

配电网故障定位与快速恢复供电技术研究

樊国罡 赵顺利

乌兰察布供电公司凉城供电分公司 内蒙古 乌兰察布 013750

摘要：本文聚焦配电网故障定位与快速恢复供电技术。先阐述传统及现代故障定位方法原理与优势，如行波法定位精准。接着介绍智能配电网中基于人工智能、大数据等技术的定位方法，以及快速恢复供电的重要性、原则和传统方法。随后探讨智能配电网快速恢复供电技术，包括基于分布式电源的策略等。最后分析故障定位与恢复供电的协同应用，展现这些技术对提升配电网可靠性、降低停电损失的重要意义。

关键词：配电网；故障定位；快速恢复供电技术

引言：配电网作为电力供应的关键环节，其稳定运行关乎国计民生。随着分布式电源接入、负荷密度提升，配电网故障导致的停电损失愈发严重，对故障快速定位与恢复供电技术提出更高要求。传统方法在精准度、效率等方面存在局限，难以满足现代配电网需求。在此背景下，深入研究配电网故障定位与快速恢复供电技术，探索创新方法与协同应用模式，成为保障电力可靠供应、推动电网智能化发展的关键所在。

1 配电网故障定位的基本原理

配电网故障定位的核心在于捕捉故障产生的电气信号特征，结合线路拓扑结构与实时运行参数，通过数学模型与算法计算故障点位置。传统方法以阻抗法为主，其原理是通过测量故障点的电压、电流，结合线路阻抗参数推算故障距离。然而，该方法易受过渡电阻、负荷波动等因素干扰，定位误差常超过千米，难以满足现代配电网对精准度的要求。现代故障定位技术以行波法为代表，其物理基础是故障产生的电压波和电流波以接近光速沿线路传播的特性。当线路发生短路或接地故障时，故障点会向两端发射行波，通过在关键节点安装监测终端（如行波传感器），可实时捕捉行波到达时间^[1]。结合北斗/GPS双模授时技术，系统能将时间同步误差控制在1微秒以内，利用行波时差算法（即通过计算相邻终端接收到行波的时间差乘以波速），可实现故障位置的精确定位。另外，暂态特征分析法通过提取故障瞬间的零序电流、行波极性等高频信号，结合小波变换或希尔伯特-黄变换进行特征提取，可有效识别金属性接地、高阻接地等复杂故障类型。

2 现代智能配电网故障定位技术

2.1 基于人工智能的故障定位方法

人工智能技术通过构建故障特征与位置的映射关系，突破了传统方法对数学模型的依赖。深度学习中的

卷积神经网络（CNN）可自动提取行波信号的时频特征，结合支持向量机（SVM）进行故障分类与定位。例如，有研究采用一维CNN模型处理行波数据，在10千伏配电网测试中实现98.7%的定位准确率，较传统方法提升23%。强化学习则通过智能体与环境的交互优化定位策略，在分布式电源接入场景下，基于深度Q网络（DQN）的算法可动态调整监测终端的采样频率，在保证精度的同时降低30%的数据传输量。知识图谱技术通过构建设备-故障-位置关联网络，实现故障推理的可解释性。南方电网一项目将线路参数、历史故障记录、天气数据等结构化信息导入图谱，结合贝叶斯网络计算故障概率分布，使高阻接地故障的识别时间从15分钟降至2分钟。

2.2 基于大数据与云计算的故障定位技术

大数据技术通过整合多源异构数据提升定位鲁棒性。系统采集的实时数据包括电流、电压、功率因数等电气参数，以及温度、湿度、设备老化状态等非电气信息，数据规模达TB级/日。省级电网构建的故障知识库包含50万条历史记录，通过流数据处理引擎（如Apache Flink）实现毫秒级响应，结合Spark集群进行模式挖掘，可识别出传统方法难以检测的间歇性故障^[2]。云计算提供弹性计算资源支持大规模数据分析。国家电网一平台采用Hadoop+HBase架构存储10年历史数据，通过MapReduce算法计算线路阻抗的时空分布特性，使参数校准误差从15%降至3%以内。边缘计算节点则部署在变电站侧，对本地数据进行预处理，降低核心网传输压力的同时，实现故障初判的本地化决策。

2.3 基于物联网与传感器技术的故障定位

物联网技术通过泛在感知构建“设备-网络-云”协同体系。无线传感器网络（WSN）采用LoRa或NB-IoT通信协议，实现监测终端的低功耗广域覆盖。城市配电网部署的2000个智能传感器可监测线路温度、弧垂、绝缘子

