

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0102-05

基于 GPRS 网络的配电网接地线故障区段在线定位方法

张回兵¹, 鲍小锋², 许志松³, 娄 鹃¹, 张宗玲¹

(1. 云南电网有限责任公司玉溪易门供电局, 云南 玉溪 651100; 2. 云南电网有限责任公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100;
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650032)

摘要: 由于配电网接地故障时不同测点产生的暂态信号时频特征相关程度不同, 导致难以准确识别故障暂态时域特征, 从而使得故障区段定位移位差值较大, 定位效果不好。为解决这一问题, 提出并设计了一种基于 GPRS 网络的配电网接地线故障区段在线定位方法。先通过分析配电网出现接地故障时故障区段的电流变化特性, 构造等效暂态电路模型, 计算各个测点的综合时频特征分布相关系数, 结合原始暂态信号的指标量与故障区段的信号分量, 挖掘故障暂态时域特征, 然后采用 GPRS 网络构建故障定位节点部署模型, 获取供电区段暂态电流峰值, 并将暂态电流峰值突变点作为故障部署节点, 最后根据故障定位特征值, 求取测量点与故障点之间的距离, 实现故障区段的在线定位。实验结果表明, 所提方法得到的故障定位移位差值较小, 定位效果更好, 具有一定推广应用价值。

关键词: GPRS 网络; 配电网; 暂态特征; 故障信号; 故障区段

中图分类号: TP277; TM755

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)01-0102-05

Online positioning method for grounding wire fault section in distribution network based on GPRS network

ZHANG Huibing¹, BAO Xiaofeng², XU Zhisong³, LOU Juan¹, ZHANG Zongling¹

(1. Yuxi Yimen Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yuxi 651100, Yunnan, China;

2. Yuxi Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yuxi 653100, Yunnan, China;

3. Electric Power Science Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650032, Yunnan, China)

Abstract: Due to the varying degree of correlation between the time-frequency characteristics of transient signals generated at different measurement points during grounding faults in distribution networks, it is difficult to accurately identify the transient time-domain characteristics of faults, resulting in large displacement differences in fault section positioning and poor positioning effectiveness. To address this issue, a method based on GPRS network for online positioning of grounding wire fault sections in distribution networks is proposed and designed. Firstly, by analyzing the current variation characteristics of the fault section in the distribution network when a ground fault occurs, an equivalent transient circuit model is constructed, and the comprehensive time-frequency characteristic distribution correlation coefficients of each measurement point are calculated. Combined with the indicators of the original transient signal and the signal components of the fault section, the transient time-domain characteristics of the fault are excavated. Then, a fault location node deployment model is constructed using GPRS network to obtain the transient current peak in the power supply section, and the transient current peak mutation point is used as the fault deployment node. Finally, based on the fault location feature values, the distance between the measurement point and the fault point is calculated to achieve online positioning of the fault section. The experimental results show that the proposed method achieves a smaller difference in fault localization displacement and better localization effect, which has certain promotion and application value.

Keywords: GPRS network; distribution network; transient characteristics; fault signal; fault section

在配电网的实际运行过程中, 接地线故障经常发生, 对电力系统的正常运行构成严重威胁。传统的配电网接地线故障定位方法主要依靠人工检测和离线测试, 存在定位精度低、响应速度慢等问题。因此, 研究一种高效、准确的配电网接地线故障区段在线定位方法, 对提高配电网运行管理水平具有重要意义。

近年来, 众多学者开展这一领域的研究, 并已经取得一定进展。如文献[1]中构建了一个基于分区修改的边缘计算单元分配多目标优化模型, 应用数据驱动的智能算法来定位配电网中的故障段。该方法降低了故障定位系统的通信延迟, 提高了数据传输的安全性。但深度学习模型的准确性和泛化能力在很大程度上取决于训练数据的

收稿日期: 2024-04-29; 录用日期: 2024-05-30

基金项目: 云南省科技项目(YNKJXM20220162)

作者简介: 张回兵(1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 配网运维。

引用本文: 张回兵, 鲍小锋, 许志松, 等. 基于 GPRS 网络的配电网接地线故障区段在线定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 102-105, 136. (ZHANG Huibing, BAO Xiaofeng, XU Zhisong, et al. Online positioning method for grounding wire fault section in distribution network based on GPRS network[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 102-105, 136.)

