

基于智能终端的配电自动化系统故障定位与自愈控制研究

冯 志, 李光洋, 韩江伟, 赵耀武

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽 六安 237400)

摘 要 为提升配电系统的稳定性与可靠性, 本研究针对基于智能终端的配电自动化系统开展故障定位与自愈控制技术研究。通过系统分析智能终端的数据采集、通信传输及信息处理功能特性, 结合馈线终端单元 (FTU) 与无线传感器网络 (WSN) 的故障定位方法, 深入探讨故障隔离与供电恢复的运行机制, 并重点研究遗传算法、粒子群优化算法、多智能体协同控制以及强化学习等智能自愈控制策略。实验结果表明, WSN 定位技术较 FTU 在时间精度和误差控制方面均表现出更优越的性能。同时, 采用自愈控制策略可有效缩短故障处理时长并减少停电范围。通过对比分析, 发现粒子群优化算法在综合性能指标上具有明显优势。

关键词 智能终端; 配电自动化系统; 故障定位; 自愈控制

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.011

0 引言

在数字化和智能化快速发展的今天, 电力系统的稳定和可靠运行至关重要。随着城镇化发展、工业规模扩大、用电设备日益普及, 电力需求快速增长, 用户对供电可靠性提出更高要求。配电自动化系统是电力行业高效、稳定供电的关键技术, 基于智能终端的配电自动化系统具有更强大的数据感知和传输能力, 支持故障定位和自愈控制。深入研究基于智能终端的配电自动化系统, 能够推动运行效率提升, 减少因故障造成的冲击, 为保证我国现代化电力供应体系的安全、稳定、高效奠定基础。

1 智能终端在配电自动化系统中的应用

1.1 数据采集功能深度剖析

智能终端的数据采集功能是实现配电自动化的基础。在实际应用中, 其安装的高精度电压传感器和电流传感器能够实时准确地采集配电线路的电压、电流等重要电气参数^[1]。以某城市配电网为例, 安装在 10 kV 配电线路上的智能终端, 可将电压测量精度控制在 $\pm 0.2\%$ 以内, 电流测量精度达到 $\pm 0.5\%$, 为后续故障分析和定位提供可靠数据来源。智能终端除对电气参数进行检测之外, 还能通过温度传感器、振动传感器等对配电设备的开关状态、设备温度、机械振动等进行实时监测。以变压器的监控为例, 智能终端中内置的光纤温度传感器能够在温度超过预设阈值的时候精确感应

到变压器绕组和油温的变化, 立即发出预警信号, 对于设备的预防性维护有着重要的意义。

1.2 通信功能多样化实现

智能终端为各种通信方式提供支持, 满足各种配电网环境。城市核心地区光纤通信具有大容量、高速度和抗干扰能力强的优点, 是智能终端和配电自动化主站传输数据优先选择的通信方式。通过搭建光纤环网使智能终端能进行毫秒级数据传输以保证故障信息能及时上传到主站。在某些偏远地区或者地形比较复杂的地区, 无线通信技术也扮演着举足轻重的角色。以 4G/5G 通信技术为例, 该技术覆盖范围大, 部署灵活, 可确保智能终端与上述地区主站通信连接稳定; LoRa 技术因其低能耗和长距离传输的优点, 特别适合于那些对数据传输速度要求不特别高但需要进行长距离通信的场合, 例如农村配电网的实时监控。

1.3 数据处理能力强化应用

智能终端数据处理能力可有效缓解主站数据处理压力。它内置高性能处理器及高级数据处理算法可以实时分析并预处理采集数据。例如: 在配电线路的电流数据处理中, 智能终端可以利用滤波算法消除噪声干扰并利用趋势分析算法预测出电流的变化趋势。智能终端在发现电流异常波动后, 自动提取数据特征进行分析, 初步判定故障隐患, 将关键信息上传到主站, 显著提高数据传输效率与准确性。

2 配电自动化系统故障定位原理

2.1 基于FTU的故障定位方法详解

基于FTU的故障定位方法在实际应用中具有广泛的适用性。当配电线路发生故障时,FTU采集到的故障电流信号包含丰富的故障信息。以某条典型的10 kV配电馈线为例,假设该馈线安装5个FTU,当在FTU3和FTU4之间发生相间短路故障时,FTU1、FTU2、FTU3检测到的故障电流会明显增大,且大于正常运行时的负荷电流;而FTU4和FTU5检测到的电流则迅速下降为零。通过建立故障电流分析模型,结合各FTU上传的电流幅值、相位等信息,运用矩阵算法对故障区域进行逐步判断。具体来说,首先根据电流大小确定故障点上游的FTU范围,然后通过比较相邻FTU之间的电流相位差,进一步缩小故障范围,最终实现故障位置的准确定位^[2]。

