配电网小电流接地系统单相故障定位方法

彭铁栓　王　雄

内蒙古电力 (集团) 有限责任公司薛家湾供电分公司　内蒙古　鄂尔多斯　010300

摘　要：针对配电网小电流接地系统单相接地故障电流微弱、高阻故障难以识别、传统方法易误判的问题，本文对比分析稳态法、暂态法与行波定位方法的适用局限，提出稳态与暂态电气量融合的改进故障定位算法。通过多维故障特征提取、分层区段判定，配套构建抗干扰与数据容错机制。搭建分层故障定位系统，完成硬件方案设计，并结合工程试点梳理现场问题，给出优化措施。研究结果表明，该算法能够适应复杂分支线路与大范围过渡电阻工况，有效提升单相接地故障区段定位可靠性。

关键词：配电网；小电流接地系统；单相故障；故障定位；电气量融合

引言：小电流接地模式广泛应用于国内中压配电网，单相接地故障具备故障电流小、隐蔽性强等特点。故障长期存续容易引发绝缘击穿、相间短路等事故，快速精准定位故障区段是保障供电稳定的关键手段。现有各类定位方法受消弧线圈补偿、过渡电阻、线路拓扑干扰较大，工程应用效果有限。为此，本文围绕单相接地故障特征开展分析，设计融合型故障定位算法，搭建配套监测系统，结合现场工况开展适用性研究，为配电网故障研判与运维处置提供技术参考。

1 小电流接地系统单相故障概述

1.1 小电流接地系统结构与工作原理

国内中压配电网普遍采用小电流接地方式，分为中性点不接地与经消弧线圈接地两类。系统由配电线路、配电变压器、消弧装置等设备构成，中性点不直接接地，接地故障电流水平较低。系统正常运行时三相电压对称，对地电容电流均匀分布。发生单相接地故障后，故障电流较小，保护装置不会瞬时跳闸，允许电网短时带故障运行，能够持续向用户供电，广泛适用于城乡各类配电区域。

1.2 单相接地故障产生机理与故障特征

线路绝缘老化、外物触碰、雷击、设备损坏等均会诱发单相接地故障，造成一相与大地连通，三相电压平衡关系被破坏。故障相电压下降，非故障相电压上升，极端条件下可达线电压。系统随之产生对地电容电流，消弧线圈接地系统还会生成补偿电流。该故障突出特点为故障电流幅值低，暂态过程短暂，稳态电气信号变化平缓，缺少明显短路冲击，故障隐蔽性强，依靠常规监测手段难以快速识别。

1.3 故障定位难点与影响因素分析

单相接地故障精准定位存在多重制约条件。故障电流微弱，容易被负荷电流、现场电磁噪声覆盖，不利于故障特征提取。配电网辐射分支多、线路长度差异大，对地电容分布不均衡，容易引发定位偏差。过渡电阻对故障信号影响显著，高阻接地工况会进一步削弱电气特征，降低定位效果。同时消弧线圈能够抵消部分故障信号，使得不同工况下故障特征区别明显，传统定位方法适用范围有限，经常发生误判、漏判[1]。

2 传统小电流接地系统单相故障定位方法

现阶段配电网应用的小电流接地系统单相故障定位方法，主要依托故障稳态电气量、暂态电气量与行波信号实现故障判别与区段定位，各类方法技术原理不同，适配工况与定位精度存在明显差异，具体分类如下：（1）基于稳态分量的故障定位方法。该方法以故障后系统稳态零序电压、零序电流为核心判据，通过采集线路稳态电气参数，对比故障前后电气量差值，判定故障区段。其核心逻辑为小电流系统单相接地故障后，三相电流失衡，产生稳定零序分量，依托零序电流幅值、相位差异区分故障线路与正常线路。该方法结构简单、硬件成本低，无需复杂数据运算，但缺陷较为突出，在消弧线圈补偿系统中，稳态故障电流会被大幅抵消，电气特征极弱，同时高阻接地工况下稳态信号衰减严重，极易出现判据失效、误判漏判的问题。（2）基于暂态分量的故障定位方法。故障发生瞬间会产生幅值大、特征显著的暂态零序电流与电压信号，该方法以暂态电气量为分析对象，通过提取故障瞬间高频特征量完成定位。相较于稳态法，暂态信号受消弧线圈补偿影响较小，不

