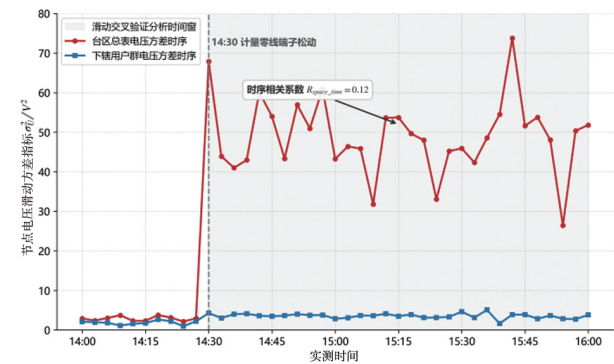


图6 计量零线异常工况下总表与下辖用户群电压方差

为量化评估所提方法的诊断性能,文中构建了包含8 000个样本的综合测试集(其中零线断线/高阻故障正样本1 500个,正常负荷及复杂干扰等负样本6 500个),并传统物理阈值法、纯数据驱动模型(随机森林)及相量解析法(利用标量数据估算伪相量及对称分量进行故障判别的常规解析模型)进行对比测试。结果如表1所示。

表1 指标对比

诊断方法	准确率	精确率	召回率	F1分数	误报率
传统基于阈值的物理诊断法	78.5	65.2	88	74.9	25.6
纯数据驱动模型	89.4	82.1	90.5	86.1	11.2
基于伪相量估计的解析法	85.6	76.5	84.2	80.1	15.8
文中所提双层融合驱动模型	98.7	97.5	98.2	97.8	1.4

测试结果表明,传统物理阈值法易受光伏及不平衡等干扰影响,误报率达25.6%,导致精确率仅为65.2%;纯数据驱动模型虽将准确率提升至89.4%,但面对未见过的极端干扰工况时,仍会产生较高的误报率(11.2%);相量解析法则因标量电表缺失相位信息,诊断误差偏大。相比之下,文中所提的双层融合驱动模型通过严格的物理边界约束,有效剔除了相似

干扰特征,在保持98.2%高召回率的同时,将误报率压缩至1.4%,综合F1分数高达97.8%,证明了所提方法在提升零线断线故障诊断高置信度与强鲁棒性方面的优势。

2.3 所提故障层级定位方法验证

该算例在台区仿真模型中设置内部节点 v_4 发生零线断线,并随机剔除10%的末端表箱量测数据,以模拟真实电网中常见的通信漏报。定位过程如下:首先,计算台区根节点 v_0 的整体异常覆盖率 $r_{root}=38/142 \approx 0.267$ 。由于 r_{root} 低于设定的主干线断线阈值(0.85),判定故障位于下游分支,算法随之向子节点下沉遍历。各拓扑节点的Jaccard相似度 $J(v_k)$ 计算结果空间分布如图7所示。

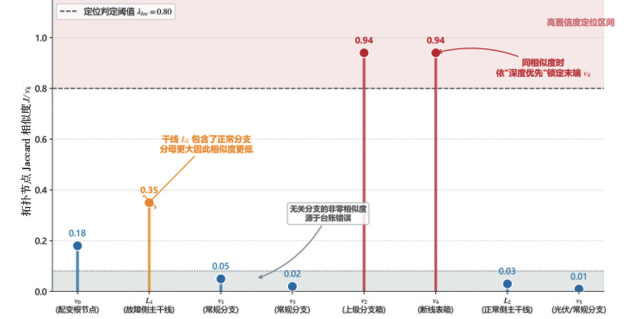


图7 各层级拓扑节点的Jaccard相似度

可以看出,根节点 v_0 及无关分支节点(如 $v_5 \sim v_8$)的相似度普遍在0.3以下。目标节点 v_4 的实际挂载用户群与检出异常用户群高度重合,其目标函数 $J(v_4)$ 高达0.91,满足预设的判定阈值 $\lambda_{loc}=0.8$ 。因此,将故障区间锁定为 v_4 节点,与实际故障点一致,验证了所提方法的有效性。

