继电保护装置的智能故障诊断与定位技术研究

聂德宇
国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司 江苏 盐城 224000

摘 要 电力系统所具备的网架逐渐变得复杂，继电保护装置在运行时的工况波动程度加剧，依靠人工排查的模式很难适配数量巨大的时序监测数据以及复杂故障场景。本文针对继电保护智能故障诊断与定位相关方面的理论基础开展梳理工作，对关键的技术问题开展分析工作。围绕多模态深度特征融合、拓扑约束故障定位、时频联合扰动辨识、边缘云端协同架构来形成完整的实现策略。相关的方案能够缓解异构数据融合所存在的障碍，改善高阻接地等工况之下定位精度不足的问题，减少无效告警所带来的运维资源消耗。研究所得出的结论能够为电力企业构建保护装置在线智能研判平台提供理论方面的参考，推动继电保护运维从事后抢修向主动状态预警转型。

关键词 继电保护；智能故障诊断；多模态数据融合；故障定位；边缘智能

Research on Intelligent Fault Diagnosis and Location Technology for Relay Protection Devices

Nie Deyu
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Yancheng Power Supply Branch, Yancheng 224000, Jiangsu Province, China

Abstract The power grid structure of the power system is gradually becoming more complex, and the operating condition fluctuations of relay protection devices during operation are intensifying, making it difficult for manual troubleshooting modes to adapt to the massive time-series monitoring data and complex fault scenarios. This paper reviews the theoretical foundations of intelligent fault diagnosis and localization for relay protection and analyzes the key technical issues. A complete implementation strategy is formed around multimodal deep feature fusion, topology-constrained fault localization, time-frequency joint disturbance identification, and edge-cloud collaborative architecture. The proposed scheme can alleviate the obstacles in heterogeneous data fusion, improve the insufficient localization accuracy under operating conditions such as high-resistance grounding, and reduce the consumption of operation and maintenance resources caused by invalid alarms. The conclusions of this study can provide a theoretical reference for power enterprises to build an online intelligent analysis and judgment platform for protection devices, and promote the transformation of relay protection operation and maintenance from post-event emergency repair to proactive state warning.

Key words Relay Protection; Intelligent Fault Diagnosis; Multimodal Data Fusion; Fault Location; Edge Intelligence

电网网架进行了拓展，保护装置出现异常所引发的供电风险受到了关注。传统的故障排查依赖人工的经验，难以应对复杂的暂态过程以及海量的数据。本文依托智能信息处理的理论，对诊断定位的理论根基进行了梳理，对现场存在的技术瓶颈进行了总结，从特征融合、区段定位、扰动识别、系统架构等层面提出可落地的策略，为变电站在线故障研判平台的建设提供参考，助力电力运维向主动预警转型。

1 继电保护装置智能故障诊断与定位的理论基础

1.1 继电保护装置典型故障机理与失效模式

装置硬件出现老化会改变保护回路的电气特性，例如，PCS-9611线路保护装置常常会出现采样回路接触不良的情况，持续的振动以及温湿度的波动会侵蚀端子金属的接触面。故障从瞬时损坏转变为性能渐进式的衰减，传统的判定标准难以捕捉此类缓慢的异常，运维人员仅依靠定值校验来识别显性的缺陷，微弱的偏移容易被正常工况所掩盖。

1.2 智能诊断与定位的数学与信息论基础

电气时序信号包含着大量的状态信息，故障之后测点信号的互信息波动较为明显。小波包分解能够分层剥离谐波噪声以及有效特征，信息熵能够量化信号无序的变化，以此来区分扰动与本体异常。多测点信号的关联度量为故障区域的溯源提供数学方面的支撑，单纯的阈值比对难以适应工况持续的变动[1]。

1.3 数据驱动与模型驱动融合的诊断理论框架

两种类型的诊断思路都存在着短板，模型驱动依靠保护原理来建立解析方程，然而参数出现偏差会使得定位的精准度降低；数据驱动依赖历史故障样本，不过在罕见失效的场景下识别能力较弱。融合框架通过保护电气原理确定约束边界，利用

实测的时序数据对模型参数进行修正，变电站每天有上万条的采样记录能够对模型边界阈值进行优化，借助物理规律进行约束可以避免纯数据模型脱离保护逻辑，进而能够缩小可疑故障的区间范围，减少现场排查所需的工作时间。

