

10kV配电线路故障快速定位与隔离技术研究

任丹丹 孙 玮

石嘴山农村电力服务有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘 要：随着社会经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，用户对供电可靠性的要求日益严苛。作为连接主网与终端用户的“最后一公里”，10kV配电线路的运行状态直接决定了广大用户的用电体验。然而，该层级电网结构复杂、分支众多、运行环境多变，极易受到雷击、外力破坏、设备老化及树障等因素的影响而发生故障。传统的故障处理模式依赖于人工巡线，耗时长、效率低，严重制约了供电可靠性的提升。因此，研究并应用先进的故障快速定位与隔离技术，已成为现代配电网智能化、自动化发展的核心课题。本文系统梳理了当前主流的故障定位与隔离技术体系，深入剖析了基于馈线自动化（FA）、行波测距、故障指示器以及人工智能等方法的技术原理、性能特点与发展瓶颈。在此基础上，文章重点探讨了多源信息融合、自适应保护整定、分布式智能决策等前沿方向，并提出了构建一个集“精准感知、高速通信、智能研判、协同控制”于一体的新型故障处理架构。最后，对技术标准化、网络安全及未来发展趋势进行了展望，旨在为提升10kV配电网的自愈能力和供电服务水平提供理论参考与实践指引。

关键词：10kV配电线路；故障定位；故障隔离；馈线自动化；行波测距；人工智能

引言

电力系统是现代社会的基石，而配电网则是其服务用户的最终环节。在我国，10kV电压等级的中压配电网承担着将电能从变电站高效、可靠地输送到千家万户和工商业用户的重要使命。据统计，超80%的用户停电事故源于配电网故障，其中10kV线路故障占主导。该类线路结构复杂（辐射状、环网或手拉手）、分支多、覆盖广，常采用架空线与电缆混合方式，且长期暴露于户外，易受雷电、大风、覆冰、鸟害、树障及施工破坏等多重因素影响。一旦发生短路或接地故障，若不能快速准确定位并隔离，将扩大停电范围，损害设备，甚至引发安全事故。传统故障处理依赖调度员依据保护动作信息初步判断，再由运维人员沿线排查，存在“三高”问题：高人力成本、高时间成本和高安全风险，尤其在山区或夜间更为突出。随着坚强智能电网建设推进，以及分布式电源、电动汽车等新型负荷大量接入，配电网运行方式日益灵活复杂，传统人工模式已难以满足高供电可靠性与优质服务的新要求。在此背景下，故障快速定位与隔离技术成为配电网自动化研究热点。通过部署先进传感、通信与控制设备，实现故障自动检测、精确定位、快速隔离及非故障区域自愈恢复，是提升配电网智能化水平的核心路径。本文系统梳理现有及新兴10kV线路故障定位与隔离技术，分析其机理、适用场景与发展趋向，为工程应用与标准制定提供理论支撑。

1 10kV 配电线路故障特征与处理挑战

1.1 典型故障类型与电气特征

10kV配电线路的故障主要分为两大类：相间短路故障和单相接地故障。相间短路（包括两相短路、三相短路）通常由严重的外力破坏或绝缘击穿引起，故障电流大，保护装置能够迅速动作跳闸，故障特征明显，相对易于处理。而单相接地故障则更为常见，约占所有故障的70%-80%。在我国，10kV系统多采用小电流接地方式（包括中性点不接地和经消弧线圈接地），发生单相接地时，系统线电压依然对称，可以带故障运行1-2小时，这虽然提高了供电连续性，但也给故障的快速、准确定位带来了巨大挑战^[1]。接地故障电流小（通常为几安到几十安），且信号微弱、易受噪声干扰，其暂态和稳态特征复杂多变，使得传统的过流保护无法有效识别。

1.2 故障定位与隔离的核心难点

10kV配电线路故障处理面临多重挑战。首先是网络结构的复杂性。一条主干线路上往往挂接数十个甚至上百个分支，任何一个分支上的故障都可能导致主干线开关跳闸，使得故障区间的初步判断范围过大。其次是量测信息的有限性。与输电网不同，配电网点多面广，不可能在每个节点都安装高精度的同步相量测量单元（PMU），导致可用于故障分析的数据稀疏且不同步。再次是运行方式的灵活性。联络开关的投切、分布式电源的出力波动都会改变网络的潮流分布和故障电流路径，使得基于固定模型的故障定位算法失效。最后是通信条件的制约。配电网末端的通信基础设施往往较为薄弱，难以支撑海量数据的实时、可靠传输，限制了集中式高级应用的部署。

