

基于时域阻抗法的 35 kV 配电线路相间短路故障测距

秦焯焱¹, 王宾², 潘本仁³, 王冠男³

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电机系, 北京 100084;
3. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330000)

摘要: 为了解决 35 kV 高压配电网因感知量测手段不足和分支线路复杂性引起的故障测距难题, 提出一种基于单端信息的时域阻抗法。首先, 针对 35 kV 有分支线路配电网的相间短路故障特性, 建立了基于单端信息的故障测距模型, 并由故障后故障回路时域微分方程构成测距方程。然后, 将测距方程中的故障距离、分支电流和过渡电阻作为未知参数, 采用列文伯格-马夸尔特算法(Levenberg-Marquardt algorithm, LMA)进行非线性求解。并通过逐次搜索方法, 依次对线路各区段和分支进行故障定位, 确定故障所在位置。最后, 利用 PSCAD 搭建 35 kV 电网模型, 通过算例验证所提算法的可靠性和准确性。此方法只需要变电站出口测量的相电流和相电压作为输入, 无需增加额外设备, 就能够实现故障距离的精确计算和故障分支的有效识别。

关键词: 时域阻抗法; 35 kV 配电线路; 单端信息; 故障测距; 阻尼最小二乘法

Phase-to-phase short-circuit fault location in 35 kV distribution networks based on time-domain impedance method

QIN Yeyan¹, WANG Bin², PAN Benren³, WANG Guannan³

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330000, China)

Abstract: To address the fault location challenges in 35 kV distribution networks caused by insufficient sensing and measurement capabilities and the complexity of branched lines, a time-domain impedance method based on single-ended measurement is proposed. First, tailored to the characteristics of phase-to-phase short-circuit faults in 35 kV branched distribution networks, a fault location model based on single-ended measurement is established. The fault location equations based on the time-domain differential equations of the post-fault loop is derived. Then, the fault distance, branch current, and transition resistance in the fault location equations are treated as unknown parameters, a nonlinear solution is obtained using the Levenberg-Marquardt algorithm (LMA). Fault localization is then performed sequentially on each line segment and branch to determine the fault location through a step-by-step search method. Finally, a 35 kV network model is built in PSCAD to verify the reliability and accuracy of the proposed algorithm. This method requires only the phase current and phase voltage measurements at the substation feeder without the need for additional equipment, and can achieve precise fault distance calculation and effective identification of the faulted branch.

This work is supported by the Enterprise Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U23B20117).

Key words: time-domain impedance method; 35 kV distribution line; single-ended information; fault location; damping least-square method

0 引言

配电网中 35 kV 电压等级规模相对有限, 但作

为高压配电网的重要组成部分, 承担着核心的电能配送任务, 其一般配有 2 至 4 条分支线路, 但多数未配置配电自动化设备^[1-2]。由于其故障率较高, 巡线耗时长, 亟须对故障进行精准定位^[3-5]。

目前配电网故障测距方法主要有行波法^[6-9]和阻抗法^[10-14]。与 10 kV 中压配电线路相比, 35 kV

基金项目: 国家自然科学基金企业联合基金项目资助 (U23B20117); 国网江西省电力有限公司项目资助 (521820240011)

配电线路的感知与量测手段较为有限, 仅能通过变电站出口保护装置获取线路电流和电压信息, 因此受线路分支线等因素影响, 依赖故障点反射波头准确辨识的单端行波测距方法难以在 35 kV 配电线路保护装置上实施。

单端阻抗法从测距方程的形式上可以分为频域方程和时域方程, 其均面临着如下挑战: 1) 过渡电阻及测量信息不足, 导致测距方程受限于未知变量数量, 无法完备求解; 2) 分支线路干扰导致无法精准定位故障。针对上述问题, 专家针对不同测距原理, 提出了以下解决思路: 1) 针对频域相量方程, 采用相量同步测量装置(phasor measurement unit, PMU) 获取高精度故障信息进行测距^[10-12]。文献[11]利用 PMU 采集故障相角信息, 并增加相角相等的约束条件以提高测距准确性。然而, PMU 设备成本较高, 在现有 35 kV 配电网中尚未广泛应用。2) 针对时域方程, 通常利用故障分量信息推导时域微分方程作为测距方程, 并将过渡电阻、故障距离和其他未知信息统一作为待识别参数, 通过求解方程组得到测距结果^[13-18]。文献[16]通过拟合故障点上下游线电压分布特征, 联立方程组求解相间短路故障距离, 适用于多种故障类型。文献[17]利用系统简化后的时域线性微分方程作为测距公式, 并采用线性算法求解未知参数, 简化了计算过程, 但测距精度有所降低。此外, 这两种方法均未充分考虑分支线路的影响。文献[18]提出了含分支线路的推理判断机制, 但需要采集分支线路电流作为测距方程的输入, 不符合 35 kV 配电网的实际情况。

