

输电线路故障定位技术的精确性分析与优化

魏瑞鹏¹ 吴佳¹ 曹轩²

1 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司

2 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6065

[摘要] 针对输电线路故障定位精确性问题,采用参数建模以及误差分析方法,系统研究了测量系统、定位算法以及外部环境等因素对故障定位精确度的影响规律,通过建立动态误差补偿模型,优化了测量装置采样,算法融合以及参数修正等关键技术。研究表明,采用改进的混合定位算法结合自适应参数补偿技术,系统整体测量精度提升25%以上,故障定位精确度较优化前提高40%。实验验证结果表明,优化后的故障定位技术在复杂线路条件下定位误差控制在 $\pm 0.5\%$ 范围内,系统可靠性显著提升,维护工作量减少30%,为提高输电线路故障定位精确性提供了可靠的技术方案。

[关键词] 故障定位精确性; 误差分析; 定位算法; 参数补偿; 精度优化

中图分类号: O241.1 **文献标识码:** A

Accuracy analysis and optimization of transmission line fault location technology

Ruipeng Wei¹ Jia Wu¹ Xuan Cao²

1 Xingtai Power Supply Branch of State Grid Hebei Power Co., LTD.

2 Xiongan New Area Power Supply Company of State Grid Hebei Power Co., LTD.

[Abstract] In order to solve the problem of transmission line fault location accuracy, parameter modeling and error analysis method are used to systematically study the influence of measurement system, positioning algorithm and external environment factors on fault location accuracy. By establishing a dynamic error compensation model, key technologies such as measurement device sampling, algorithm fusion and parameter correction are optimized. The results show that by using the improved hybrid positioning algorithm combined with adaptive parameter compensation technology, the overall measurement accuracy of the system is increased by more than 25%, and the fault location accuracy is increased by 40%. The experimental results show that the optimized fault location technology can control the positioning error within $\pm 0.5\%$ under the condition of complex lines, significantly improve the system reliability, and reduce the maintenance workload by 30%, which provides a reliable technical solution for improving the fault location accuracy of transmission lines.

[Key words] fault location accuracy; Error analysis; Positioning algorithm; Parameter compensation; Precision optimization

引言

输电线路故障定位精确性直接关系到故障快速隔离以及电力系统可靠运行,当前,故障定位技术在复杂地形,恶劣天气等条件下普遍存在定位精度不高的问题,严重影响故障处理效率。提高故障定位精确度已成为输电线路运维工作的重要课题,精确性分析与优化研究对于完善故障定位技术,提升定位可靠性具有重要意义,针对影响定位精确度的各类因素进行系统分析,优化定位算法以及补偿技术,是提高故障定位精确性的关键。

1 故障定位精确性影响因素分析

1.1 定位精确度评价指标。故障定位精确度评价包含相对定

位误差、绝对定位误差以及定位可信度三个方面^[1]。其中相对定位误差反映故障点定位结果与实际位置间的距离与线路全长比值,该指标消除了线路长度差异影响;绝对定位误差直接表征定位结果偏离实际故障点的物理距离,为工程实践提供直观参考;定位可信度通过统计学方法分析多次定位结果的方差,建立可信度评价模型,在实际应用中,相对定位误差要求控制在 $\pm 1\%$ 以内,特高压线路需达到 $\pm 0.5\%$ 精度,定位可信度采用95%置信区间判定,并结合模糊数学建立评价体系。

1.2 误差来源分析。输电线路故障定位误差涉及测量系统,定位算法以及外部环境三大层面。测量系统误差源于电压互感器,

电流互感器的变比误差与角度误差, 以及数据采集装置的采样以及量化误差; 定位算法误差来自模型简化以及参数估计偏差, 行波法受波头识别精度以及传播速度影响, 阻抗法受负荷电流以及分布电容干扰; 外部环境误差包括线路不均匀性, 气候条件以及接地电阻波动, 山地地形引起测距误差, 极端天气改变线路参数, 温度变化导致分布参数波动, 显著影响行波传播速度以及阻抗测量。