质量和数量,导致定位准确度还有待提高。文献[2]中通过从配电网的故障数据中提取相关特征,使用类减少技术来减少数据集中的类别,结合调用频率的分析结果,构建了配电网故障定位模型。该方法通过减少数据集中的类别数量,降低了故障定位的复杂性,提高了处理效率。然而,如果数据丢失、异常或有噪声,可能会影响最终定位的准确性。文献[3]中使用特征提取和选择技术,从多维特征数据集中选择用于故障定位的最关键特征,并利用机器学习和深度学习等算法建立特征与故障位置之间的映射关系,由此实现故障定位。该方法通过利用多维特征信息,可以更全面地反映配电网的运行状态,减少故障定位耗时。但是在建立映射网络时,最佳阈值选择不当,严重影响故障定位精度。文献[4]中基于配电网的实时运行数据与历史数据构建了等效模型,并依据故障电流与功率变化理论,提出了负向功率故障定位算法。该算法在各种配电网配置和运行条件下都能表现出良好的性能,适用性较强,但该算法的性能在一定程度上取决于所建立的暂态相电压和电流等效模型的准确性。如果模型存在偏差,可能会影响故障定位的准确性。基于上述分析,为实现配电网故障区段的准确定位,本文提出并设计了一种基于GPRS网络的配电网接地故障在线定位方法,以期配电网故障定位技术的发展提供有力支持。

1 配网接地线故障定位设计

1.1 故障暂态时域特征识别

通过分析故障的瞬态特征,可提取出故障类型、故障位置等定位的关键信息,以为配电网故障测距提供数据基础。一般情况下,当配电网出现接地故障时,故障区段各线路的电流特征变化符合零序电流特征,其等效电路为暂态电路^[5],具体如图1所示。

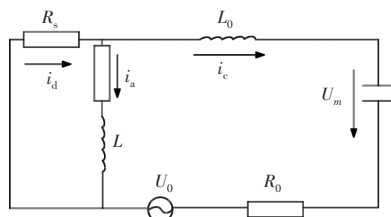


图1 接地故障等效电路下的暂态电路图

Fig. 1 Transient circuit diagram under equivalent circuit of ground fault

图中, i_d 、 i_c 、 i_a 分别表示故障电流,电感电流和容错电流; R_s 、 R_0 分别表示即时电阻与等效电阻; L_0 、 L 分别表示暂态电感与零序电感; U_0 表示端口电压。根据图1可知,配电网故障时的暂态电路模型可描述为

$$U_m = U_0(R_0 i_c + R_s i_a) + L_0 \frac{di_d}{dt} + \frac{1}{L} \int_0^t i_d dt \quad (1)$$

式中, t 表示故障时间。

利用 φ_s 表示故障信号的特征频段,则故障信号的幅频可表示为

$$A_a = \frac{\varphi_s \times \sum_{i=1}^N s_k}{U_m} \quad (2)$$

式中, N 表示零序电流信号的采样长度; s_k 表示复时频矩阵。

为便于比较不同测点之间信号时频特征的关联程度,从而提高故障定位的可信度^[6],计算测点 i 的综合时频特征分布相关系数,即

$$m_i = \frac{1}{A_a(1 + y_i)} \left(\sum_{j=1}^{S_0} H_1 - H_2 \right) \quad (3)$$

式中, y_i 表示模拟参数; S_0 表示测量点数量; H_1 表示相似度之和; H_2 表示模糊均值系数。

结合原始暂态信号的指标量与故障区段的信号分量,挖掘故障暂态时域特征,计算公式为

$$\mu_s = \frac{m_i \times \kappa_0}{\sqrt{\|k_c \times g_0\|^2}} / p_0 \quad (4)$$

式中, κ_0 表示接地线路阻值; k_c 表示原始暂态信号指标量; g_0 表示故障区段基函数; p_0 表示故障区段信号分量。

综合上述,通过分析配电网出现接地故障时故障区段的电流变化特性,构造等效暂态电路模型,然后以此为基础求取故障信号的幅频,识别故障暂态时域特征,为接下来的故障定位节点部署做准备。

