

智能运维导向的线路故障定位系统设计与工程实践

陈卫

杭州众工电力科技有限公司 310051

【摘要】随着现代配电网规模持续扩大以及新能源以高比例接入电网,传统故障定位方法在响应速度与定位精度方面遭遇了前所未有的严峻挑战。传统方法在面对复杂多变的电网运行环境和故障特征时,难以快速、精准地确定故障位置,极大地影响了电网的可靠供电和运维效率。为有效解决这一问题,本文提出一种融合多源信息感知与机器学习算法的智能故障定位系统。该系统创新性地构建了“端-边-云”协同架构,并在华南某城市电网完成了工程验证。系统集成行了波检测、阻抗分析、气象关联三重定位机制,通过 LightGBM 算法实现故障类型多维度辨识。实际运行数据表明,故障定位时间由原来的 12 分钟大幅缩短至 47 秒,定位精度提升至 98.7%,运维成本降低了 32.5%。这一研究成果为现代配电网智能化运维提供了切实可行、可复用的技术方案,对提升配电网的运行效率和可靠性具有重要意义。

【关键词】智能运维;故障定位;多源信息融合;机器学习;配电网

Design and engineering practice of line fault location system oriented by intelligent operation and maintenance

Chen Wei

Hangzhou Zhonggong Electric Power Technology Co., LTD 310051

【Abstract】With the continuous expansion of modern distribution networks and the high proportion of new energy sources integrated into the grid, traditional fault location methods face unprecedented challenges in response speed and positioning accuracy. Traditional methods struggle to quickly and accurately determine fault locations when dealing with complex and variable grid operating environments and fault characteristics, significantly impacting the reliable power supply and maintenance efficiency of the grid. To effectively address this issue, this paper proposes an intelligent fault location system that integrates multi-source information perception and machine learning algorithms. The system innovatively constructs a "end-edge-cloud" collaborative architecture and has been validated through engineering implementation in a city's power grid in South China. The system integrates three positioning mechanisms: traveling wave detection, impedance analysis, and meteorological correlation, achieving multi-dimensional fault type identification through the LightGBM algorithm. Actual operational data shows that the fault location time has been significantly reduced from 12 minutes to 47 seconds, with positioning accuracy improving to 98.7% and maintenance costs decreasing by 32.5%. This research provides a practical and reusable technical solution for the intelligent operation and maintenance of modern distribution networks, which is of great significance for enhancing the operational efficiency and reliability of distribution networks.

【Key words】intelligent operation and maintenance; fault location; multi-source information fusion; machine learning; distribution network

1. 引言

1.1 研究背景

近年来,我国配电网建设取得了显著进展。截至 2023 年,我国 10kV 配网线路总长度已突破 500 万公里,如此庞大的电网规模给故障定位带来了巨大困难。与此同时,故障年均发生率达 2.3 次/百公里,这一数据表明配电网故障发生频率较高,对电网的安全稳定运行构成了严重威胁。

以某省会城市供电公司的统计数据为例,进一步揭示了传统故障定位方法的弊端。人工巡检定位耗时占故障修复总时长的 68%,这意味着大量的时间和人力资源被耗费在故障定位环节,导致故障修复周期延长,给用户用电带来了极大不便。分布式电源接入后,故障电流特征复杂度增加了

41%,使得传统基于单一电气量特征的故障定位方法难以准确判断故障类型和位置。现有故障指示器误报率高达 27%,这不仅增加了运维人员的工作负担,还可能导致对真实故障的忽视,进一步加剧了电网故障的影响。

1.2 技术瓶颈分析

传统故障定位方法存在三大显著缺陷。首先是单维度检测局限,传统方法主要依赖单一电气量检测,然而在复杂的电网环境中,谐波干扰普遍存在,单一电气量检测极易受到谐波干扰的影响,导致检测结果不准确,无法真实反映故障特征。

其次是信息孤岛问题,SCADA(数据采集与监视控制系统)、PMU(同步相量测量单元)、气象系统等数据未有效融合。SCADA 系统主要用于实时监测电网的运行状态,PMU

系统能够提供高精度的同步相量数据,气象系统则提供了影响电网运行的环境信息。但这些数据分散在各个系统中,缺乏有效的整合和利用,无法为故障定位提供全面、准确的信息支持。

最后是自适应能力缺失,随着电网的不断发展,网架结构频繁变化,而传统故障定位方法无法动态适应这些变化。当电网结构发生改变时,原有的故障定位模型和参数可能不再适用,导致定位精度下降甚至失效。

1.3 创新方向

针对传统方法的不足,本文提出以下创新方向。首先构建多物理量协同感知的智能终端,该终端能够同时采集多种物理量信息,如电气量、温度、湿度等,通过多物理量的协同感知,更全面地获取电网运行状态和故障特征,提高故障定位的准确性。