3 结语

文中针对低压配电网零线断线故障特征隐蔽及易受复杂工况干扰的难题,提出了一种数据与物理驱动深度融合的在线监测与诊断方法。通过重构虚拟中性点位移与相间电压互补相关系数,结合无监督学习算法,实现了异常状态的高效初筛;同时,创新性地引入动态线性回归残差、综合能量漂移及电压-功率因果映射等物理机理作为约束边界,成功解耦并剔除了三相不平衡、高压缺相及光伏倒送等伪特征干扰。测试表明,该双层融合模型有效突破了标量量测条件下的特征维度局限,在保障98.2%高召回率的同时,

将误报率压降至1.4%，显著提升了复杂运行环境下的故障识别置信度；在此基础上，文中构建了基于有向无环图与Jaccard交集相似度的配电网拓扑计算模型，将底层电气特征的异常突变精准映射至物理拓扑空间。该定位策略在量测数据部分缺失的非理想工况下仍具备高容错率，实现了从台区主干线至末端表箱的层级精确定位。

文中研究在无需新增硬件投资的前提下，深度挖掘了现有用采系统的大数据价值，为配电网的主动消缺与精准运维提供了可靠的理论支撑；未来可进一步探索该模型在台区边缘计算终端的轻量化部署，以支撑智能配电网故障的就地化敏捷响应。

参考文献：

- [1] 周超群,陈先凯,盖午阳,等.基于双端剩余电流突变量的漏电保护方法[J].全球能源互联网,2022,5(03):221-229.
- [2] 曾祥君,陈磊,喻锐,等.基于配电网双端信息融合的单相断线故障实时监测方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(03):12-18.
- [3] 施泽慧,牟龙华.基于有限个 μ PMU和压缩感知理论的主动配电网复故障定位方法[J].电气工程学报,2024,19(03):35-42.
- [4] YUN S Y, HONG J S, SIM G D, et al. Detection of open conductor fault using multiple measurement factors of feeder RTUs in power distribution networks with DGs[J]. IEEE Access, 2021, 9: 145890-145902.
- [5] 苏韵,赵琦,瞿海妮.基于机器学习的中压配电网断线不接地故障检测[J].电测与仪表,2019,56(16):72-78.
- [6] 沈赋,张微,徐潇源,等.基于随机森林和最大互信息系数关键特征选择的配电网拓扑辨识研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):112-120.
- [7] 席瑞翎,季亮,姜恩宇,等.基于参数自修正的配电网故障定位数字孪生技术研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(09):1-10.
- [8] NUMAIR M, PONSARTS H, LEENKNECHT R. Fault detection and localization in LV distribution networks using anomaly detection in smart meter data and distribution network digital twin[J]. IEEE Access, 2026, 14: 17525-17539.
- [9] 刁瑞朋,王强,卢志俊.零线断接对三相四线电能表计量影响机理分析[J].计量学报,2023,44(05):750-757.
- [10] 王凯,黄丹,梁晓伟,等.智能电表数据异常在线检测的无监督学习[J].电子测量技术,2021,44(08):125-129.
- [11] 徐岩,邹南,马天祥.逆变型分布式电源接入配电网单相断线故障零序电压分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(02):41-51.
- [12] 黄飞,陈纪宇,欧阳金鑫,等.基于正序电压差的含分布式电源配电网断线接地复合故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):37-48.
- [13] LEENKNECHT R, PONSARTS H, NUMAIR M, et al. Distribution network topology identification via variance analysis of smart meter data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2026, 41(01):2682-2694.
- [14] 杨志淳,沈煜,杨帆,等.基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法[J].电测与仪表,2020,57(18):5-11.
- [15] 楚成博,朱丽萍,方磊,等.基于电压序列相似性的户变关系与相别识别[J].现代电力,2024,41(06):1052-1059.
- [16] FLYNN D, MAJEED A. An improved algorithm for topology identification of distribution networks using smart meter data and its application for fault detection[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(05):3850-3861.
- [17] HONG J S, SIM G D, HYUN S Y, et al. Hierarchical approach for detection and location of open conductor fault in power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(03):1500-1510.
- [18] LIU J, ZHANG Y. Distribution network topology identification using smart meter data and considering the same-bus-different-feeder condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(08):8600-8613.