1.2 故障定位节点部署

配电网接地线故障段的在线定位依赖于准确实时的故障数据。通过GPRS网络,故障定位节点可快速地将故障数据传输到定位系统,使系统能够及时了解故障的性质、位置和范围,为故障段的快速定位提供数据支持^[7]。本次利用GPRS通信模式实现配电网故障节点部署,其主要包括虚拟专网、传输通信子站和监控终端^[8],基于此组成故障定位节点自动化部署模型如图2所示。

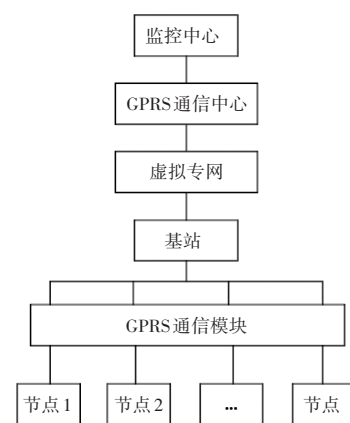


图2 基于GPRS通信的故障节点部署模型

Fig. 2 Deployment model of fault nodes based on GPRS communication

根据配网的结构与覆盖区域,结合监控中心实时监测当前系统的运行状态,并计算故障相位差^[9],具体公式为

$$\Delta\varphi_d = \frac{\mu_s \times \alpha_p}{g_d} \quad (5)$$

式中, μ_s 表示故障暂态时域特征; α_p 表示特征函数; g_d 表示暂态分量损耗。

采集的数据主要通过通信中心与虚拟专网传输至基站, 可通过对基站采集的数据进行聚类分析, 提取电网的采样电压与相电压, 即

$$\begin{cases} u_x = \frac{C_1 \Delta \varphi_d}{\sqrt{\beta_0}} \\ u_y = \frac{\Delta \varphi_d}{j_i} \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_1 表示初始覆盖故障范围; β_0 表示系数矩阵; j_i 表示比例系数。

然后, 利用 GPRS 通信模块中数据链接层的 PPP 协议, 将电压信号映射到特征频段内, 由此获取供电区段暂态电流峰值^[10], 即

$$M_l = \frac{u_x \times u_y}{b_1 \times b_2} \quad (7)$$

式中, b_1 、 b_2 分别表示上、下游监测点暂态电压有效值。

由于配电网出现接地故障时, 故障区段与相邻区段内的暂态电流会出现骤升或骤降现象, 同时, 其波形会出现振荡、尖峰等变化^[11]。因此, 本次将暂态电流峰值突变点作为故障部署节点, 以此实现接地故障测距。

1.3 接地故障距离计算

以上述为基础, 完成故障定位节点部署后, 开展接地故障距离计算设计。根据配电网暂态电路可知, 正常区段与故障区段的零序电压方向相反, 极性相同^[12], 若检测点位于故障点上游, 则两端测量点暂态分量之间差值的模为

$$R_m = M_l \times C_h \times \tau_0 \quad (8)$$

式中, M_l 表示暂态电压峰值; C_h 表示两端检测点的差异度; τ_0 表示随机矢量。依据各模态信号的带宽, 构造以下约束方程限制故障信号的频谱变化区间^[13], 具体表达式为