2 继电保护装置故障诊断与定位面临的关键问题

2.1 故障特征模糊与多源异构数据融合困难

装置出现异常的信号难以形成边界清晰的特征向量，模拟量、开关量的存储格式并不统一，智能录波器的波形和保护事件报文的时间戳存在着毫秒级的偏差，时序出现错位会降低特征对齐之后的建模效果；单一的数据源仅能够反映局部的状态，无法还原完整的异常演化路径，不同设备的采样频率差异较大，标准化处理缺乏统一的规范，现场的运维人员难以利用零散数据进行溯源[2]。

2.2 高阻接地、转换性故障等复杂工况下定位精度不足

接地过渡电阻会改变故障回路的电压电流分布情况，高阻接地故障电流幅值接近常规负荷波动区间，常规的阻抗测距算法容易输出偏差较大的故障点位；在故障演化过程中线路相别进行切换会形成转换性故障，暂态分量衰减速度较快、有效窗口较短，利用稳态电气量进行定位难以捕捉过渡阶段的关键信息，线路分支、电缆架空混合线路会放大测距误差。

2.3 扰动信号与真实故障波形辨识难度大

电网在日常运行过程中有多种短时的电气扰动，电容器投切、负荷冲击的暂态波形与故障波形形态相近，持续时间低于20 ms时容易触发保护告警；传统的阈值判定难以区分扰动的来源以及装置本体的缺陷，部分扰动信号的频谱与轻微故障大范围重叠，人工核对录波文件会占用大量的运维工作时间，算法易将正常扰动误判为异常。

2.4 在线诊断时效性与计算资源约束的矛盾

变电站边缘计算单元的算力存在明确的上限，全站保护设备同步上传数据量的峰值能够达到每秒数万条。复杂特征提取以及模型推理会使诊断响应的时长拉长。故障发生之后的黄金研判窗口一般不超过数十秒。高精度的模型若部署在就地装置上，会挤占保护核心的运算资源。云端集中处理的模式会引入网络传输的延迟，还会丧失实时研判的能力。算力分配的策略很难同时兼顾诊断精度以及响应速度。现场设备的升级改造也很难一次性全面替换硬件平台[3]。

3 继电保护装置智能故障诊断与定位的策略实现

3.1 基于深度特征提取与多模态数据协同融合的诊断方法

多模态信息需要摆脱单一电气量识别的局限，保护采样波形、装置事件报文、测控遥信信息能够构成完整的信息集合。浅层特征仅仅捕捉幅值以及相位等直观的参数。深层的网络结构能够挖掘信号内部隐藏的时序关联变化。时间戳同步校准作为前置的环节，能够消除不同采集单元的采样偏移。异构的数据被映射到统一的特征空间，从而完成信息的互补。信息的融合不再是简单的数据拼接，而是依托特征权重动态分配的机制来进行整合，从而减少人工筛选异常信息的负担。

区域电网所下辖的220 kV变电站PCS-9625母线保护曾经出现间歇性采样异常的情况，装置告警报文间断地弹出。常规巡检多次都未能锁定故障的点位。传统的诊断工具仅读取电流电压采样的数值，无法关联压板变位、温度记录等辅助信息。多模态融合的框架同步接入录波的文件、保护事件的日志以及柜内温感的数据。深度模型提取信号微弱畸变的特征，锁定二次回路端子接触不良的问题。故障处置的时长从原先平均4 h压缩到70 min。现场人员无须逐根线缆开展通断的测试。排查路径明显收窄[4]。

3.2 融合暂态量测与拓扑约束的故障区段精确定位算法

故障所产生的暂态分量能够承载稳态量难以提供的空间位置信息，线路的网络拓扑结构可当作硬性的约束条件来对候选的故障区间予以限制。单纯进行阻抗测距容易受到过渡电阻、分支线路的干扰而产生偏移，而将暂态行波信息和节点电气方程联合起来构建求解的模型，利用拓扑邻接关系对不符合电气连通规律的虚假故障点位进行过滤，通过算法持续迭代来缩小可疑区段的范围，从而弱化单一量测误差所造成的干扰。传统定位手段仅依靠单端的数据，空间约束信息没有得到充分利用，电网的分支线路较多，单纯依靠阻抗计算难以保证结果的可靠性。

110 kV的架空电缆混合线路发生了高阻接地的故障，过渡电阻达到了300 Ω，常规的测距结果偏离真实位置超过了3 000 m。调度端采集沿线多个站点的暂态电压行波数据，将其导入拓扑约束定位算法，把线路杆塔、电缆接头的位置信息写入拓扑矩阵，剔除存在逻辑冲突的候选位置，模型最终锁定电缆与架空线相衔接的杆塔附近的故障点。运维班组直接前往目标区段，在杆塔引流线处发现了绝缘破损的痕迹，故障巡线无须对全线进行徒步排查，人力投入明显缩减（见表1）。