泄漏电流等参数,结合LSTM神经网络预测设备劣化趋势,提前72小时预警树障、鸟害等隐患,使外力破坏故障率下降40%。光纤传感技术利用布里渊散射效应实现分布式温度监测,50公里电缆线路通过部署光纤传感器,可定位0.5米范围内的局部放电点,定位误差较传统方法缩小一个数量级。电子式互感器则通过罗氏线圈或光学原理实现电流的非接触测量,其动态范围达100dB,可准确捕捉故障瞬间的冲击电流,为行波法提供高精度数据源。

3 配电网快速恢复供电技术基础

3.1 快速恢复供电的重要性

在现代电力系统中,配电网正面临着诸多新的挑战,分布式电源的大量接入以及负荷密度的持续提升,使得配电网的结构和运行方式变得愈发复杂。一旦发生故障,所导致的停电损失呈现出指数级增长的态势。据权威统计数据表明,城市配电网每停电1小时,就会造成直接经济损失约50万元,这其中包括企业生产停滞、商业活动中断等带来的直接收益减少。而间接损失更为惊人,如交通瘫痪导致的物流成本增加、生产中断引发的供应链紊乱等,可达直接损失的3-5倍。快速恢复供电技术显得尤为关键,它通过大幅缩短停电时间,能够有效提升供电可靠率。例如,从99.8%提升至99.95%,这意味着用户停电的概率大幅降低。同时,还能显著减少用户投诉率,电网公司应用该技术后投诉下降了80%。此外,还能降低电网企业的经济赔偿风险,保障电网企业的稳定运营和经济效益。

3.2 恢复供电的基本原则

恢复供电工作需要遵循一系列科学合理的原则,以确保恢复过程安全、高效、公平且经济。(1)安全性原则,在恢复供电的过程中,网络拓扑必须保持辐射状结构,这是为了避免环网运行可能引发的保护误动问题,保障电网设备的安全稳定运行。(2)经济性原则,要优先通过转供路径来恢复负荷,尽量减少开关操作次数。相关研究显示,开关寿命与操作次数呈指数衰减关系,减少操作次数能够延长开关使用寿命,降低设备更换成本。(3)快速性原则,采用启发式算法或专家系统能够快速生成恢复方案,将决策时间从小时级压缩至分钟级,提高恢复供电的效率。(4)公平性原则,要按照负荷等级,如优先保障医院、学校等重要用户的供电,同时根据停电时长合理分配转供容量,避免重要用户长时间停电,维护社会的正常秩序和公共利益。

3.3 传统恢复供电方法分析

传统恢复供电方法主要以网络重构为核心,通过开

关操作来改变线路的连接方式,从而实现负荷的转供。其中,混合整数线性规划(MILP)是一种经典的数学模型,其目标函数通常设定为最大化恢复负荷或者最小化网损,同时考虑线路容量、电压偏移、开关操作次数等多种约束条件。然而,MILP在处理大规模配电网时存在明显的局限性,会面临“组合爆炸”问题^[3]。例如,在一个100节点系统中,求解时间可能长达数小时,难以满足快速恢复供电的实时性要求。启发式规则则通过经验知识来简化问题,像“先恢复主干线后分支线”“优先闭合联络开关”等策略能够快速生成可行方案,但在处理多故障或分布式电源接入等复杂场景时,往往显得力不从心。专家系统是将调度员的经验编码为规则库,通过正向推理机制匹配当前工况,但由于知识获取存在瓶颈,限制了其在实际中的应用范围。

4 智能配电网快速恢复供电技术

4.1 基于分布式电源的供电恢复策略

分布式电源(DG)的接入改变了配电网的电源结构,为故障恢复提供了新手段。当主网失电时,可通过孤岛划分将DG与关键负荷形成微网,实现局部供电。研究提出基于多代理系统(MAS)的协调控制策略,将DG、储能、负荷建模为独立代理,通过拍卖机制协商功率分配,使微网运行时间延长30%。考虑DG出力不确定性的鲁棒优化方法成为研究热点。模型采用区间数描述光伏、风电的预测误差,通过列与约束生成(C&CG)算法求解最小-最大后悔值问题,在出力波动 $\pm 30\%$ 时仍能保证95%以上的负荷恢复率。储能系统的充放电调节可平抑DG出力波动,案例中配置10%容量的锂电池可使微电网电压波动降低60%。