$$f_u = \sum_{i=1}^n \frac{R_m}{w_0 + v_0} \quad (9)$$

式中, n 表示区段数; w_0 表示模态信号混叠系数; v_0 表示二次惩罚因子。

当末端区段故障时, 接地处仅有一个测量点, 则该测量点在相位区间 $[0, 1]$ 内相位随时间变化的曲线可描述为

$$P_i = f_u \times g_s \quad (10)$$

式中, g_s 表示测量点相位离散序列。

本次对相位空间变异系数最高的点进行标定^[14], 计算出故障定位的特征值, 表达式为

$$h_j = P_i - \left(M^r + \frac{\rho S_i}{\theta} \right) \quad (11)$$

式中, M^r 表示可识别范围; ρ 表示时间常数; S_i 表示狄拉克函数; θ 表示单位矩阵。

最后, 采用下式计算测量点与异常点之间的距离^[15], 即

$$X = h_j \Delta \zeta / \sqrt{\frac{I_p}{e_s}} \quad (12)$$

式中, h_j 表示故障定位的特征值; $\Delta \zeta$ 表示转换频次; I_p 表示正序短路电流矢量; e_s 表示接地次数。基于区段故障定位节点部署结果, 设计故障信号频谱变化的约束方程, 结合故障定位特征值, 求取测量点与故障点之间的距离, 由此实现故障区段的在线定位。至此, 完成基于 GPRS 网络的配电网接地故障区段在线定位方法的设计。

2 实例论证分析

本次实验主要是对基于 GPRS 网络的配电网接地故障区段在线定位方法实际应用效果的分析与验证。为体现实验结果的真实性与可比性, 采用对比实验的方式对各种方法展开性能测试与分析, 并依据实验结果验证本文方法的有效性。

2.1 实验准备

实验以 10 kV 典型辐射状配电网模型作为研究对象, 该配电网由一条主线和 6 条支线组成, 主线全长约 15 km, 沿线设置 10 个支线点, 每个支线点通过支线连接不同的用户或配电设施, 其最长支线为 3 km, 最短支线为 0.5 km。支线的沿线安装了 50 座铁塔、20 座电缆井、30 个配电箱等设施。本配电网额定电压为 10 kV, 最大允许电压偏差为 $\pm 7\%$, 最小电压偏差为 -10% , 主线供电能力设计为 50 MW, 每条支线的平均供电能力为 5 MW。该电力系统接地故障线路模型如图 3 所示。

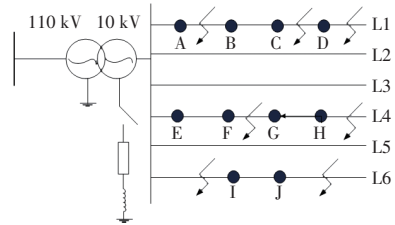


图3 配电网接地故障线路模型

Fig. 3 Model of grounding fault line in distribution network

如上图可以看出, 本文构建的配电网接地故障模型中的故障区段为 L1、L4 和 L6 线路。其中, A~J 为线路上的 10 个测量点, 且存在 7 处接地故障区段。配电网出现接地故障时系统的暂态参数如表 1 所示。

依据表 1 中的数据, 提取系统故障暂态时域特征, 并在暂态电压峰值突变处部署故障定位节点, 由此完成故障区段的定位。

2.2 实验说明

实验平台主要包括数据采集设备、GPRS 通信网络和故障数据处理三个部分, GPRS 通信网络负责配电网仿真系统与故障定位系统之间的数据传输, 故障数据处理系统负责接收 GPRS 网络传输的数据, 并对故障段进行在线定位, 实验环境如图 4 所示。

本次设置 GPRS 模块的通信频率为 1800 MHz、波特

率为 115 200 Baud,数据传输协议为 HTTP。通过以上实验准备和具体数据描述,全面展示基于 GPRS 网络的配电网接地故障段在线定位方法的实验过程和有效性。

表 1 系统暂态参数

Tab.1 System transient parameters

暂态参数	参数设置
故障发生时间	0.01 s
暂态电压峰值	12 kV
暂态电流峰值	1 kA
暂态电压振荡频率	500 Hz
暂态电流振荡频率	400 Hz
暂态持续时间	0.05 s
故障电阻	10 Ω
接地电阻	5 Ω
暂态过程中最大电压降	2 kV
暂态过程中最大电流升	200 A
邻健全线路暂态电压变化	+1 kV
相邻健全线路暂态电流变化	+50 A