3.3 基于时频联合分析与异常模式识别的扰动—故障区分机制

时频域进行同步解析能够弥补单一时域或者频域分析所存在的盲区，电网的扰动和真实故障在持续时长、能量分布方面存在固有的差异，负荷进行投切、电容器进行操作的暂态信号

能量集中在特定的频段，装置本体故障波形能量随着时间衰减并且伴有特征谐波分量。异常模式库持续吸纳长期运行所积累的各类信号样本，动态阈值随着负荷水平、季节工况进行自适应调整，避免固定阈值在工况变动的情况下失效。误告警会分散运维资源，扰动与故障边界的识别具有实际运维的价值。

城区110 kV变电站每日会出现十余次电容器分组投切的扰动，波形形态与轻微接地故障录波的相似度较高，系统频繁推送告警。时频联合分析工具同步提取信号的持续时长、小波能量分布这两类指标，模式识别模型依托历史样本建立区分的边界，过滤非故障类的暂态信号，装置误告警的数量下降了60%。运维人员无须反复赶赴现场对无效告警进行复核，值班精力更多地投向真实缺陷的处置。

表1　拓扑约束—暂态行波故障定位方法核心内容与工程验证

序号	核心维度	理论方法核心内容	工程案例验证情况
1	核心原理	以故障暂态分量承载空间位置信息，结合线路拓扑结构构建硬性约束，过滤虚假故障点位	110 kV 架空电缆混合线路高阻接地故障，过渡电阻达 300 Ω，常规测距偏差超 3 000 m
2	算法逻辑	联合暂态行波信息与节点电气方程构建求解模型，迭代缩小可疑故障区间，弱化单量测误差干扰	采集沿线多站暂态电压行波数据，导入拓扑约束算法，写入杆塔、接头位置信息，剔除逻辑冲突候选点
3	应用效果	弥补传统单端阻抗测距短板，解决分支线路、过渡电阻带来的定位偏差问题，提升故障点位判定可靠性	模型精准锁定电缆架空线衔接杆塔附近故障点，运维班组直达目标区段，无须全线徒步排查，人力投入大幅缩减

3.4 轻量化边缘智能与云端协同的在线诊断架构

算力资源需要按照诊断的环节进行分层部署，就地边缘单元承担起实时波形的预处理以及初步异常的筛查工作，云端平台担负复杂模型训练以及全区域故障数据汇总分析任务；大体积的原始波形数据不进行上传操作，仅推送筛选后的特征向量，这样做既能够控制网络带宽的占用情况，又可以将传输延迟压缩到可接受的区间范围。轻量化的模型裁剪掉冗余的参数，来适配保护装置处理器性能的上限，从而使得诊断流程不再完全依赖于云端的算力，就地出现的异常能够快速地做出响应，然而集中式的云端架构要是遇到网络中断的情况，就地的诊断能力就会丧失掉[5]。

电力公司在12座变电站进行边缘采集单元的部署工作，设备完成波形的降噪以及基础特征的提取工作，仅上传异常特征到区域云平台；云端持续地更新全局故障样本库并且将优化之后的轻量化模型下发至就地设备。一次线路出现瞬时异常的时候，边缘单元在30 ms之内完成初步的判定，确认故障特征之后才上传精简的数据到云端进行深度的溯源；网络出现短时波动的期间，就地的诊断功能正常运行，没有出现研判中断的情况。该架构兼顾实时响应以及全局数据长期挖掘的需求。

4　结束语

继电保护智能故障诊断需要解决特征模糊、算力约束、扰动混淆等方面的问题。本文对理论体系进行梳理，总结出4类技术难点，形成多模态融合以及边云协同的诊断方案，能够减少高阻接地、转换性故障定位的偏差，有效地将电网扰动与装置本体故障区分开来。后续将会扩充线路工况的样本，优化轻量化模型的适配能力，推动继电保护运维数字化的主动管控工作。

参考文献

[1]于洋,王同文,汪伟,等.数字化变电站继电保护装置故障智能检测识别方法研究[J].电子设计工程,2024,32(5):113-117.

[2]吴祉娴,刘涛,饶鑫.智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术研究[J].电子测试,2018(22):103-104.

[3]高兆丽.智能变电站过程层故障诊断与状态评估技术研究[D].济南:山东大学,2016.

[4]周圣栋,解蕾,宋若晨,等.基于BIM的变电站数字化建设管控平台构建及应用[J].中国电力,2019,52(5):142-147.

[5]马恩宁,张可,田嗥,等.数字化变电站测试技术应用与开发研究[J].电子设计工程,2019,27(19):29-32,37.

（本文编辑　曹　阳）