1. 3影响因素定量研究。建立数学模型对故障定位精确性影响因素进行定量分析, 采用正交试验方法研究各影响因素的敏感度, 通过控制变量法分别量化测量装置采样频率, 行波传播速度误差, 线路参数偏差等因素对定位精度的影响程度^[2]。研究结果显示, 采样频率每提高1MHz, 行波定位方法的相对误差降低0.02%, 线路参数偏差对阻抗定位法影响显著, 零序补偿系数每变化1%引起0.3%的定位误差, 通过建立多变量回归模型, 分析各影响因素的交互作用, 得到故障类型, 接地电阻, 负荷波动等因素与定位精度之间的定量关系。气候条件对定位精度的影响表现为季节性规律, 温度每升高10℃导致线路电感值变化0.4%, 引起0.15%的定位误差, 湿度变化对定位精度的影响则相对较小。

2 定位精确度误差补偿方法

2. 1测量误差补偿。测量误差补偿技术针对电压互感器, 电流互感器以及数据采集装置三个关键环节展开研究, 电压互感器以及电流互感器在不同负载状态下表现出明显的非线性特性。通过建立动态误差补偿模型对测量数据进行实时校正, 对于电压互感器, 根据GB/Z17215.669-2022标准, 引入比值误差修正系数 ε 以及角度误差修正系数 δ , 构建误差补偿方程:

$$U_m = K_r(1 + \varepsilon)U_r \angle(\theta_r + \delta)$$

式中: U_m 为测量电压值, U_r 为实际电压值, K_r 为额定变比值, θ_r 为相位角, 电流互感器补偿采用分段线性化方法, 建立电流互感器二次侧输出特性曲线:

$$I_m = K_i(1 + \mu)I_r \angle(\varphi_r + \lambda)$$

式中: I_m 为测量电流值, I_r 为实际电流值, K_i 为额定变比值, μ 以及 λ 分别为比值以及角度修正系数, 数据采集装置误差补偿引入动态标定技术。通过高精度标准源建立采样误差修正曲线, 根据采样频率, 工作温度以及信号幅值的变化, 实时调整补偿参数^[3]。实验数据表明, 采用完整的测量误差补偿体系, 系统整体测量精度提升25%以上, 为故障定位精确性奠定基础。

2. 2算法误差优化。定位算法误差优化采用自适应混合定位策略, 将行波法以及阻抗法的优势有机结合, 建立多算法融合模型, 行波定位引入连续小波变换进行波头识别, 通过构建最优母小波函数提高行波到达时间的识别精度, 根据Bewley理论, 单端行波定位方程可表示为:

$$x = \frac{v(t_2 - t_1)}{2}$$

式中: x 为故障点距离, v 为传播速度, t_1 以及 t_2 分别为首波以及反射波到达时间, 阻抗定位则基于分布参数模型, 建立精确故障方程:

$$Z_f = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_0 \sinh(\gamma x)$$

式中: Z_f 为故障点阻抗, $V(x)$ 以及 $I(x)$ 分别为故障点电压与电流, Z_0 为特性阻抗, γ 为传播常数。通过引入自适应卡尔曼滤波算法对测量数据进行预处理, 有效抑制了负荷波动与分布电容的干扰, 算法融合部分采用D-S证据理论, 根据不同算法在各种故障类型下的可信度, 动态调整权重系数^[4]。实验验证表明, 混合定位算法在单相接地, 两相短路等多种故障类型下均表现出良好的适应性, 定位精确度较单一算法提升40%。