针对以上问题, 本文提出一种基于时域阻抗法的 35 kV 配电线路相间短路故障测距方法, 该方法通过列写故障回路的时域微分方程作为测距方程, 将故障距离、过渡电阻和分支电流作为未知参数进行求解, 无需增加额外设备即可精确求解故障距离, 同时通过区段逐次搜索的方法判断故障距离和分支位置。

1 测距原理分析

1.1 时域阻抗法的基本原理

图 1 所示为 35 kV 配电线路拓扑图, 系统有 4 条分支线路, 通过变电站降压变压器与 110 kV 系统相连, 变电站主变采用小电流接地方式, 其中性点通过消弧线圈接地。M 为变压器站端母线侧, u 、 i 分别为集电线路出口处测量到的故障相电压和电流。D、E、F、G 为集电线路上的分支点, 其将线路主干线分为 5 个区段, 每个区段的长度分别用 $L_1 - L_5$ 表示。从分支点上引出支路 1—支路 4, 对

应的电流为 $i_1 - i_4$ 。故障可能发生在线路出口(f1)、线路主干线(f2)、分支线路(f3)处。

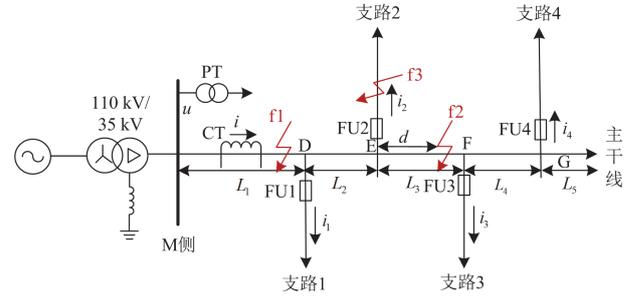


图 1 35 kV 配电线路拓扑图

Fig. 1 Topology of 35 kV distribution network

为研究相间短路故障的测距方法, 本文首先从简单系统模型出发, 分析基于变电站出口母线单端信息的时域阻抗法的基本原理, 并推导相间短路故障发生后线路电流与电压的微分方程。由于 35 kV 线路长度较短, 分布电容的影响可以忽略不计, 为降低求解难度和计算成本, 采用 R-L 线路模型对故障电路进行简化, 图 2 为配电网 BC 两相发生相间短路故障等效电路图^[12]。

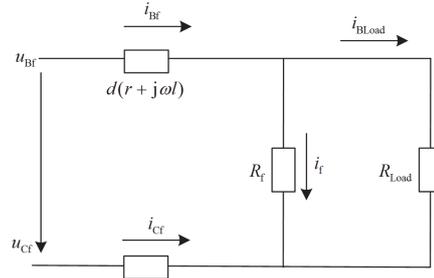


图 2 配电网相间短路故障等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of phase-to-phase short circuit in distribution network

图 2 中: d 为故障点到母线的距离; r 、 l 分别为系统线路单位长度电阻、电感; R_f 为简化为纯电阻性的过渡电阻; u_{Bf} 、 u_{Cf} 和 i_{Bf} 、 i_{Cf} 分别为变电站出口母线 B 相、C 相的故障电压和电流; i_f 为故障电流; R_{Load} 为故障点下游阻抗和负荷阻抗之和; i_{BLoad} 为 B 相从故障点流向故障点下游的电流。

在故障发生后, 由变电站出口母线、B 相故障上游阻抗、过渡电阻、C 相故障上游阻抗形成故障回路, 故障回路电流电压关系式的微分方程如式(1)所示。

$$u_{Bf} - u_{Cf} = d(i_{Bf}r + \frac{di_{Bf}}{dt}l) + i_f R_f - d(i_{Cf}r + \frac{di_{Cf}}{dt}l) \quad (1)$$

式(1)中故障距离和过渡电阻是未知量。理论上, 两个方程即可求解未知量, 因此仅需要选取两

个采样点的电流与电压数据, 联立方程组进行求解。

1.2 分支线路相间短路故障测距

对于如图 1 所示的含有分支线路 35 kV 配电线路, 由于各分支线路分流的作用, 主干线各区段的电流不同, 原有的式(1)已经不再适用。因此, 本节基于故障测距基本方程, 建立了考虑分支线路影响的相间短路故障测距模型。

