

配电网环网线路故障定位优化策略研究

关宇

内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电公司 内蒙古包头 014030

摘要: 随着配电网结构日益复杂,环网供电方式因其供电可靠性高、结构灵活等优势被广泛采用。然而,在实际运行中,环网线路故障具有隐蔽性强、传播路径复杂等特点,给故障定位带来较大挑战。本文系统分析了环网结构下的故障特征及现有定位方法的局限性,提出了一种基于多源信息融合与智能算法优化的故障定位策略。通过构建仿真模型并对不同故障场景进行验证,结果表明该策略在提升故障定位精度与响应速度方面具有显著优势。研究成果对提升配电网智能化运行水平具有重要参考价值。

关键词: 配电网; 环网结构; 故障定位; 优化策略; 智能算法

一、配电网环网结构及故障特点分析

1. 配电网环网结构的定义与分类

配电网环网结构是指配电线路以环形方式连接,电源与负荷之间存在多条供电路径,正常运行时一般以开环方式运行,发生故障时可以通过切换开关实现供电路径的快速调整,从而提高供电的可靠性和灵活性。

按照运行方式和结构特点,环网结构主要可分为以下几类:

开环运行环网: 即常态下某一开关处于断开状态,整张网呈树状运行。故障发生时,通过控制开关的切换实现备用电源供电,保证非故障区域的正常供电。

闭环运行环网: 即所有线路处于闭合状态,电力可双向流动,具有更高的供电可靠性,但对保护装置配合和故障定位提出了更高要求。

双电源环网: 通过两个不同电源节点向负载供电,提高电压稳定性和供电连续性,广泛用于医院、重要工厂等对供电可靠性要求高的场所。

在实际运行中,考虑成本与控制复杂性,中压配电网多采用开环运行结构,并配合自动化装置实现“故障隔离、非故障恢复”。

2. 环网结构下的常见故障类型

在配电网环网结构中,常见故障主要包括以下几种:

单相接地故障: 最常见的一种故障类型,特别是在中性点不接地或经消弧线圈接地系统中,占全部故障的

70%以上。虽不一定立即造成跳闸,但若长期存在可能引发相间短路。

两相短路故障: 由于绝缘损坏或导线受外力接触而引发,故障电流较大,对设备损害严重。

三相短路故障: 属于最严重的故障类型,故障电流最大,需迅速切除,以防扩大影响。

线路断线故障: 通常由于外力破坏或设备老化引起,可能导致负荷不均、电压波动等问题。

高阻接地故障: 由于电缆绝缘老化、水汽入侵等原因引起,故障电流小,不易被传统保护装置识别,增加了定位的难度。

3. 故障传播特征分析

环网结构故障的传播过程不同于传统放射型网络,其多路径供电特性导致故障电流分布和故障信号传播存在显著差异。在环网结构中,多路径传播现象明显,故障发生后,电流可由多个方向流向故障点,形成环形回路。这种供电模式使得传统依赖单向电流或电压变化进行判断的测量方法难以精确确定故障位置,容易出现定位偏差。

此外,故障信号的幅度衰减较快。尤其在以电缆为主要线路形式的城市配电网中,由于电缆具有较强的容性特征,电压突变类信号在传播过程中被电缆吸收,信号强度迅速衰减,导致远离故障点的测量装置难以有效捕捉异常波形,影响了后续故障判断。

环网结构中的故障发生点与测量点之间的路径不唯一,一个测点可能接收到多个方向传播来的故障信息,且这些信息可能属于不同支路。这会导致信号出现重叠、混淆的情况,进而增加了故障定位系统的数据处理和判断难度。

作者简介: 关宇(1989.09.12—),男,汉族,内蒙古人,大学本科学历,工程师,主要从事电气工程、调度运行、智能电网方面的研究。

在故障初期，电压与电流波形通常会表现出突变、尖峰或震荡等特征，这些本可作为识别依据的重要信息，但在实际应用中容易受到非线性负载（如变频器、电动机等）带来的谐波干扰，使得波形分析不再具备稳定特征性，给故障识别带来较大挑战。