2. 3参数误差修正。参数误差修正围绕线路参数辨识与环境因素补偿展开系统研究, 基于分布参数理论, 建立线路参数温度动态修正模型:

$$R(T) = R_{20}[1 + \alpha(T - 20)]$$

$$L(T) = L_{20}[1 + \beta(T - 20)]$$

$$C(T) = C_{20}[1 + \eta(T - 20)]$$

式中: $R(T)$, $L(T)$ 与 $C(T)$ 分别为温度 T 下的电阻, 电感与电容值, R_{20} , L_{20} 与 C_{20} 为20℃时的标称值, α , β 与 η 为温度系数。通过广域测量系统(WAMS)采集的同步相量数据对线路参数进行在线辨识, 实现参数实时校正, 环境因素补偿采用自适应参数估计技术, 建立气温, 湿度, 覆冰等环境因素与线路参数的映射关系, 针对复杂地形条件, 引入地形修正系数 k :

$$L_c = L_0(1 + \frac{k \cdot h}{d})$$

式中: L_c 为修正后电感值, L_0 为平地电感值, h 为相邻杆塔高差, d 为杆塔水平距离, 经过长期运行验证, 参数误差修正技术将定位误差控制在 $\pm 0.5\%$ 范围内, 满足特高压输电线路的运行要求。

3 精确性优化实验验证

3. 1精确性测试方案。精确性测试采用仿真实验与实际运行相结合的方式进行全面验证, 通过PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建500kV双回路输电线路实验模型。线路全长320km, 分为山地, 平原与丘陵三种地形段, 设置金属性单相接地, 相间短路, 两相接地等多种故障类型。故障点分别选取在0%, 25%, 50%, 75%与100%等特征位置, 实验采用相电压与相电流作为基本测量量, 采样频率设置为200kHz, 数据窗口长度为10ms。在实际运行测试中, 选取华中电网某500kV输电线路作为测试对象, 在正常运行与检修工况下分别进行故障模拟试验, 测试方案综合考虑了天气条件, 负荷状态与系统运行方式的影响, 建立了完整的实验数据库, 特别地, 针对山地线路设计了杆塔高差补偿测试, 验证了地形因素对定位精确性的影响规律。

3. 2误差补偿效果验证。误差补偿效果验证重点关注测量误差补偿, 算法误差优化与参数误差修正三个层面的改进效果。测量误差补偿验证采用0.2级标准源, 对电压互感器与电流互感器在0.2倍至2倍额定负载下进行动态校准, 验证补偿模型在各工况的有效性, 如表1所示。补偿后的测量装置在全量程范围内误

差均控制在0.2%以内,达到特高压线路运行要求,算法误差优化验证采用对比分析方法,分别测试单一行波法,改进行波法,传统阻抗法与混合定位算法在各类故障下的定位精度。参数误差修正效果验证通过在线监测系统采集线路运行数据,实时跟踪参数变化规律,对比修正前后的定位结果,验证试验分别在夏季(35℃±5℃),冬季(-10℃±5℃)与覆冰工况进行,重点测试了极端环境对定位精度的影响,实验数据采用数理统计方法处理,通过建立误差分布模型,定量评估补偿效果。

表1 测量装置误差补偿效果

负载比(%)	补偿前误差(%)	补偿后误差(%)	改善率(%)
20	0.52	0.15	71.2
50	0.48	0.12	75
100	0.45	0.1	77.8
200	0.58	0.18	69

3.3优化结果分析。优化结果分析需要建立多维度评价体系,从定位精确度,算法稳定性与环境适应性三个层面进行系统评估。针对不同故障类型的定位结果,计算相对误差、绝对误差与标准差,采用95%置信区间评估定位精确度的提升效果,表2记录了各类故障条件下优化前后的定位误差对比,显示优化后的故障定位技术实现了显著提升。定位稳定性评价采用重复性试验方法,连续进行100次定位实验,验证算法的一致性水平,环境适应性评估重点分析了不同地形,气候条件下的定位效果,验证了优化方案的工程实用性。实验结果表明,优化后的故障定位技术在复杂工况下表现出优异的性能,定位误差控制在±0.5%范围内,较优化前提升了40%,进一步分析发现,混合定位算法在温度变化±30℃范围内保持了稳定的定位精度,系统可靠性显著提高。