通过分析可知, 故障点前的分支电流会影响测距结果, 而故障点后的分支电流则不会。因此故障点位置不同, 测距方程需要相应修正。根据故障发生位置的不同, 可将故障划分为干线故障和分支线故障。以下对不同故障位置的情况进行分析。

1) 干线故障

对于含有分支的配电线路, 需基于分段建模理论, 在分支点对主干线进行适当分区。对于含有 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个分支的配电网, 主干线将被划分为 $n+1$ 个区段。含分支配电网主干线相间短路等效电路如图 3 所示, 图中 i_{Bj} 、 i_{Cj} 分别表示各分支 B、C 相电流; L_j 表示主干线第 j 区段长度。

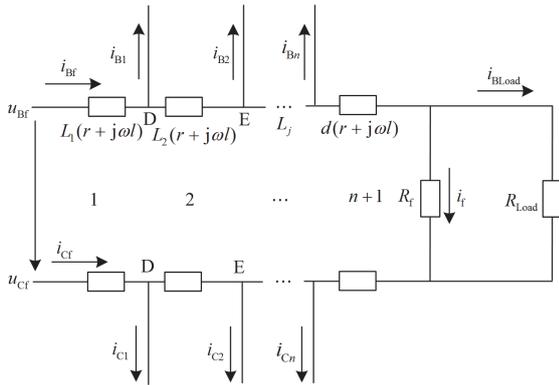


图 3 含分支配电网主干线相间短路等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of phase-to-phase short circuit on the main line in distribution network with branches

当故障发生在干线的第 1 区段时(如图 1 的 f1 处所示), 由于故障点之前没有分支线路, 无须修正, 测距方程与式(1)相同。

当故障发生在主干线的第 $m(m \in Z, 0 < m \leq n+1)$ 区段时, 故障回路结构未发生改变, 但是由于各分支的分流作用, 主干线各区段电流逐渐减小, 导致故障上游线路压降和故障点电流发生变化。

第 $j(j=2,\dots,n+1)$ 区段的电流表示为

$$\begin{cases} i_{Bj} = i_{Bf} - \sum_{j=2}^{n+1} i_{B(j-1)} \\ i_{Cj} = i_{Cf} - \sum_{j=2}^{n+1} i_{C(j-1)} \end{cases} \quad (2)$$

故障电流 i_f 即为第 m 区段干线电流, 如式(3)所示。

$$i_f = i_{Bfm} = -i_{Cfm} \quad (3)$$

修正后的故障回路电流电压关系为

$$\begin{aligned} u_{Bf} - u_{Cf} = & \sum_{j=1}^{m-1} L_j \left[i_{Bjf} r + \frac{di_{Bjf}}{dt} l \right] + d \left(i_{Bfm} r + \frac{di_{Bfm}}{dt} l \right) + i_f R_f - \\ & \sum_{j=1}^{m-1} L_j \left[i_{Cjf} r + \frac{di_{Cjf}}{dt} l \right] - d \left(i_{Cfm} r + \frac{di_{Cfm}}{dt} l \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)即为故障发生在主干线第 m 区段的测距方程表达式, 其中未知量包括故障距离、相间过渡电阻和故障点前各个分支电流。

2) 分支线故障

当故障发生在第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 条分支线路时, 虽然故障点位置改变, 但故障点前的主干线电流和电压分布保持不变, 仅故障点电流发生变化。根据式(4), 利用式(5)对故障电流进行修正, 可得到分支线路故障的测距方程, 其中未知量仍为故障距离、相间过渡电阻、前 $n-1$ 条分支线路的电流。

$$i_f = i_{Bf} = -i_{Cf} \quad (5)$$

本文算法仅利用母线处的测量数据, 通过故障后瞬时值构建故障回路方程, 理论上, 只需选取故障后与未知变量数目相等的采样点代入方程, 即可通过求解线性方程组计算故障距离。为提高测距精度和可靠性, 在实际操作中通常选取故障后稳态一个周期以上的数据进行计算。

对于采集了 p 组数据的 35 kV 配电线路基于单端信息故障测距的非线性方程组可表示为^[19]

$$\begin{cases} f_1(d, R_f, i_1, i_2, \dots, i_n) = 0 \\ f_2(d, R_f, i_1, i_2, \dots, i_n) = 0 \\ \vdots \\ f_p(d, R_f, i_1, i_2, \dots, i_n) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

记未知向量为 $\mathbf{x} = [d, R_f, i_1, i_2, \dots, i_n]$, 最终故障测距问题被转化为非线性方程组的求解问题, 记为

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}) \quad f_2(\mathbf{x}) \quad \dots \quad f_p(\mathbf{x})]^T \quad (7)$$