其次开发基于机器学习的故障特征解耦算法,利用机器学习算法强大的数据处理和分析能力,对复杂的故障特征进行解耦和提取,准确识别故障类型和位置。机器学习算法能够从大量的历史数据中学习故障特征模式,不断优化故障定位模型,提高系统的自适应能力。

最后建立数字孪生驱动的定位效果验证平台,通过数字孪生技术构建电网的虚拟模型,将实际电网的运行数据映射到虚拟模型中,在虚拟环境中对故障定位算法和系统进行验证和优化。数字孪生平台能够模拟各种故障场景和电网运行条件,为故障定位系统的研发和改进提供有力支持。

2. 系统架构设计

2.1 总体框架

系统采用分层分布式架构,这种架构具有良好的可扩展性和灵活性,能够适应不同规模和复杂度的电网需求。系统分为终端层、边缘层和平台层,各层功能模块和响应时间如下:

终端层主要负责高频采样和边缘计算,能够对电网运行状态进行实时监测和数据采集,并将采集到的数据进行初步处理。其响应时间 $\leq 10\text{ms}$,能够快速响应电网故障,为后续的故障定位提供及时的数据支持。

边缘层承担区域故障研判的任务,对终端层上传的数据进行进一步分析和处理,结合本地算法和模型,初步判断故障可能发生的区域。其响应时间为 $1-5\text{s}$,能够在较短时间内缩小故障搜索范围,提高故障定位效率。

平台层进行全网拓扑分析和策略优化,综合考虑整个电网的运行状态和故障信息,通过复杂的算法和模型,精确确定故障位置,并制定相应的运维策略。其响应时间为 $30-60\text{s}$,能够为运维人员提供准确的故障定位结果和科学的运维建议。

2.2 硬件组成

智能传感终端是系统的前端设备,集成了高频电流互感器、电压传感器、温度探头等多种传感器。高频电流互感

器能够精确测量电网中的高频电流信号,为行波检测提供数据支持;电压传感器实时监测电网电压变化,反映电网的运行状态;温度探头则用于检测设备温度,预防因过热引发的故障。

边缘计算网关搭载国产化 AI 芯片,算力 $\geq 8\text{TOPS}$,具备强大的数据处理和计算能力。它能够对终端层上传的数据进行快速处理和分析,实现区域故障的初步研判,并将结果上传至平台层。同时,边缘计算网关还能够本地存储数据,减少对网络带宽的依赖,提高系统的可靠性和实时性。

云控平台部署容器化微服务架构,支持万级终端接入。容器化微服务架构具有高可扩展性、高可用性和易于维护等优点,能够根据系统需求灵活调整资源分配,确保系统能够稳定运行。通过云控平台,运维人员可以实时监控电网运行状态,远程控制智能终端,获取故障定位结果,并进行运维管理。

3. 关键技术实现

3.1 多源数据融合

为提高故障定位的准确性和可靠性,系统构建了四维特征矩阵。电气量特征包括暂态行波幅值、波头陡度等,暂态行波包含了丰富的故障信息,通过分析行波的幅值和波头陡度,可以初步判断故障的类型和距离。拓扑特征考虑上下游节点阻抗关系,电网的拓扑结构对故障电流的分布和传播有重要影响,通过分析上下游节点阻抗关系,能够更准确地确定故障位置。环境特征涵盖温湿度、风速、雷击概率等,环境因素会影响电网设备的性能和故障发生的概率,将环境特征纳入考虑范围,能够提高系统对复杂环境的适应能力。历史特征包括同类故障处置记录,通过学习历史故障的处理经验,系统能够不断优化故障定位算法,提高故障处理的效率和质量。

3.2 智能诊断算法

系统开发了两阶段诊断模型。初筛阶段采用随机森林算法实现故障类型粗分类,随机森林算法具有较高的准确性和鲁棒性,能够快速对故障类型进行初步判断,筛选出可能的故障类型,缩小故障搜索范围。精确定位阶段应用改进 DBSCAN 算法聚类故障候选点,改进 DBSCAN 算法能够根据数据的密度特征对故障候选点进行聚类分析,去除噪声点和异常点,精确确定故障位置。通过两阶段诊断模型的协同工作,系统能够在保证定位精度的同时,提高故障定位的效率。

4. 工程实施路径

4.1 试点项目概况

在华南某城市 A + 类供电区域部署了该智能运维导向的线路故障定位系统。该区域覆盖 28 条 10kV 线路,总长 136 公里,是城市供电的重要区域,对供电可靠性要求