受稳态补偿电流干扰，对低阻、常规接地故障适配性较好。但该方法依赖高精度、高采样率设备，暂态信号持续时间极短，易受线路噪声、负荷波动干扰，复杂分支线路中信号衰减、畸变会直接降低定位准确性。（3）行波故障定位方法。该方法利用故障产生的暂态行波在线路两端的传播时差计算故障点位，依托行波传播速度恒定的特性，实现精准测距。该方法定位精度高，不受过渡电阻、系统运行方式影响，但对采样设备精度与同步性要求极高，配电网分支线路多、线路曲折，行波反射、折射现象复杂，波头识别难度大，极易出现测距偏差，难以适配复杂配网拓扑场景[2]。

3 改进型单相故障定位算法设计

3.1 算法优化思路与设计目标

传统稳态法、暂态分析法、行波定位法在配网现场应用中存在明显局限。稳态分量易受消弧线圈补偿作用抑制，高阻接地工况下信号微弱；单一暂态分析易受噪声干扰；行波方法对采样同步性要求过高，难以适配多分支辐射型配电网。为此本文提出稳态与暂态电气量融合的改进定位思路，不再依靠单一类型电气量构建判据，充分利用故障全过程电气信息。

本次算法设定三项设计目标：（1）能够适应中性点不接地、经消弧线圈接地两种运行方式，拓宽过渡电阻适用范围；（2）提升复杂分支线路下区段识别能力，降低误判、漏判概率；（3）算法计算量适中，可在配电终端嵌入式装置中稳定运行，满足现场实时监测需求。

3.2 基于电气量融合的故障特征提取方法

单一电气量特征提取方式仅能反映故障局部信息，在高阻接地、消弧线圈深度补偿工况下，有效故障特征易被噪声与补偿电流掩盖，导致识别失效。为此本文结合故障稳态与暂态电气特性，构建多维融合特征提取体系，实现不同故障场景下的特征互补。（1）稳态零序特征提取。消弧线圈接地系统会大幅抑制稳态故障电流，仅依靠电流幅值无法有效识别故障线路。本文选取零序电压幅值、馈线零序电流相位关系及三相电压不平衡系数作为稳态核心特征，以电压、电流相位耦合判据替代传统幅值判据，规避补偿电流带来的干扰，稳定捕捉持续性单相接地故障的稳态特征。（2）故障暂态特征提取。故障瞬间产生的高频暂态信号不受消弧线圈电感约束，特征辨识度更高。通过小波分解对故障初始短时间窗口内的零序电压、电流信号进行多层细化，提取高频能量、波形突变时刻与暂态极性三类核心指标，依托暂态极性区分故障与健全馈线，以高频能量表征故障严重程度，弥补高阻故障稳态特征微弱的缺陷。（3）多维特征融合处理。稳态与暂态电气量数值量级差异较大，直接融合易出现权重失衡。对所有特征指标进行归一化处理统一量纲，构建融合特征向量。低阻故障以暂态突变特征为主要判别依据，高阻故障依托稳态持续特征校核验证，实现全工况下故障特征的有效提取。

3.3 故障区段判定与精准定位算法构建

配电网多为辐射状多分支拓扑，仅判别故障馈线无法满足运维精准定位需求。本文采用由粗到精的分层判定策略，结合线路拓扑特性构建区段定位算法，有效提升复杂线路的定位精度。（1）故障馈线粗判。设置母线零序电压动态阈值，电压持续越限时判定系统发生单相接地故障。横向比对各馈线监测单元的融合特征向量，故障支路暂态能量特征显著突出，健全支路特征微弱，据此快速筛选故障馈线，排除正常线路干扰。（2）相邻测点区段判别。依托线路分布式监测单元，比对相邻测点的故障特征差异。故障点上游存在明显暂态零序信号，下游信号大幅衰减、特征畸变，依据上下游特征突变规律，精准锁定故障所处线路区段，适配配网分段开关、故障指示器的实际布设工况，工程落地性强。（3）定位结果修正优化。线路分布电容、导线阻抗及分支负荷会造成信号传输畸变，产生定位误差。结合现场实测线路参数，对初步定位结果进行校正，引入分支衰减系数区分主干与分支故障，抵消分支分流、参数不均带来的判别偏差，进一步提升定位准确性。