为了确定故障所在分支, 本文采用逐次搜索的方法^[20-21], 具体思路如下所述。

(1) 假设故障发生在第 1 个区段(f1), 利用式(1)求解故障距离, 若结果小于该区段长度 L_1 , 则故障位于第 1 区段, 求解结果即为故障距离; 否则, 故障可能位于支路 1 或干线第 2 区段。

(2) 假设故障位于第 2 区段或分支 1, 分别采用修正后的测距方程进行计算。若结果小于分支全长, 则故障位于该分支, 故障距离为 $L_1 + d$ 。

(3) 依次对所有分支和区段进行类似分析, 最终确定故障点所在的干线或分支位置。

1.3 故障距离求解算法

对于非线性模型的求解, 最简单的方法是利用泰勒公式将其近似为线性方程组, 并用线性最小二乘法进行求解, 但这种线性化的计算结果精度较低, 因此需要采用能够高精度求解非线性方程组的算法。目前常用的算法有经典牛顿-拉夫逊法(Newton-Raphson method, NR)、梯度下降法(gradient descent, GD)、高斯-牛顿法(Gauss-Newton iteration method, GN)等。这些算法都是局部收敛的迭代算法, 对初始值的依赖性较强, 而且要求雅可比矩阵在迭代过程中始终保持列满秩, 否则可能导致迭代无法收敛^[22]。式(6)所示的非线性方程组是通过将不同采样点的测量数据代入测距方程构建的, 因此会产生冗余方程, 导致雅可比矩阵奇异, 进而使迭代无法进行。

为此, 本文采用列文伯格-马夸尔特算法(Levenberg-Marquardt algorithm, LMA)来求解方程组。LMA 结合了 GD 和 GN 两种算法的优点^[23], 通过插值动态调节两种算法的特性, 从而提高了算法的鲁棒性。所提方法能够有效避免因初始值不当或雅可比矩阵奇异而导致的无法收敛问题, 使得方程在良态或病态下均能得到精确解^[24], 能有效解决求解过程中总是陷入局部极小值的问题, 从而实现更高的计算精度^[25]。

LMA 的核心是使计算值和测量值之间的残差平方和极小化, 通过最小化残差平方和来求解未知向量^[26-27]。

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (8)$$

满足使 $\mathbf{S}(\mathbf{x}^*) = \min \mathbf{S}(\mathbf{x})$ 的 \mathbf{x}^* 即为未知量的最优解。

LMA 的基本步骤如下所述^[28]。

- 1) 设定常数 β 、阻尼因子 μ 、增长因子 ν 。
- 2) 给定未知向量的近似值 \mathbf{x}_0 , 令迭代次数 $k=0$ 。
- 3) 计算第 k 次迭代的方程组 $\mathbf{f}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$, 目标函数 $\mathbf{S}_k = \mathbf{f}_k^T \mathbf{f}_k$ 。
- 4) 计算 \mathbf{f}_k 的雅可比矩阵 $\mathbf{A}_k = \nabla \mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$, 海森矩阵 $\mathbf{Q}_k = \mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k$; 下降方向 $\mathbf{g}_k = \mathbf{A}_k^T \mathbf{f}_k$; 增量矩阵 $\mathbf{p}_k = -(\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k)^{-1} \mathbf{g}_k$ 。
- 5) 利用第 k 次迭代的阻尼因子 μ_k 求解增量方程 $(\mathbf{Q}_k + \mu_k \mathbf{E}) \mathbf{p}_k = -\mathbf{g}_k$, 其中 \mathbf{E} 为单位矩阵。
- 6) 计算第 $k+1$ 次迭代的变量 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{p}_k$, 方程组 $\mathbf{f}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k+1})$, 目标函数 $\mathbf{S}_{k+1} = \mathbf{f}_{k+1}^T \mathbf{f}_{k+1}$ 。

7) 判断是否满足收敛条件, 若满足则输出结果 \mathbf{x}_{k+1} 。

8) 修正阻尼因子。判断 $\mathbf{S}_{k+1} < \mathbf{S}_k + \beta \mathbf{g}_k^T \mathbf{p}_k$ 是否成立, 若成立则令 $\mu_{k+1} = \frac{\mu_k}{\nu}$, 并进行步骤 9); 否则, 令 $\mu_{k+1} = \nu \mu_k$, 执行步骤 5)。

9) 令 $k = k + 1$, 继续执行步骤 3)。

1.4 判断伪故障点

在求解非线性方程组时, 可能出现多根解的情况, 此外, 随着配电系统分支线路的增多, 故障点可能出现多重匹配, 导致结果不唯一, 即出现“伪故障点”, 必须通过约束条件来判断和排除伪故障点。