二、配电网环网故障定位现有方法综述与问题分析

1. 传统故障定位方法回顾

传统的配电网故障定位方法多依赖于电流、电压等一次量的异常变化特征进行分析与判断。其中，基于过电流保护、方向保护以及电压突变等原理的方法被广泛应用于早期的配电网系统。这类方法通常通过安装在线路两端或节点处的电流互感器（CT）和电压互感器（PT），采集运行参数，一旦检测到电流突变或电压跌落，保护装置将进行动作判断，断开故障区域。同时，配合故障指示器（如熔断器跳闸信息、继电器状态）可辅助工作人员进行人工巡检定位。此外，时域反射法也是一种应用较早的手段，通过向线路注入高频信号并观察反射波变化，判断故障点位置。然而，这些方法大多依赖现场经验和人工判断，精度受限，且在环网结构中由于电流多路径传播及故障信号干扰，常常无法准确指示具体位置，导致故障处理效率低下、供电恢复时间延长。

2. 智能故障定位方法发展

近年来，随着智能电网建设推进，智能故障定位方法逐渐成为研究热点。这类方法广泛引入了人工智能、大数据、多点同步测量技术（如广域测量系统WAMS）等新技术，具备更高的判断精度与自适应能力。基于数据驱动的故障诊断系统可以通过历史故障特征学习，建立判别模型，实现模式识别与快速定位。典型方法包括：基于支持向量机（SVM）、决策树、神经网络、深度学习等人工智能算法，能够从海量运行数据中提取有效特征，辅助判别故障区域；基于故障暂态信号分析的方法则依赖高频采样设备采集电流波形、暂态行波等信息，通过小波变换、傅里叶分析等数学工具提取时频特征并用于定位判断。此外，多点同步测量与通信技术的发展，使得基于分布式测量的协同判断成为可能，多个测点通过时间同步实现对故障的动态分析，提高了系统对多类型故障的响应能力。

3. 当前方法存在的局限性

尽管当前智能化故障定位技术已取得显著进展，但在实际应用中仍面临诸多挑战与局限。首先，数据质量问题依然是影响智能定位系统效果的重要因素。配电网的监测装置部署不均，部分区域缺乏有效数据采集，导

致模型训练数据不充分或不全面，影响算法精度。其次，算法依赖的训练样本大多基于理想工况模拟或少量现场数据，缺乏覆盖各种特殊故障情形（如高阻故障、间歇性故障）的多样性样本，导致其在实际运行中的泛化能力不强。再次，现有智能算法多属于“黑箱”模型，缺乏良好的可解释性，使得工程人员在操作和维护过程中难以信任算法结果。此外，多点同步测量设备的高成本、通信延迟问题以及数据融合机制的不成熟，也制约了其在大规模配电网中的推广应用。

三、环网故障定位优化策略设计

1. 优化目标与思路

本研究的优化目标主要包括提升环网故障定位的准确性、提高响应速度、增强系统对复杂工况的适应能力，同时控制算法复杂度与部署成本。在设计思路，优化策略以“感知增强、信息融合、智能判别、自适应调优”为主线，充分挖掘已有测量点数据潜力，联合电压、电流、暂态信号、负载状态等多种信息源，构建更加全面的故障特征描述体系；在此基础上，通过改进信号处理技术提取清晰故障特征，并引入适应性强的智能算法进行判别推理；同时，设计动态更新机制保障模型在长期运行中的鲁棒性与自学习能力，从而实现复杂场景下的精准故障定位。

2. 基于多源信息融合的定位优化策略

针对传统定位方法信息维度单一、特征提取受限等问题，优化策略强调多源数据融合的重要性，充分利用配电自动化系统中现有的各种采集资源，包括电压电流采样值、故障指示器信息、变压器运行状态、开关状态信号、历史故障数据等，形成多维度故障特征数据集。在融合方式上，采用时间同步机制对多点测量信息进行统一时标归整，保障信息融合的空间一致性和时序逻辑性；在数据处理层面，通过特征加权融合、信号相关性分析、信息冗余剔除等技术手段，提升整体数据质量与故障特征辨识度。多源融合不仅提升了系统对弱故障（如高阻、间歇性故障）的感知能力，也为后续智能算法建模提供了丰富可靠的数据支撑，有效弥补了传统单点测量策略的不足。

3. 改进的信号处理与判断方法

在环网中，由于故障信号路径复杂、信号本体易受干扰，因此亟需优化信号处理过程以提取更清晰的故障特征。为此，优化策略在信号采集后引入了一系列改进处理方法。首先，在频域处理方面，采用自适应小波变换和希尔伯特-黄变换（HHT）等时频联合分析工