2.2 基于无线传感器网络(WSN)的故障定位技术深入探究

基于WSN作为感知平台的故障定位技术,通过在配电线路的沿线部署大量的低成本设备、低功耗无线传感器节点建立分布式故障监测网络。每个传感器节点都具有感知、数据处理和无线通信能力,能够对其所处位置配电线路的电流、电压和温度等运行状态参数进行实时监控。在线路出现故障的情况下,位于故障区域附近的传感器节点将首先识别出由故障引发的异常信号,并激活节点之间的多跳通信机制,故障信息会逐渐传送到网络协调器,然后协调器会通过有线或无线的手段,将汇总好的故障数据上传到配电自动化主站。

在故障位置估算环节,常基于传感器节点采集的故障信号衰减特性计算节点与故障点的距离,若设传感器节点接收的故障信号强度为 P^r ,信号参考强度为 P_0 ,信号衰减系数为 α ,则节点与故障点的距离 d 可通过对数路径损耗模型计算,公式如下:

$$d=10^{\frac{P_0-P^r}{10\alpha}} \quad (1)$$

式(1)中, P_0 为预设的单位距离处信号强度, α 由配电线路周边环境(如地形、电磁干扰)决定,通过现场校准可提升该参数的准确性,进而优化距离计算精度。

主站系统结合至少3个传感器节点的位置坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 及对应的距离 d_1 、 d_2 、 d_3 ,采用三边测量法确定故障点坐标 (x_f, y_f) ,其方程组表达式为:

$$\begin{cases} (x_f-x_1)^2+(y_f-y_1)^2=d_1^2 \\ (x_f-x_2)^2+(y_f-y_2)^2=d_2^2 \\ (x_f-x_3)^2+(y_f-y_3)^2=d_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

通过求解上述方程组,可得到故障点的具体位置。为降低测量误差对定位结果的影响,还可引入定位精度评估公式,设实际故障点坐标为 (x_{true}, y_{true}) ,则定位误差 Δ 的计算公式为:

$$\Delta=\sqrt{(x_f-x_{true})^2+(y_f-y_{true})^2} \quad (3)$$

该技术凭借传感器节点的分布式部署优势,可实现对配电线路的全方位覆盖监测,尤其适用于复杂地形或传统有线通信难以部署的区域,通过优化传感器节点的感知灵敏度与通信能耗管理,能够在保证定位精度的同时,延长网络运行寿命,提升故障定位的适应性与经济性。

3 配电自动化系统自愈控制策略

3.1 故障隔离与恢复供电全流程解析

当配电系统发生故障,自愈控制体系即刻响应。以某精密电子制造园区为例,其双环网结构对供电可靠性要求严格。当10 kV供电线路出现短路故障时,线路首端的FTU通过高精度传感器捕捉电流骤升、电压骤降等异常,10毫秒内识别故障特征,经5GURLLC通道将信息上传至配电自动化主站。主站启动多源数据融合定位算法,结合故障录波、拓扑模型及相邻节点量测,通过行波测距与阻抗计算双重验证,200毫秒内锁定故障区段,随后基于IEC61850协议控制智能开关分闸,实现故障隔离^[3]。

在恢复供电阶段,主站依据实时拓扑与负荷预测,启用启发式算法规划最优路径。评估联络开关两侧电压相位差、线路负载率等条件后,下达合闸指令转移非故障区域负荷。在此过程中,主站实时监测电压、电流等参数,当线路负载率超85%时,启动分级负荷控制切除非关键负荷,并利用动态无功补偿调节电压,保障供电稳定,平均恢复供电时间缩短至3分钟内,效率显著高于传统人工操作。

3.2 优化控制算法应用拓展

遗传算法和粒子群优化算法在配电自动化系统自愈控制中发挥着重要作用。遗传算法在应用时,首先将配电网的控制策略编码为染色体,通过选择、交叉、变异等遗传操作,在解空间中不断搜索更优的控制方案。

以某市配电网仿真实验为例,采用遗传算法优化故障隔离与恢复供电策略,经多代演化后成功地寻找到最小化停电区域的控制方案。粒子群优化算法模拟鸟群觅食的行为模式,其中每一个粒子都代表一个可能的解决方案,并在解的空间内持续更新其位置和速度,以便找到最佳的解决方案。在处理配电系统的多目标优化问题时,粒子群优化算法能够综合考虑停电时间、网络

损耗、电压质量等多个目标,通过设置适当的权重系数,实现各目标的综合优化。在实践中,这两种算法综合运用、相互补充,可以进一步提升自愈控制效果与效率。

3.3 多智能体协同控制策略

在配电自动化系统中,多智能体协同控制策略通过构建分布式智能网络,将系统内的智能终端、开关设备、分布式电源、储能装置及负荷节点等实体,抽象为具备感知、决策与通信能力的独立智能体。各智能体遵循既定的通信协议与协同机制,通过高速通信网络(如 5G、光纤专网)进行实时信息交互,形成动态协作网络。