2 主流故障快速定位与隔离技术体系

2.1 基于馈线自动化（FA）的集中式与分布式模式

馈线自动化（Feeder Automation, FA）是目前应用最为广泛的配电网故障处理技术。它通过在馈线上配置具备“三遥”（遥测、遥信、遥控）功能的配电终端（如FTU、DTU），并与配电主站或子站构成一个完整的监控系统。FA主要分为集中式和分布式两种模式。集中式FA依赖于强大的配电主站，主站收集全线所有终端的故障信息（如过流信号、开关变位），利用预设的拓扑逻辑和专家规则进行集中式故障定位、隔离与恢复（FLISR）决策，然后下发遥控命令^[2]。该模式逻辑清晰、便于管理，但对主站计算能力和通信可靠性要求极高，一旦主站或通信链路故障，整个系统将瘫痪。分布式FA则将决策逻辑下放到各配电终端，终端之间通过横向对等通信（如GOOSE）交换信息，依据本地及相邻终端的信息自主完成故障区段的判别与隔离。该模式不依赖主站，响应速度快，可靠性高，但对终端的智能化水平和通信协议一致性要求较高。

2.2 基于行波原理的故障测距技术

行波测距技术是一种高精度的故障定位方法，其基本原理是利用故障瞬间产生的高频暂态行波在输电线路上传播的特性。当线路某点发生故障时，会向线路两端发射电压和电流行波，通过在线路两端安装高速暂态录波装置，精确记录下行波到达两端的时间差，结合行波在导线中的传播速度，即可计算出故障点距离。该技术定位精度可达百米级甚至更高，且不受故障类型、过渡电阻和系统运行方式的影响。然而，其在10kV配电网的应用面临诸多障碍。首先，10kV线路分支众多，行波在分支点会发生复杂的折射和反射，使得波头识别变得异常困难。其次，行波信号衰减快、频带宽，对传感器的带宽和采样率要求极高，成本昂贵。此外，需要在线路两端甚至各分支端口同步安装装置，工程实施难度大。

2.3 基于故障指示器的就地判别与信息远传

故障指示器是一种安装在架空线路或电缆分支上的低成本、小型化装置，能够就地检测短路和接地故障电流，并通过翻牌、闪光等方式给出直观的故障指示。现代智能故障指示器还集成了无线通信模块（如LoRa、NB-IoT），可将故障告警信息远传至后台主站。运维人员通过主站的故障信息拓扑图，可以迅速缩小故障巡查范围，极大地提高了巡线效率。故障指示器技术简单、经济、可靠，特别适用于分支线路和用户入口处的故障初判。但其本身不具备隔离能力，仍需人工操作开关进行隔离，且对于高阻接地等微弱故障的灵敏度有限。

2.4 基于人工智能的故障智能诊断方法

近年来，人工智能（AI）技术，特别是机器学习和深度学习，在电力系统故障诊断领域展现出巨大潜力。通过对历史故障录波数据、SCADA数据、气象数据等多源异构信息进行深度挖掘，可以训练出能够自动识别故障类型、定位故障区间的智能模型。例如，利用卷积神经网络（CNN）处理故障录波的时频图像，或利用图神经网络（GNN）直接在配电网拓扑图上进行故障传播路径的学习。AI方法能够有效处理非线性、高维度的复杂数据，对噪声和不确定性具有较强的鲁棒性。然而，其成功应用高度依赖于高质量、大规模的标注数据集，而真实的配电网故障数据获取困难、样本不平衡，且模型的“黑箱”特性使其决策过程缺乏可解释性，这在对安全性要求极高的电力系统中是一个不容忽视的问题。

3 技术融合与创新方向

3.1 多源信息融合的协同定位策略

单一技术手段往往难以应对10kV配电网的复杂故障场景。未来的趋势是构建一个多源信息融合的协同定位体系。该体系将FA的拓扑逻辑、行波测距的高精度、故障指示器的广覆盖以及AI模型的智能研判能力有机结合起来。例如，首先利用FA系统快速确定故障的大致区间，然后在该区间内启动高精度的行波测距装置进行精确定位；或者利用故障指示器的告警信息作为AI模型的输入特征之一，提高模型的泛化能力。通过不同技术的优势互补，可以在成本、精度和速度之间取得最佳平衡。