4.2 智能电网自愈控制技术在恢复供电中的应用

自愈控制通过“监测-诊断-决策-执行”闭环实现故障的自主处理。自愈系统采用分层架构:底层智能终端(如FTU、DTU)负责数据采集与执行控制;中间层区域控制器运行分布式算法,实现故障隔离与供电恢复;顶层主站系统进行全局优化与协调。测试数据显示,该系统可在15秒内完成故障定位、隔离及非故障区域恢复,较传统方法提速20倍。软件定义网络(SDN)技术为自愈控制提供灵活通信支持。项目将配电网通信网络抽象为虚拟资源池,通过OpenFlow协议动态调整数据流路径,在故障时优先保障恢复指令的传输,使通信延迟从100ms降至20ms以内。

4.3 考虑冷负荷启动特性的供电恢复优化

空调、冰箱等冷负荷在停电后重新启动时会产生3-5倍的冲击电流,可能导致三相电流不平衡度超标(>

15%)，触发电源切机保护。研究提出冷负荷启动时变模型，通过采集历史数据拟合功率需求曲线，结合电流不平衡度约束优化恢复时序。仿真显示，该方法可使重要负荷恢复量提升8.77%，同时避免电源退出运行。弹性配电网理论进一步扩展了恢复边界，通过构建“主网-微网-移动电源”多层次恢复体系，提升系统应对极端灾害的能力。

5 配电网故障定位与快速恢复供电技术的协同应用

5.1 故障定位与恢复供电的协同机制

故障定位为恢复供电提供精准信息支撑，而恢复策略需根据定位结果动态调整。某协同系统采用“定位-隔离-恢复”三阶段框架：故障发生后，行波定位模块在100ms内确定故障点；隔离模块通过遥控开关断开故障区段（耗时3-5秒）；恢复模块结合DG出力、负荷优先级生成转供方案（耗时10-30秒）。实际运行显示，该系统可使平均停电时间从2.5小时降至0.5小时。数字孪生技术通过构建虚拟配电网实现协同优化。某平台集成GIS、SCADA、PMS等多系统数据，在虚拟空间中模拟故障传播与恢复过程，通过强化学习训练最优策略。测试表明，数字孪生可使恢复方案的可行性提升40%，减少现场调试次数60%。

5.2 信息交互与共享在协同应用中的作用

信息交互作为协同应用得以顺利开展的关键基础，在电力系统运行中发挥着不可替代的作用。IEC61850标准为故障定位与恢复设备搭建起了统一的通信桥梁，它明确定义了相关设备的通信接口，借助MMS（制造报文规范）、GOOSE（面向通用对象的变电站事件）、SV（采样值）等服务，实现了数据的实时、精准传输，确保了设备间信息交互的高效与准确。在某项目中，创新性地采用5G+TSN（时间敏感网络）构建通信架构^[4]。5G

的大带宽、低时延特性与TSN的确定性传输能力相结合，打造出低时延（小于10ms）、高可靠（达到99.999%）的通信环境，能够支持2000个终端同时并发接入，满足大规模设备接入和复杂信息交互的需求。数据共享平台则运用区块链技术保障信息安全，省级电网构建的联盟链网络，允许调度中心、发电企业、用户等不同节点共享负荷数据、设备状态等重要信息。同时，通过智能合约严格控制数据访问权限，确保数据安全。在实际应用中，该平台成效显著，使跨部门协作效率提升了70%，恢复方案制定时间缩短了40%，有力推动电力系统的协同高效运行。

结束语

配电网故障定位与快速恢复供电技术是保障电力稳定供应的核心。现代技术如人工智能、物联网等的应用，极大提升了故障定位精准度与恢复供电效率。协同应用机制和信息交互共享的完善，更让两者优势互补。未来，随着技术持续创新，这些技术将不断优化升级，进一步降低停电损失，提升供电可靠率，为构建更加智能、高效、可靠的配电网提供坚实支撑，助力电力行业高质量发展。

参考文献

[1]王瑞,曹婧.人工智能技术在配电网故障快速定位与恢复中的应用研究[J].张江科技评论,2024(9):64-66.
[2]孟立涛.配电网调控中故障定位与快速恢复技术的应用效果研究[J].张江科技评论,2024(8):60-62.
[3]丁伟平.配电网自适应智能型快速故障定位与就近隔离技术研究[J].通信电源技术,2024,41(4):10-12.
[4]张纯强.基于深度强化学习的配电网故障快速定位与恢复优化算法[J].电脑编程技巧与维护,2024(12):135-137,154.