首先, 故障距离不可能大于线路全长, 真实根 d 必然在故障区段 L_i 的范围内。其次, 分支线路的电流是从前一级主干线分流而来, 求解得到的分支电流一定小于前一级主干线的电流; 在一些分支线路上, 可能安装了故障指示器等设备, 可以通过采集电流峰值或有效值来进一步排除伪故障点。需要注意的是, 这些判断应考虑由于测量和求解误差带来的测距误差 ε , 因此, 判别表达式为

$$\begin{cases} 0 < d < (1 + \varepsilon)L_i \\ i_{Bi} < (1 + \varepsilon)(i_{Br} - i_{B(i-1)}) \\ I_{Bi_rms} < (1 + \varepsilon)I_{Bi_rms_mer} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{Bi_rms} 为电流有效值计算量; $I_{Bi_rms_mer}$ 为电流有效值实际测量量。

2 故障测距方法的实现

本文提出的方法只需要变电站出口保护装置测量的母线端故障数据, 因此可以将故障分支判断和故障精确测距功能集中在一个测距装置中。

结合以上原理和技术分析测距流程如图 4 所示。具体实现步骤如下所述。

步骤 1: 输入参数。录入系统拓扑结构、线路长度及线路单位阻抗等基础参数。

步骤 2: 数据采集与处理。故障发生后, 采集变电站出口母线处保护装置记录的电流、电压数据, 通过预处理去除异常数据并消除测量噪声。

步骤 3: 单一线路测距。若配电网为单一线路时, 利用式(1)求解故障点到母线的距离。

步骤 4: 多分支线路测距。若为多分支线路, 则通过故障区段逐次搜索的方法进行故障定位, 采用 LMA 精确求解故障距离。对于干线故障, 使用式(5)计算故障距离; 对于支路故障, 使用式(5)修正测距方程。

步骤 5: 伪故障点排除。当出现多个可能的结果时, 根据约束条件和边界条件, 判断伪故障点并排除, 最后输出测距结果。

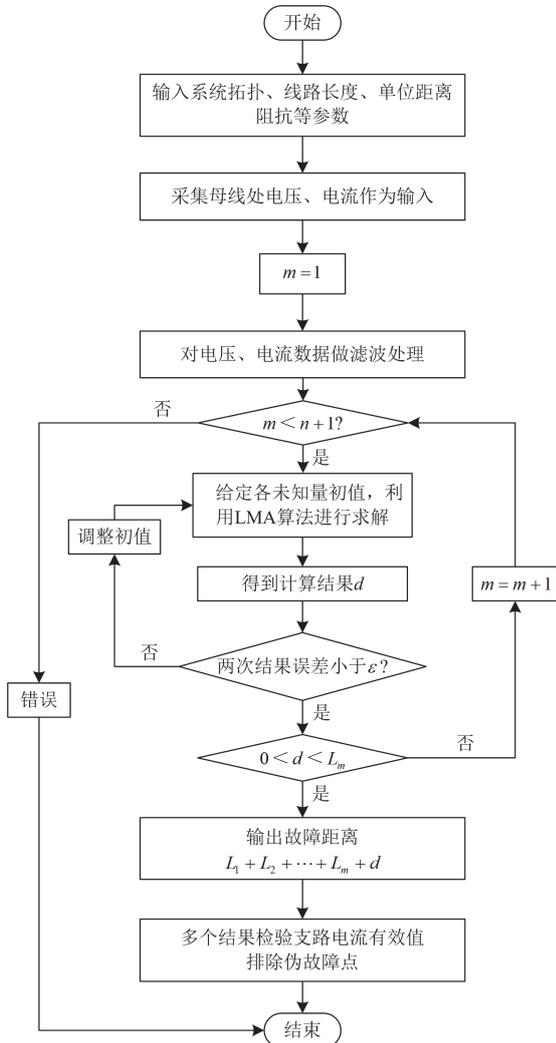


图 4 测距流程图

Fig. 4 Flowchart of fault location

3 仿真案例分析

按照图 1 所示的配电线路拓扑结构, 在 PSCAD 中搭建仿真算例模型。系统电压等级为 35 kV, 经消弧线圈接地, 补偿度为 5% 过补偿。系统包含 4 条分支线路, 将主干线分为 5 个区段, 设置主干线长度为 10 km, 每区段长度为 2 km, 每条分支线路长度为 2 km, 线路参数值如表 1 所示。