较高。为确保系统的有效运行，安装了 582 套智能终端，实现了对电网的全面监测。改造周期为 2022.03 - 2023.09，在改造过程中，充分考虑了系统的兼容性和可扩展性，确保系统能够与现有电网设备无缝对接。

4.2 实施难点与对策

在工程实施过程中，遇到了数据同步、模型迁移和安全防护等难点问题。针对数据同步问题，采用 5G 切片网络 + 北斗授时技术。5G 切片网络能够为数据传输提供低时延、高可靠的通信保障，确保数据能够及时、准确地传输到各个层级。北斗授时技术则能够为系统提供高精度的时钟同步，保证各终端和设备的时间一致性，避免因时间误差导致的故障定位不准确。

对于模型迁移问题，开发联邦学习框架实现跨区域知识共享。联邦学习允许各个区域在不共享原始数据的情况下，共同训练和优化故障定位模型。通过联邦学习框架，不同区域的系统可以相互学习、相互借鉴，提高模型的泛化能力和适应性，实现跨区域的知识共享和协同发展。

在安全防护方面，构建国密算法加密传输通道。国密算法具有较高的安全性和可靠性，能够对数据传输过程进行加密处理，防止数据泄露和篡改。通过构建国密算法加密传输通道，确保了系统数据的安全性和保密性，保障了电网的安全稳定运行。

5.应用效果分析

5.1 性能测试数据

指标	传统方法	本系统	提升幅度
定位时间 (min)	12.3	0.78	93.7%
定位误差 (m)	± 150	± 18	88%
多电源场景准确率	72.5%	96.8%	33.6%

5.2 典型故障处置案例

案例 1：树障引发单相接地故障。系统在 0.6 秒内捕获异常行波信号，通过快速分析行波特征，初步判断可能发生了故障。随后结合气象台雷电定位数据，排除雷击可能，进一步缩小故障范围。最终自动派发工单至距离故障点最近的巡检班组，巡检人员能够迅速到达现场进行处理，大大缩短了故障修复时间。

案例 2：分布式光伏反送电导致误判。在分布式光伏接入的情况下，故障电流特征变得更加复杂，容易出现误判。本系统通过逆变器运行状态数据修正故障特征，准确识别真实故障点与电源反送电伪信号，避免了误判和不必要的运维操作。

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]郑智银.10kV 配电线路故障定位与智能化监测技术研究[J].电气技术与经济, 2024(10): 120-121, 125.
- [3]张萌.配电线路故障精确定位系统的应用[J].电力设备管理, 2024(13): 32-34.
- [4]吴伟.配电线路故障检测与定位技术的应用研究[J].通信电源技术, 2024, 41(4): 240-242. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2024.04.078.

作，提高了故障处理的准确性和效率。

6.经济性评估

6.1 成本构成分析

对该项目的成本构成进行分析，智能终端单位成本为 0.38 万元，占总成本的 45%，是项目成本的主要组成部分。通信网络改造单位成本为 0.12 万元，占比 15%，用于保障数据传输的稳定性和可靠性。软件平台开发单位成本为 0.25 万元，占比 30%，是实现系统功能和智能算法的关键。人员培训单位成本为 0.05 万元，占比 10%，确保运维人员能够熟练操作和维护系统。

6.2 综合效益

从综合效益来看，直接效益方面，年均减少故障损失电量 217 万 kWh，降低了电网的停电损失和供电成本。间接效益方面，客户平均停电时间缩短 76%，提高了供电可靠性，增强了客户满意度。社会效益方面，提升供电可靠性至 99.991%，为社会经济的稳定发展提供了有力保障，具有良好的社会形象和经济效益。

7.结论与展望

7.1 主要结论

通过实际工程应用和数据验证，多源信息融合使复杂故障定位准确率突破 96%，显著提高了故障定位的可靠性。边缘智能计算实现了秒级故障研判响应，大大缩短了故障处理时间，提高了电网的运行效率。系统投资回收期小于 3 年，具备较高的经济效益和推广价值，能够在不同地区和不同规模的配电网中得到广泛应用。

7.2 未来方向

未来，系统将融合数字孪生技术构建虚拟仿真训练环境，通过数字孪生平台模拟各种故障场景和电网运行条件，对运维人员进行培训和演练，提高运维人员的应急处理能力和技能水平。开发适应新型电力电子设备的特征提取算法，随着新型电力电子设备在电网中的广泛应用，故障特征也发生了变化，需要开发新的算法来准确提取故障特征，提高故障定位的准确性。探索与无人机巡检系统的协同作业模式，无人机巡检系统能够快速到达故障现场，获取现场图像和数据，与智能运维导向的线路故障定位系统相结合，实现故障的快速定位和精准处理，进一步提高电网的运维效率和可靠性。