配电线路故障定位与快速抢修技术研究

潘雪峰　刘　枫

中国石油集团电能有限公司　黑龙江　大庆　163000

摘　要：配电线路故障定位与快速抢修是提升配电网供电可靠性的核心课题。本文系统分析了永久性、瞬时性、间歇性三类典型故障的电气特征，深入研究了行波法、阻抗法、矩阵法及智能算法四类故障定位技术的原理与适用性，并围绕抢修流程优化、移动式模块化装备、无人机与机器人辅助作业、最小停电范围恢复及抢修决策支持系统展开论述。在此基础上，构建了定位-抢修一体化协同优化框架，并从供电可靠率、停电时长、运维成本等维度评估了协同优化效益，为配电网智能化运维提供了系统性技术参考。

关键词：配电线路；故障定位；行波测距；馈线自动化；快速抢修

引言：配电网作为电力系统“最后一公里”，其运行可靠性直接关系用户用电质量与电网安全。随着城市化推进与分布式电源接入，配电线路故障频次与复杂度持续上升，传统人工排查与分散式抢修模式已难以满足快速复电需求。故障定位精度不足导致排查耗时长，抢修流程衔接滞后进一步扩大停电范围，二者脱节更制约了整体运维效率。本文围绕故障精准定位与快速抢修两大核心，系统梳理典型故障特征、主流定位技术、抢修技术及协同优化策略，旨在为配电网智能化运维提供技术支撑。

1 配电线路典型故障特征分析

1.1 故障类型分类

配电线路故障可依据故障性质、持续时间与成因分为永久性故障、瞬时性故障与间歇性故障三大类，是电网运维的核心研判依据。永久性故障多由线路断线、绝缘子击穿、导线接地、设备老化破损等不可逆损伤导致，故障点位持续存在，无法自行恢复供电，必须人工介入抢修。瞬时性故障占配电线路故障占比 60%以上，主要源于雷雨大风、鸟类触碰、树枝瞬时搭接、粉尘闪络等外界瞬时干扰，故障诱因消失后线路绝缘可快速恢复，重合闸装置通常能成功恢复供电[1]。间歇性故障具备隐蔽性与反复性，多因线路接头松动、绝缘层局部破损、设备接触不良引发，故障无固定规律，时发时停，常规巡检难以排查，极易引发重复性停电问题，对电网稳定运行造成持续性隐患。

1.2 故障电气特征

不同类型配电线路故障呈现出差异化的电气参数变化特征，是故障识别与研判的核心数据支撑。永久性故障发生后，线路会出现持续的过流、零序电流超标、相电压骤降甚至三相短路归零现象，电气参数长期处于异常状态，无自动恢复趋势。瞬时性故障的电气异常具有短时性、突发性特点，故障瞬间电流激增、电压跌落，持续数十毫秒至数百毫秒后快速恢复正常，故障波形呈现单次脉冲式波动，无持续畸变。间歇性故障电气特征最为复杂，表现为电流、电压参数周期性或无规律波动，零序分量反复出现，波形存在断续畸变，无固定故障阈值。另外，单相接地故障会引发零序电压升高，相间短路故障会出现三相电流严重不平衡，可通过电气特征精准区分故障类型与故障程度。

2 配电线路故障定位技术研究

2.1 行波法故障定位

行波法是依托故障暂态行波传输特性实现故障精准定位的主流技术，适用于高压、超高压配电线路故障排查。线路发生故障时，故障点会产生高频暂态行波，以接近光速的速度沿线路双向传输，通过线路两端的行波采集装置捕捉行波首波头与反射波的传输时间差，结合线路波速参数，即可精准计算故障点位。该技术核心优势是不受线路负荷、过渡电阻、系统运行方式影响，定位精度高、响应速度快，可适配短路、接地等各类故障类型。但技术存在明显短板，对信号采集设备精度、采样频率要求极高，高频行波信号易受线路杂波、电磁干扰影响，造成波头识别偏差，同时在分支线路较多的复杂配电网中，行波反射叠加现象严重，易出现定位失效或点位偏移问题。

2.2 阻抗法故障定位

阻抗法基于配电线路阻抗参数恒定的原理实现故障定位，是目前配电网应用最广泛的基础定位技术。线路

发生故障后，故障点至监测端的线路阻抗会发生规律性变化，通过采集故障后的电压、电流稳态参数，计算故障回路阻抗值，结合单位线路阻抗参数，即可换算出故障点与监测端的距离。该技术原理简单、设备成本低廉、运维便捷，无需高精度采样设备，适配绝大多数中低压配电线路，稳态数据采集稳定性强，不易受轻微电磁干扰[2]。但其局限性较为突出，故障过渡电阻、线路负荷波动、线路分支、线路老化导致的阻抗偏移，都会大幅降低定位精度，易出现定位误差偏大、多点误判等问题，无法满足高精度故障定位需求，仅适用于简易故障初步排查。