当配电系统发生故障时,故障区域周边的智能体迅速响应。以某沿海工业园区配电网为例,当台风导致多条馈线短路故障时,故障点附近的智能开关智能体立即启动故障定位程序,通过对比自身采集的电流、电压波形数据与相邻智能体的监测信息,结合拓扑识别算法,在数百毫秒内完成故障区段定位。同时,分布式电源智能体(如光伏电站、微型燃气轮机)依据系统频率、电压波动情况,主动调整输出功率,并与储能智能体协同配合,为非故障区域提供短时功率支撑。此外,负荷智能体(如可中断工业设备、柔性用电设施)接收控制指令后,有序执行负荷削减或转移操作,避免非故障线路过载。在整个过程中,智能体间通过协商机制优化分合闸动作顺序,相较于传统集中控制模式,故障隔离时间缩短 40% 以上,显著提升系统自愈效率^[4]。

3.4 基于强化学习的数据驱动自愈策略

基于强化学习的数据驱动自愈策略通过构建高精度配电系统数字孪生体,整合实时监测数据与历史运行数据,建立虚拟仿真训练环境。该环境将节点电压、线路潮流、设备负载率等系统实时运行状态,以及短路、接地、断线等故障类型及位置信息,编码为强化学习智能体的输入状态向量;同时将故障隔离方案、负荷转供路径、分布式电源调节参数等自愈控制措施定义为智能体动作空间。智能体通过与环境交互优化策略,其奖励函数综合考量停电时长、网损、电压偏移及设备损耗等多目标,例如缩短停电时间 1 分钟奖励 100 分,降低网损 1% 奖励 50 分,而电压越限或设备过载则施加负向惩罚。在某城市配电网的仿真实验中,经过 10 万次训练迭代后,智能体在复杂多重故障场景下的最优策略收敛率达 92%,实现停电区域减少 35%、网损降低 20%。在实际应用中,依托边缘计算节点实时采集 SCADA 数据,结合在线更新机制将训练后的强化学习模型部署至配电自动化主站,可适应新能源高渗透率及

负荷剧烈波动的现代配电网环境,实现自适应控制。

3.5 基于物联网与数字孪生的智能预测性自愈策略

在配电自动化领域,基于物联网架构与数字孪生技术的智能预测性自愈系统构建了多维度感知网络体系。该系统在变压器、断路器等关键配电节点部署了包含红外热成像仪、微振动阵列及 UHF 局部放电检测装置在内的智能传感终端群,通过 LoRaWAN 或 OPC UA 等工业级通信协议实现 μs 级数据采集与云端同步。其技术核心在于建立具有物理—信息深度融合特性的数字孪生体,该模型通过多物理场耦合算法整合 SCADA 实时数据、设备全生命周期档案及气象环境参数,形成具备自学习能力的动态仿真平台。采用改进型 Bi-LSTM 与 3D CNN 混合神经网络对海量运行数据进行特征提取与关联分析,可准确识别绕组热点演变、机械部件疲劳裂纹等渐进性故障特征。当数字孪生体预测到变压器油中溶解气体浓度异常增长等故障前兆时,系统将启动多级预警协议。在故障处置决策阶段,基于蒙特卡洛模拟的预演机制能够评估包括分布式电源调频、柔性负荷转移在内的多种控制方案,结合 NSGA-II 多目标优化算法生成兼顾供电可靠性与经济性的最优策略^[5]。

4 结束语

在数字化电力系统构建过程中,配电系统自动化、智能化提升是确保能源安全的关键。以智能终端多功能集成和多元算法融合为手段,提出具有高精度故障感知、快速定位和动态自愈等特征的配电系统解决方案。通过实验证实了分布式传感网络优势和智能优化策略效能,揭示出数据驱动和协同控制对提高配电网可靠性的核心意义。面对未来电网高比例新能源的接入,本研究可为配电系统自适应调控和弹性运行提供理论参考和技术范式,研究成果对于促进电力系统向高效、智能化转型具有实践参考价值。

参考文献:

- [1] 冯栋.智能配电管理系统开发与应用[J].设备监理,2025(02):34-37,42.
- [2] 陈娟,龙德全,贾湘豫,等.智能电网配电系统自动化控制研究[J].电气技术与经济,2025(04):334-336.
- [3] 赵璇.建筑综合体电气消防负荷供配电系统设计研究[J].电气技术与经济,2025(04):121-123.
- [4] 滕宗伯,郭倩.基于电气防火技术的建筑供配电系统设计研究[J].电气技术与经济,2025(04):171-173.
- [5] 王笑颜,张广仁,华亮,等.智能配电系统在建筑智慧运维中的应用探索[J].智能建筑电气技术,2025,19(02):69-73.