表 1 仿真线路参数

Table 1 Line parameters of simulation

	单位电阻/(Ω/km)	单位电感/(mH/km)	单位电容/($\mu\text{F}/\text{km}$)
正序	0.17	1.2096	0.0097
零序	0.23	5.4749	0.006

设采样率 $f_s = 10 \text{ kHz}$, 采集故障后两周波的稳态数据, 对不同故障位置的相间短路情况进行测距算法验证。图 5 和图 6 分别展示了一组故障发生在 f1 处, 故障距离为 1 km 时, 变压器出口母线处的电压、电流波形图。

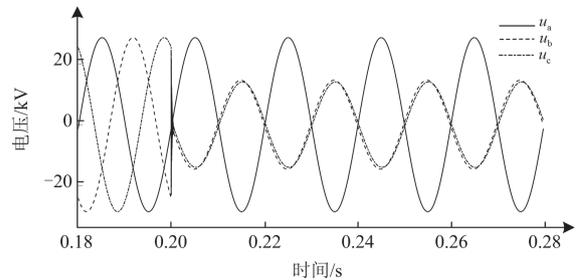


图 5 故障电压波形

Fig. 5 Voltage waveform after fault

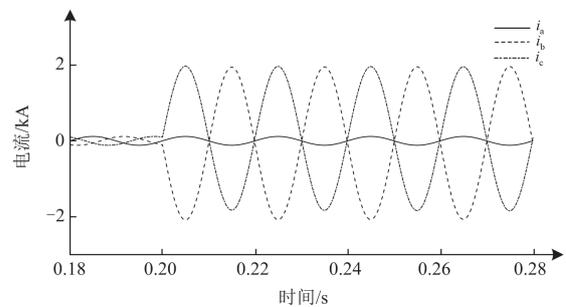


图 6 故障电流波形

Fig. 6 Current waveform after fault

1) 故障位置对故障测距的影响

设置故障发生在线路出口 f1 处, 模拟无分支线路相间短路故障情况, 不同故障距离下的测距结果如表 2 所示。

表 2 不同故障距离时 f1 处故障测距结果

Table 2 Fault location results at f1 for different fault distances

仿真故障距离/km	测距结果/km	测距误差/km	相对误差/%
0.3	0.313	0.013	4.2
1	1.041	0.041	4
1.7	1.769	0.069	4.1

由表 2 可以看出, 此种情况下的测距结果误差在 100 m 内, 相对误差约为 4%。

设置故障发生在主干线第三区段 f2 处, 故障点距离母线 5 km, 利用图 4 所示的流程图对故障点进行搜寻。

假设故障点位于主干线第 1 区段, 设故障距离初值为 5 km, 用 LMA 求出故障距离为 4.976 km, 与实际区段不符, 继续搜索; 假设故障点位于主干线第 2 区段, 计算得故障距离为 5.0106 km, 仍不

符合条件，继续搜索。以此类推，直至故障点位于主干线第3区段，符合输出条件，搜索完毕，得出测距结果为5.044 km。

表3为故障发生在主干线第3区段时，不同故障距离下的测距结果。

表3 不同故障距离时 f2 处故障测距结果

Table 3 Fault location results at f2 for different fault distances

故障点距离 母线的距离/km	测距结果/ km	测距误差/ km	相对误差/ %
4.3	4.342	0.042	0.97
5	5.044	0.044	0.88
5.7	5.746	0.046	0.81

设置故障发生在分支线路 f3 处，不同故障距离下的测距结果如表4所示。

表4 不同故障距离时 f3 处故障测距结果

Table 4 Fault location results at f3 for different fault distances

仿真故障距离/km	测距结果/km	测距误差/km	相对误差/%
2.3	2.352	0.052	2.26
3	3.054	0.054	1.80
3.7	3.756	0.056	1.51

结果表明，本文提出的方法能够识别故障所在的分支，并具有较高的测距精度。

2) 过渡电阻和采样频率对故障测距的影响

为分析过渡电阻对测距精度的影响，分别在 f1、f2、f3 处设置故障，并对应设置过渡电阻值为 30 Ω、300 Ω、3000 Ω。通过对比不同过渡电阻下的故障测距误差，结果表明测距误差随过渡电阻增大而显著增大。这是因为建模采用的 R-L 线路模型未考虑短路点过渡电阻导致的附加压降。当过渡电阻较大时，其对线路总电压降的贡献增加，导致测量点处的电压降变化微弱，使得基于 R-L 模型的测距算法产生偏差。