3.2 面向有源配电网的自适应保护与定位

随着分布式光伏、风电等间歇性电源的大量接入，10kV配电网正从传统的无源辐射状网络转变为双向潮流的有源网络。这使得故障电流的大小、方向和分布规律变得极为复杂，传统的基于固定阈值的过流保护和基于单端电气量的定位方法面临严峻挑战。为此，必须发展自适应的保护与定位技术^[3]。自适应保护能够根据实时的电网拓扑和分布式电源出力情况，动态调整保护定值和动作逻辑。自适应定位则需要建立能够在线辨识网络参数和运行状态的模型，利用双端或多端的同步量测信息，实现对故障点的准确捕捉。

3.3 基于边缘计算与分布式智能的就地决策

为了解决集中式系统对通信和主站的过度依赖，基于边缘计算的分布式智能决策架构成为重要发展方向。在这种架构下，配电终端（或区域内的智能代理）被赋予更强的本地计算和决策能力。它们不仅能执行基本的保护功能，还能利用本地采集的数据和轻量化的AI模型，进行初步的故障分析与定位。只有在需要协调多个

区域或执行复杂恢复策略时,才与上级主站进行必要的信息交互。这种“云-边-端”协同的模式,大大降低了对通信带宽的要求,提升了系统的响应速度和鲁棒性,尤其适合通信条件受限的偏远地区。

4 实施保障与未来展望

4.1 标准化与互操作性

故障快速定位与隔离技术的有效实施,离不开统一的标准和良好的互操作性。目前,不同厂商的设备在通信协议、数据模型、功能定义等方面存在较大差异,形成了信息孤岛,阻碍了系统的集成与升级。因此,亟需完善和推广IEC 61850、IEC 61968/61970(CIM)等国际标准在配电网领域的应用,确保来自不同供应商的设备能够无缝协同工作。

4.2 网络安全防护

随着配电网自动化程度的提高,其攻击面也随之扩大。配电终端、通信网络和主站系统都可能成为网络攻击的目标。一旦故障定位与隔离系统被恶意操控,可能导致大范围误停电或设备损坏,后果不堪设想^[4]。因此,必须将网络安全置于与功能同等重要的地位,从设备安全、通信安全、应用安全等多个层面,构建纵深防御体系,确保系统在遭受攻击时仍能维持基本的安全稳定运行。

4.3 未来发展趋势

展望未来,10kV配电线路故障快速定位与隔离技术将朝着更高精度、更快速度、更强韧性、更广覆盖的方向发展。量子传感技术有望为行波测距提供前所未有的时间分辨率;数字孪生技术将构建配电网的虚拟镜像,实现故障的超前预警与仿真推演;5G/6G通信技术将为海量终端提供低时延、高可靠的连接保障。最终,一个能够实现“秒级自愈”的智能配电网将成为现实,为用户

提供近乎“零感知”的用电体验。

5 结语

10kV配电线路故障的快速定位与隔离,是提升配电网供电可靠性和智能化水平的核心任务。本文系统回顾了从传统的馈线自动化、行波测距到新兴的人工智能诊断等多种技术路线,深入分析了各自的技术原理、适用场景及面临的挑战。研究表明,没有任何一种单一技术能够完美解决所有问题,未来的解决方案必然是多种技术深度融合、优势互补的产物。通过构建多源信息融合的协同定位策略、发展面向有源配电网的自适应算法、以及推动基于边缘计算的分布式智能架构,可以有效克服当前的技术瓶颈。同时,必须高度重视标准化建设和网络安全防护,为技术的规模化应用奠定坚实基础。随着相关技术的持续迭代与创新,10kV配电网的故障处理能力将迈上新的台阶,为构建安全、可靠、绿色、高效的现代能源体系提供强有力的支撑。

参考文献

- [1]米克凡,杜鹏远.农网10kV配电线路故障快速定位与隔离技术的实证研究[J].数字农业与智能农机,2025,(12):40-43.
- [2]图门,田树青.10kV配电线路常见故障成因及检修技术优化研究[C]//江西省汽车工程学会.工程技术创新发展学术研讨会论文集(第一册).锡林郭勒电力建设有限责任公司,2026:1086-1089.
- [3]卫世泽,薛思哲,徐臻华.10kV配电线路故障类型统计分析与运维优化策略[J].城市建筑空间,2025,32(S2):462-463.
- [4]殷元炽.10kV配电线路故障检修技术与自动化运行维护研究[J].科技资讯,2025,23(22):139-141.