具,对故障暂态信号进行精细解析,增强对异常突变信号的响应能力;其次,在降噪环节引入经验模态分解(EMD)和盲信号分离(BSS)技术,有效滤除背景噪声与非线性负载干扰;此外,通过建立多点波形特征对比模型,识别信号到达时间差与幅值差异,从而推断故障传播路径与发生点位置。这些处理方法的优化为后续的算法识别提供了更具代表性的输入变量,有助于提高整体故障判断的准确性与鲁棒性。

4. 智能算法引入与优化

在实现高精度故障判断的过程中,智能算法的引入成为提升系统性能的关键。本研究选取适合时序特征建模的算法如长短期记忆神经网络(LSTM)、图神经网络(GNN)等进行建模,充分考虑配电网拓扑结构与信号演化过程的动态特性。同时,为增强模型的可解释性与实时性,辅以轻量级决策树、支持向量机(SVM)作为初筛器,对疑似故障区域进行快速筛查,再通过深度模型进行精细定位。此外,在算法优化方面,重点解决过拟合、特征冗余与计算复杂度高的问题,引入正则化、特征选择与剪枝策略,结合迁移学习技术提升模型在不同运行环境下的适应能力,从而实现快速部署、精确判别的定位效果。

5. 模型训练与适配机制设计

智能定位系统的性能高度依赖于训练样本的质量与代表性,因此本研究提出了系统化的模型训练与适配机制。首先,在数据准备阶段,构建基于现场历史数据与仿真数据相结合的复合样本库,增强样本覆盖面,提升模型泛化能力。其次,训练过程中引入增量学习与在线微调机制,使模型在实际运行中能够不断适应新的工况变化与故障特征;同时设计异常样本识别与反馈机制,一旦发现定位误差较大的情形,系统可自动触发再训练流程,实现对模型参数的动态修正。

四、问题与挑战分析

1. 实际应用面临的技术问题

在实际工程应用中,技术层面的挑战主要体现在以下几个方面。首先是测量设备布局不合理或精度不足,许多配电网尚未普及高频、高采样率的故障录波装置,导致关键信号捕捉困难,影响定位精度。其次是信号同步与通信延迟问题,由于环网结构中多个监测点之间存在物理分散,若时间同步机制不健全,则会影响多源数据融合的有效性。再次,信号处理算法与智能模型虽然在理论上表现优异,但在面对高噪声、信号干扰或故障类型复杂的环境时,仍可能产生误判或漏判,说明模型的鲁棒性与泛化能力有待加强。

2. 管理与运维层面的困难

在故障定位系统的推广与运行过程中,管理和运维方面的困难也不可忽视。首先是设备维护成本高,尤其是多点布设测量设备与通信节点后,日常运维所需人力和资金大幅增加。其次,部分配电网公司缺乏统一的设备运维平台和技术标准,导致故障信息上报、处理流程存在断层,影响响应速度。此外,智能化系统的运维人员技术水平参差不齐,对新兴智能诊断技术和数据分析平台的理解与掌握能力不足,限制了系统效能的发挥。同时,跨部门协调不畅也造成数据共享难度加大,不利于多源融合策略的实施与优化。

3. 安全性与数据隐私问题

随着多源数据融合和智能算法在故障定位中的广泛应用,系统的网络安全和数据隐私问题愈发突出。首先,故障定位系统通常依赖配电网自动化平台及远程通信网络,一旦通信链路或节点遭受攻击,可能导致误报、漏报,甚至造成区域电网误操作,威胁电力系统运行安全。其次,采集与分析过程中涉及大量实时运行数据及用户用电行为信息,若未进行合理加密或权限管理,存在数据泄露风险。

结束语

配电网环网结构作为现代城市供电系统的重要形式,其故障定位的准确性直接关系到电网运行的安全性与供电的可靠性。本文从环网结构的特点出发,系统梳理了现有故障定位方法的技术路径与存在问题,提出了以多源信息融合、智能算法引入和信号处理优化为核心的定位优化策略。在分析现实应用难点的基础上,进一步强调了技术落地过程中应重视的管理协调与数据安全问题。未来,随着智能感知与边缘计算技术的不断发展,配电网故障定位将朝着更高精度、更强鲁棒性和更低时延的方向演进,为实现智能电网的稳定运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1]徐丙垠.电力电缆故障探测技术[M].北京:机械工业出版社,1999:51-55.
- [2]陈平,葛耀中,徐丙垠,等.现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用:A型原理[J].继电器,2004,32(3):14-17.
- [3]徐子华,王艳松.基于强跟踪滤波器的输电线路单端故障测距新方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(7):54-59.