为进一步验证所提方法的可行性，对比不同采样率(1 kHz、10 kHz、20 kHz)下的测距结果误差，结果如图7所示。分析表明，采样率变化对测距误差影响有限。误差主要源于测距方程离散化过程中，采用差分方法近似连续微分项所引入的计算偏差。因此，在所测试的典型采样率范围内，采样率的选择对测距误差影响较小。

4 结论

本文提出了基于测量瞬时值的多分支配电网相间短路测距方法，通过故障区段逐次搜索的方法，对多分支复杂配电网的相间短路进行故障测距，主要结论如下所述。

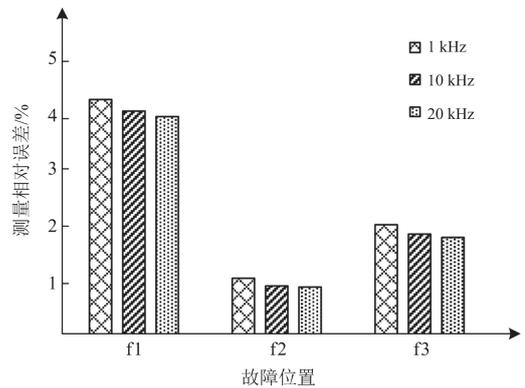


图7 不同采样率时故障测距结果

Fig. 7 Fault location results for different sampling rates

1) 仅需要变电站出口保护装置测量的相电流和相电压就可以完成相间短路故障测距，原理简单，准确度高。对于有分支的情况，通过逻辑推理进行判断，搜寻故障可能出现的位置，无需增加额外设备即可实现故障选线。

2) 选用量测点的瞬时值对测距方程求解，采用LMA算法进行非线性拟合求解，通过仿真验证证明算法的准确性。

参考文献

[1] 陶政臣, 高湛军, 见文号. 基于前后逐段逼近的含多分支配电网单相接地故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 110-119.
TAO Zhengchen, GAO Zhanjun, JIAN Wenhao. A single-phase ground fault ranging method based on back-and-forth segment-by-segment approximation for distribution networks with multiple branches[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 110-119.

[2] 成艳. 35 kV 配电网单相接地故障定位的系统研究和实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
CHENG Yan. Research and realization of signal-phase grounding fault location about 35 kV distribution networks[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.

[3] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于节点电压差值的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 106-116.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A novel fault location method employing node voltage difference value for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 106-116.

[4] 李成信, 刘国威, 玉聪, 等. 基于行波的高压输电线路故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 179-185.

- LI Chengxin, LIU Guowei, YU Cong, et al. A fault location method for high-voltage transmission lines based on traveling wave[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(2): 179-185.
- [5] 刘祥波, 王森, 高芳, 等. 基于幅值和斜率变化的配电线路故障录波数据同步方法研究[J]. *供用电*, 2024, 41(4): 19-27.
- LIU Xiangbo, WANG Sen, GAO Fang, et al. Research on synchronization method of fault recording data of distribution line based on amplitude and slope change[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(4): 19-27.
- [6] QUISPE J C, MORALES J, ORDUNA E, et al. Time-frequency multiresolution of fault-generated transient signals in transmission lines using a morphological filter[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 1-14.
- [7] SHU Hongchun, LIU Xuhan, TIAN Xincui. Single-ended fault location for hybrid feeders based on characteristic distribution of traveling wave along a line[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(1): 339-350.
- [8] 戴锋, 王政, 程孟晗, 等. 考虑短线路折反射的配电网故障定位研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(16): 122-130.
- DAI Feng, WANG Zheng, CHENG Menghan, et al. Study on fault location considering refraction and reflection of short lines in a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(16): 122-130.
- [9] 杨小磊, 袁明哲, 邹经鑫. 基于零模行波 S 变换时频矩阵的配电网单相接地故障定位方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(4): 93-101.
- YANG Xiaolei, YUAN Mingzhe, ZOU Jingxin. Accurate location method of single-phase-to-ground fault in distribution network based on zero-mode traveling-wave S-transform time-frequency matrix[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(4): 93-101.
- [10] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 54-62.
- QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 54-62.
- [11] 王小君, 任欣玉, 和敬涵, 等. 基于 μ PMU 相量信息的配电网故障测距方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(3): 810-818.
- WANG Xiaojun, REN Xinyu, HE Jinghan, et al. Distribution network fault location based on μ PMU information[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(3): 810-818.
- [12] 葛磊蛟, 刘航旭, 顾志成, 等. 基于 PMU 边缘终端的智能配电网台区相间短路故障定位方法[J]. *湖北电力*, 2021, 45(4): 8-15.
- GE Leijiao, LIU Hangxu, GU Zhicheng, et al. Location method of inter-phase short circuit fault in station area of smart distribution network based on PMU edge terminal[J]. *Hubei Electric Power*, 2021, 45(4): 8-15.
- [13] LIU Huirong, ZHENG Yuping, WU Tonghua, et al. Metallic short circuit fault location algorithm considering capacitance current based on differential equation[C] // 2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON), September 8-9, 2021, Haikou, China: 1749-1755.
- [14] 顾大德, 肖健, 韦梦立, 等. 含逆变型分布式电源的花瓣型配电网故障定位策略研究[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(11): 53-59.
- GU Dade, XIAO Jian, WEI Mengli, et al. Research on fault location strategy for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(11): 53-59.
- [15] HUANG Wanying, KACZMAREK R. Equivalent circuits for an SLG fault distance evaluation by curve fitting in compensated distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(2): 601-608.
- [16] 朱健, 董礼清, 薛晨, 等. 基于线电压分布特征的相间短路故障测距[J]. *供用电*, 2023, 40(1): 49-55.
- ZHU Jian, DONG Liqing, XUE Chen, et al. Phase to phase short circuit fault location based on line voltage distribution characteristics[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(1): 49-55.
- [17] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(12): 9-14, 20.
- SUONAN Jiale, WANG Zengchao, KANG Xiaoning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(12): 9-14, 20.
- [18] 贾清泉, 王振宇, 王宁, 等. 基于参数辨识的消弧线圈接地电网单相接地故障测距方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(23): 77-85.
- JIA Qingquan, WANG Zhenyu, WANG Ning, et al. A single-phase-to-ground fault locating algorithm for arc-suppression-coil earthed power distribution systems based on parameter estimation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(23): 77-85.
- [19] 曲振明, 王宾, 张慧芬. 中性点小电阻接地配电网多分支电缆线路单相接地故障测距[J]. *电气应用*, 2021,