2.3 矩阵法/分布式故障定位

矩阵法与分布式故障定位技术适配复杂多分支配电网，有效解决传统单点定位技术适配性差的问题。矩阵法依托配电网拓扑结构构建节点关联矩阵，结合各监测节点采集的故障电气信息，通过矩阵运算比对故障前后拓扑参数变化，精准锁定故障区段与故障节点，可清晰区分主干线与分支线故障点位。分布式故障定位采用多点分布式监测终端，在线路各分段、分支节点布设采集装置，同步采集故障数据并就地分析，通过多节点数据联动校验，规避单点监测的局限性。该技术抗干扰能力强、适配复杂电网拓扑，定位覆盖面广，可实现故障区段精准隔离。但存在终端布设成本高、数据同步难度大、拓扑更新繁琐的问题，电网拓扑改造后需同步更新矩阵参数与终端配置，运维工作量较大。

2.4 智能算法故障定位

智能算法故障定位是依托人工智能、大数据技术升级的新型故障定位手段，有效弥补传统定位技术的短板。目前主流应用的算法包括神经网络、遗传算法、粒子群算法、模糊算法等，核心原理是依托海量历史故障数据、线路运行参数、环境参数构建训练模型，挖掘故障电气特征与故障点位的非线性关联。通过实时采集线路故障数据，输入训练完成的模型，即可快速精准判定故障类型、故障位置与故障严重程度。该技术具备自学习、自适应能力，可适配负荷波动、电磁干扰、线路老化等复杂工况，能够有效解决传统技术定位误差大、复杂拓扑适配性差的问题。但技术依赖海量高质量样本数据，数据缺失、样本单一易导致模型准确率下降，同时算法运算耗时相对较长，对后台算力与数据处理能力有一定要求。

3 配电线路快速抢修技术研究

3.1 抢修流程优化

传统配电线路抢修流程存在环节繁琐、响应滞后、权责模糊等问题，优化抢修流程是缩短停电时长、提升抢修效率的关键。传统流程包含故障上报、人工排查、方案制定、物资调配、现场抢修、验收复电多个环节，各环节衔接滞后，易出现等待耗时。流程优化以“快速复电”为核心，重构标准化抢修体系，简化冗余审批环节，建立故障分级响应机制，依据故障影响范围、停电等级划分抢修优先级[3]。同时搭建抢修全流程联动机制，实现调度、运维、物资、抢修班组信息实时互通，压缩故障研判、物资调配、人员集结耗时。通过制定标准化抢修作业指导书，规范现场操作流程，规避不规范操作导致的返工耗时，大幅提升抢修作业规范性与高效性，有效缩短整体抢修周期。

3.2 移动式抢修装备与模块化作业

移动式抢修装备与模块化作业模式，是实现配电线路快速抢修的重要硬件与体系支撑。移动式抢修装备涵盖移动式发电车、应急抢修车、便携绝缘作业设备、智能检测设备等，可快速抵达故障现场，无需依赖固定运维站点设备，能够快速满足现场故障检测、临时供电、设备更换等作业需求。模块化作业将配电抢修工作拆解为故障检测、设备更换、线路搭接、绝缘恢复、验收复电等标准化作业模块，各模块独立且衔接有序，可根据故障类型灵活组合作业流程。该模式打破传统零散式抢修的弊端，作业标准化、规范化程度高，抢修人员可按模块快速完成作业，大幅降低现场作业难度，同时移动式装备可适配偏远、复杂地形线路抢修，全面提升抢修机动能力与作业效率。

3.3 无人机/机器人辅助抢修

无人机与电力机器人的应用，彻底革新了传统人工抢修模式，有效解决高危、复杂工况下的抢修难题。无人机具备机动灵活、视野广阔、无地形限制的优势，可快速完成线路故障巡检、故障点位精准复核、线路通道隐患排查、高空作业辅助观测等工作，替代人工完成高危高空巡检任务，大幅缩短故障排查耗时。电力抢修机器人涵盖绝缘作业机器人、线路清障机器人、带电作业机器人等类型，可实现带电清障、导线修补、绝缘子更换、故障点位检测等自动化作业，无需停电或仅需短时停电，规避人工高空作业的安全风险。该技术不仅提升抢修作业的安全性与精准度，还能突破人工作业的体能、视野局限，提升复杂环境下的抢修效率，推动配电抢修向智能化、无人化方向发展[4]。