表2 不同故障类型下定位精确度对比

故障类型	优化前误差(%)	优化后误差(%)	改善程度(%)
单相接地	1.25	0.45	64
两相短路	0.95	0.38	60
两相接地	1.15	0.42	63.5
三相短路	0.85	0.35	58.8

4 精确性提升技术应用

4.1精确性优化策略。精确性优化策略围绕测量装置改进,定位算法优化与参数动态修正三个关键环节展开。测量装置改进方面,采用高精度电压互感器与电流互感器替代传统测量元件,将采样频率提升至200kHz,实现故障暂态过程的精确捕捉,装置选型时重点考虑了测量设备在极端温度(-40℃~85℃)下的稳定性,配置了温度补偿模块,确保测量精度;定位算法优化采用自适应混合定位策略,根据故障特征实时切换最优定位方法,针对复杂地形输电线路,引入多基准点定位技术,通过就地测量装置构建分段定位体系,将长距离定位问题转化为多个短距离精

确定位;参数动态修正建立了基于广域测量系统的在线参数辨识模型,实现了故障定位参数的实时校正,提高了系统适应性。

4.2工程实施方案。工程实施采用分步实施,分区域推广的策略,制定了完整的技术改造方案,实施过程分为测量系统改造,算法升级与系统联调三个阶段。测量系统改造阶段重点完成高精度互感器更换,采样装置升级与通信系统优化,同时完善测控系统接口规范;算法升级阶段对故障测距装置软件进行更新,植入改进的混合定位算法与参数动态修正模块,完成定位精度验证测试;系统联调阶段进行全系统功能测试,验证各项技术指标达标情况,工程实施过程中采用旁路切换技术,确保改造期间线路正常运行,针对山区线路,增设了分段测距装置,强化了复杂地形条件下的定位能力,实施方案同时考虑了与现有继电保护装置的配合,制定了完整的定值整定原则。

4.3应用效果评估。应用效果评估采用定量与定性相结合的方式,建立了系统化的评价机制,定量评估重点关注故障定位精确度指标。通过统计分析一年内发生的实际故障案例,计算定位误差均值与离散程度,评估数据显示,改进后的故障定位系统在各类故障下定位误差均控制在±0.5%以内,特别是在复杂地形条件下表现出优异的定位性能。定性评估主要从系统可靠性,维护便利性与经济性三个方面进行,系统可靠性通过记录装置运行状态与故障定位成功率进行评价,运行数据表明系统稳定性显著提升,维护便利性评估重点考察了设备巡检与参数整定的工作量变化,结果显示日常维护工作量减少30%,经济性评估则从设备投资与运行维护成本两个层面进行分析,投资回收期约为3年。

5 结语

通过对输电线路故障定位技术精确性的系统研究,揭示了影响定位精确度的关键因素,建立了完整的误差分析与补偿体系。研究表明,通过测量误差补偿,算法优化与参数修正等多维度优化措施,能够显著提升故障定位精确度。实验验证结果证实了所提优化方法的有效性,为提高输电线路故障定位精确性提供了理论依据与技术支撑,该研究对于完善故障定位技术体系,提高电网运行可靠性具有重要的工程应用价值。

[参考文献]

[1]周翔.基于分布式电流感应技术的非同质输电线路故障定位[J].自动化与仪器仪表,2024,(11):284-287.
[2]徐健乔.输电线路故障定位与监测技术分析[J].集成电路应用,2024,41(11):286-287.
[3]纪磊,李大伟,姚叶.输电线路中的故障定位技术分析[J].集成电路应用,2024,41(10):168-169.
[4]吴健超,黄健.基于人工智能的输电线路故障定位技术研究[J].现代制造技术与装备,2024,(S2):1-3+22.

作者简介:

魏瑞鹏(1990--),男,汉族,河北省邢台市人,硕士研究生,工程师,研究方向:电力系统安全及管理。