40(5): 28-33, 38.

QU Zhenming, WANG Bin, ZHAN Huifen. Single phase grounding fault location of multi branch cable line in distribution network with neutral point via small resistance grounding[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(5): 28-33, 38.

[20] 戴志辉, 王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.

DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.

[21] 李永丽, 辛双乔, 李涛, 等. 基于多端信息的风电场集电线路单相接地故障定位算法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 2-11.

LI Yongli, XIN Shuangqiao, LI Tao, et al. Single phase grounding fault location algorithm of wind farm collector lines based on multi-terminal information[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 2-11.

[22] 王宾, 陆元园. 利用多时刻信息的 T 接线路单相接地故障单端测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2611-2618.

WANG Bin, LU Yuanyuan. Single terminal fault location to single-line-to-ground fault in T transmission line based on sequenced time session data[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2611-2618.

[23] 袁发庭, 陈步康, 陈炜, 等. 基于电磁-结构力场耦合的铁芯电抗器振动特性分析及优化方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2374-2385.

YUAN Fating, CHEN Bukang, CHEN Wei, et al. Vibration characteristic analysis and optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-structural force field coupling[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2374-2385.

[24] 燕思旻, 沈沉, 王雅婷. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的大规模系统无功补偿决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4864-4872, 5110.

YAN Simin, SHEN Chen, WANG Yating. Levenberg-Marquardt algorithm based VAR compensation method for large-scale power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4864-4872, 5110.

[25] 王宾, 任萱. 中性点经小电阻接地风电场集电线路单相接地故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2136-2144.

WANG Bin, REN Xuan. Single-line-to-ground fault location in wind farm collection line with neutral point grounding with resistor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2136-2144.

[26] 马伟, 裘愉涛, 丁冬, 等. 基于阻尼最小二乘法的单相接地故障定位方案[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 3049-3054.

MA Wei, QIU Yutao, DING Dong, et al. Single-phase grounding fault location scheme based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3049-3054.

[27] 黄雷, 包广清, 陈俊全. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的改进 Preisach 模型磁特性模拟与验证[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 6006-6015.

HUANG Lei, BAO Guangqing, CHEN Junquan. Magnetic property simulation and verification with improved Preisach hysteresis model based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6006-6015.

[28] 胡志刚, 花向红. Levenberg-Marquardt 算法及其在测量模型参数估计中的应用[J]. 测绘工程, 2008(4): 31-34.

HU Zhigang, HUA Xianghong. Levenberg-Marquardt algorithm and its application in parameter estimation of the surveying models[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2008(4): 31-34.

收稿日期: 2024-10-04; 修回日期: 2025-01-09

作者简介:

秦焯焯(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障分析与测距; E-mail: 22121494@bjtu.edu.cn

王 宾(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: binw-ec@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 张颖)