3.4 抗干扰优化策略与算法容错性设计

配电网现场工况复杂，电磁干扰、负荷投切、设备采样异常等扰动频发，易导致算法误判、定位抖动。针对上述问题，本文设计多重抗干扰与容错机制，保障算法稳定运行。（1）自适应滤波预处理。摒弃固定参数滤波模式，根据实时采样窗口的噪声强度动态调整滤波阈值，在有效滤除工频谐波、电磁脉冲干扰的同时，完整保留故障微弱高频暂态分量，避免过度滤波造成特征丢失。（2）真假故障判别机制。负荷、电容器投切等扰动仅产生短时零序波动，无稳态电压偏移；真实接地故障同时具备暂态突变与稳态持续越限特征。通过设置时空联合判据，双重校验故障特征，有效抑制非故障扰动引发的误告警。（3）数据容错与防抖动设计。引入多测点交叉校验机制，自动识别并剔除传感器漂移、通信异常导致的失真数据，通过周边有效测点数据补全研判依据。同时增设多周期连续判定逻辑，单次信号异常不输出结果，多次稳定触发故障判据后再确认定位结果，杜绝瞬时波动导致的定位抖动问题[3]。

4 配电网小电流接地系统单相故障定位系统工程应用与优化

4.1 故障定位系统整体架构设计

结合配电网现场运行工况与故障定位实际需求，本次设计的小电流接地故障定位系统采用分层模块化架构，整体结构贴合现有配电自动化系统部署模式，具备良好的兼容性与可扩展性。系统整体分为数据采集层、数据传输层、算法分析层与应用展示层四个层级，各层级独立运行、协同配合，适配现场分布式监测、集中式研判的工作模式。（1）数据采集层。以现场配电终端、故障监测单元为核心，负责实时采集各馈线零序电压、零序电流、三相电压等核心电气数据，同步记录线路运行状态，为故障研判提供原始数据支撑。（2）数据传输层。采用电力专用通信网络，依托光纤、4G 电力专网实现现场终端与后台主机的数据交互，保障采样数据传输的实时性与稳定性。（3）算法分析层。搭载本文改进型故障定位算法，完成数据预处理、故障特征提取、故障区段判定与定位结果修正，是系统的核心功能模块。（4）应用展示层。依托配电运维平台，实现故障位置可视化展示、故障信息记录、告警信息推送，满足运维人员现场巡检作业需求。

4.2 硬件设备选型与参数配置

硬件设备的性能与参数配置直接决定故障定位系统的现场运行精度，结合小电流接地故障信号微弱、易受干扰的特点，针对性完成设备选型与参数标定，适配复杂配网运行场景。（1）故障监测终端。选用高精度配电馈线终端装置，电压电流采样精度不低于 0.2 级，采样频率设置为 10kHz，可完整捕捉故障瞬时暂态微弱信号，满足算法特征提取的数据精度要求。终端支持就地数据存储与远程上传，可应对短时通信波动场景。（2）信号传感设备。选用抗干扰型零序电流、电压互感器，适配中低压配电网运行环境，降低电磁干扰对信号采集的影响，避免信号畸变、数据失真问题。（3）核心工控设备。采用工业级主机，搭载嵌入式运行系统，可稳定运行改进型定位算法，满足实时数据运算、故障快速研判的算力需求，适配户外、配电室等复杂安装环境。

4.3 实际应用中存在的问题与优化方案

结合现场试点应用情况，当前小电流接地故障定位系统在复杂拓扑、恶劣工况下仍存在部分问题，结合工程实际制定针对性优化方案，提升系统实用性与稳定性。（1）存在问题。多分支线路场景下，线路电容分流会造成信号衰减不均，导致部分区段定位精度下降；户外终端长期运行易出现采样零点漂移，引发小幅数据偏差；老旧线路参数不精准，造成算法定位结果存在固定误差。（2）优化方案。针对分支线路干扰问题，增设分支信号衰减修正系数，优化算法区段判别逻辑；针对设备采样漂移问题，增设终端定时自校准功能，定期完成采样零点校正；针对线路参数偏差问题，依托现场实测数据更新线路阻抗、电容参数，修正算法运算模型，有效提升系统现场适配能力与定位准确性[4]。

结束语：本文梳理了小电流接地系统单相接地故障特征与传统定位方法短板，构建稳态、暂态电气量融合的改进定位算法，完善故障区段判别逻辑与多重抗干扰策略。完成故障定位系统架构设计与硬件配置，并针对现场应用难点提出优化方案。研究证实融合特征算法可改善高阻接地、多分支线路下的定位效果。

参考文献

[1] 宇梦. 配电网小电流接地系统单相故障定位方法 [J]. 光源与照明,2025,(10):112-114.

[2] 马荣强. 配电网小电流接地系统单相故障定位方法分析 [J]. 电力设备管理,2024,(23):36-38.

[3] 张立, 杨鹏博. 配电网小电流接地系统单相故障定位方法研究 [J]. 光源与照明,2024,(11):96-98.

[4] 周凯. 配电网小电流接地系统单相故障定位方法研究 [J]. 电力设备管理,2023,(23):5-7.