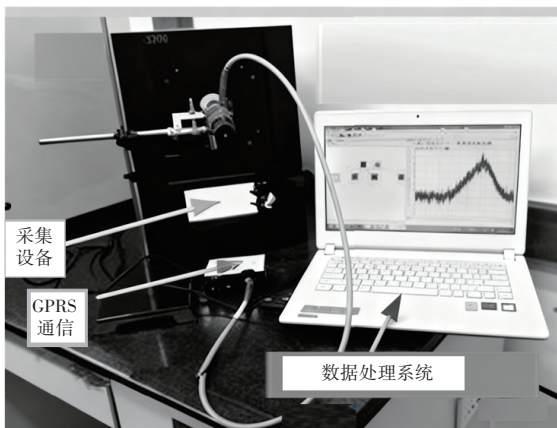


图 4 实验环境图

Fig. 4 Experimental environment diagram

2.3 定位结果与分析

基于以上实验准备与相关参数的设置,将本文设计的方法应用于图 3 所示的配电网接地故障区段定位中,并引入聚类分析算法(方法 1)、集成学习算法(方法 2)作为本文方法的对比方法,分别采用 3 种方法对该系统的故障进行定位,结果如表 2 所示。

表 2 配电网接地故障区段定位结果

Tab.2 Localization results of grounding fault sections in distribution networks

故障区段	距离上游测量点距离/m			
	实际值	方法 1 计算值	方法 2 计算值	本文方法计算值
1	9.63	5.02	9.25	9.63
2	10.21	10.97	10.36	10.20
3	8.56	8.22	7.26	8.54
4	22.35	23.57	24.38	22.30
5	12.78	12.90	12.70	12.79
6	4.29	3.08	4.15	4.29
7	2.37	2.17	2.96	2.37

由表 2 所示数据可知,本文方法得到的接地故障与测

量点的距离值与实际值更加接近,对于 7 个接地故障点,本文方法均能较为准确地实现故障定位,其测距偏差最大仅为 0.05 m,而对比方法 1 和方法 2 的定位偏差最大分别为 4.61 m 和 2.03 m。由此可以看出,在配电网接地故障区段定位中,本文方法取得的效果更好。

2.4 对比实验与分析

为进一步验证本文方法的可行性,基于相同的实验环境与条件,以系统的触发电压值为基准,将构建的三维虚拟接地故障输入仿真软件中,对线路位置进行标定,并采用 3 种方法进行接地故障区段定位测试,最终计算出定位移位差值,表达式为

$$L' = t'' \times \xi \times \psi \tag{13}$$

式中, t'' 表示触发时间; ξ 表示接地故障识别差; ψ 表示定位次数。定位移位差值表示的是定位方法输出结果与传感器定位值之间的偏离程度,数值越低,表明方法的定位结果越准确,定位效果越好。对比实验结果如图 5 所示。

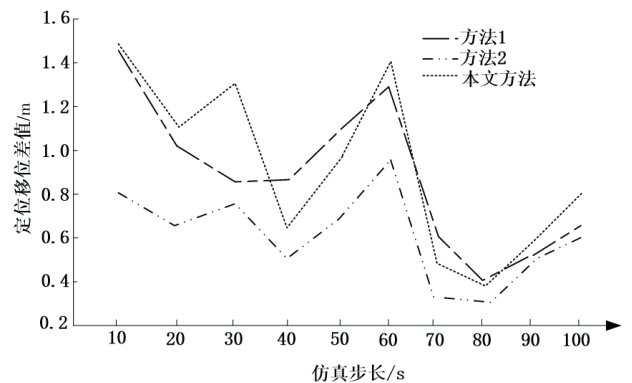


图 5 基于不同方法的接地故障区段定位结果

Fig 5 Grounding fault section localization results based on different methods

分析图 5 可知,本次所设计的接地故障区段定位方法最终得到的定位移位差值被很好地控制在 1.0 以下,而方法 1 和方法 2 的定位移位差值偏高,定位效果欠佳。由此说明在 GPRS 技术的支持下,本文提出的故障定位方法对于配电网接地故障区段定位具有更加优异的应用性能。

3 结论

本文研究的基于 GPRS 网络的配电网接地线故障段在线定位方法,将 GPRS 网络的实时通信优势与配电网故障定位技术相结合,实现了故障段的快速准确识别。该方法的应用价值显著,不仅为电力系统的稳定运行提供了强有力的支持,而且为促进配电网故障定位技术的创新发展以及未来智能电网的建设提供重要支撑。

参考文献

[1] 张大波, 李雪婷, 陶维青. 基于边缘计算和深度学习的有限信息配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 22-32.