3.4 故障隔离与最小停电范围恢复

故障隔离与最小停电范围恢复是降低故障供电影响、提升供电可靠性的核心抢修策略。配电线路故障发生后，传统抢修模式易出现全线停电、大范围停电问题，严重影响用户用电体验。最小停电范围恢复技术依托配电网分段开关、联络开关的智能控制功能，结合故障定位结果，精准锁定故障区段，通过自动化开关动作快速隔离故障点位，仅切断故障区段供电，保留非故障区段正常供电。故障隔离采用自动化、智能化操作模式，响应速度快、隔离精准，可有效避免故障扩散，结合快速复电策略，大幅缩短用户停电时长，最大限度降低故障对供电可靠性与用户用电的负面影响。

3.5 抢修决策支持系统

抢修决策支持系统是依托大数据、物联网、云计算技术搭建的智能化抢修管理平台，为配电线路抢修提供全流程决策支撑。系统整合电网拓扑数据、线路运行数据、历史故障数据、物资储备数据、抢修人员配置、气象地形等多维度数据资源，具备故障智能研判、抢修方案自动生成、物资智能调配、人员最优调度、抢修进度实时监控、停电影响预判等核心功能。故障发生后，系统可结合故障点位、故障类型、现场工况，快速生成最优抢修方案，精准匹配抢修物资与作业班组，规避人工决策的主观性与滞后性。同时可实时监控抢修全流程，动态调整抢修策略，预判抢修耗时与复电时间，实现抢修工作的数字化、智能化管控，全面提升抢修决策的科学性与高效性。

4 定位与抢修协同优化模型

4.1 定位-抢修一体化框架

定位-抢修一体化框架打破了传统故障定位与抢修作业相互独立、信息脱节的弊端，构建全流程协同的智能化运维体系。传统模式中故障定位、信息传输、抢修调度、现场作业环节割裂，数据无法互通，易出现定位结果滞后、抢修调度不合理、作业衔接不畅等问题。一体化框架以数据共享为核心，整合故障定位监测终端、调度平台、抢修管理系统，实现故障检测、精准定位、信息推送、调度决策、现场抢修、复电验收的全链条联动。定位系统实时将故障点位、故障类型、故障影响范围等数据同步至抢修调度终端，系统依据定位数据快速制定抢修方案、调配资源，抢修现场实时回传作业数据，反向校核定位精度，形成闭环协同机制，大幅压缩各环节衔接耗时。

4.2 可靠性提升效益评估

定位与抢修协同优化模式可显著提升配电系统供电可靠性，需通过多维度指标开展效益量化评估。评估体系以供电可靠率、用户平均停电时长、平均停电次数、故障复电时长、故障抢修成本为核心指标，对比传统运维模式与协同优化模式的运行数据[5]。协同优化模式通过精准定位减少故障排查耗时，通过一体化调度压缩抢修筹备时间，通过最小停电恢复策略缩减停电范围，可有效降低故障停电频次与停电时长。同时可减少重复抢修、无效运维产生的资源消耗，降低电网运维成本，提升电网运行稳定性。另外，该模式能减少电压波动、频繁启停对用电设备的损害，提升用户用电质量，兼具电网安全效益、经济运维效益与民生服务效益，全面赋能配电网高质量运行。

结束语

本文系统梳理了配电线路故障定位与快速抢修的关键技术，明确了行波法、阻抗法、矩阵法与智能算法各有适用场景，抢修环节需依托流程优化、模块化装备、无人化辅助与决策支持系统协同推进。定位-抢修一体化框架通过全链路数据共享与闭环联动，有效压缩了故障处置全周期耗时。未来，随着人工智能与物联网技术的深度融合，故障自诊断、自隔离、自恢复将成为现实，配电网供电可靠性与运维智能化水平将迈上新台阶。

参考文献

[1] 周志军, 杨伟杰, 刘继承. 基于分级保护技术的配电线路故障定位方法 [J]. 电世界,2026,67(1):1-5.

[2] 秦毅基, 杨开强, 周鹏, 等. 混合型配电线路故障定位技术研究 [J]. 电力设备管理,2023(11):177-179.

[3] 汤俊峰, 田璐璐, 林筱聪, 等. 含分布式电源的配电线路故障定位分析 [J]. 电气技术与经济,2025(2):182-184,187.

[4] 李松. 基于智能算法的输配电线路故障定位技术研究 [J]. 中国高新科技，2025(21)：84-85,88.

[5] 王智凯, 陈竹峰. 电网工程中配电线路故障定位技术的应用研究 [J]. 科技资讯,2025,23(13):87-89.