

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200045

考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位

陈燕擎¹, 刘涛¹, 韩文建¹, 张瑶¹, 徐晴¹, 徐皓远^{2,3}, 梁睿^{2,3}

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 配电网单相接地时故障特征弱, 难以用传统的行波测距或阻抗法进行精确定位。基于配电线路的分布参数模型, 充分考虑单相接地故障稳定后的分布式量测信号关系, 分析零序电流、线路参数与故障位置的内在联系。依据故障点前、后的故障电流信息构造故障定位函数, 并利用多测点、多时刻的量测数据, 构造故障定位矩阵。将求解故障定位矩阵转化成求解与之相对应的非线性方程组的最小二乘解, 使用混沌粒子群算法在故障区段内搜索故障点, 实现故障精确定位。在 PSCAD/EMTDC 中搭建典型 10 kV 城市配电网模型并模拟单相接地故障, 测距结果表明了方法的有效性和可靠性。

关键词: 零序电流; 分布测量; 配电网; 单相接地故障; 精确定位

Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the zero-sequence currents

CHEN Yanqing¹, LIU Tao¹, HAN Wenjian¹, ZHANG Yao¹, XU Qing¹, XU Haoyuan^{2,3}, LIANG Rui^{2,3}

(1. Jiangsu Frontier Electrical Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. School of Electrical and Power Engineering, China University Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangsu Province Laboratory of Mining Electric and Automation, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Traditional traveling wave or impedance methods are not appropriate for locating single-phase-to-earth faults since the fault features are not significant. Based on the distributed parameter model of the distribution line, the relationship between the distributed measurements in the steady state after a single-phase-to-earth fault occurs is considered, and the inherent relation between zero-sequence currents, line parameters and fault location is analyzed. Given the fault currents before and after a fault, a fault location formula is created, and a fault location matrix is constructed using multi-time and multi-point measurements. By transforming the solution to the fault location matrix into the least-squares solution to the corresponding non-linear equations, accurate fault location can be estimated by searching the fault point in the fault section with a chaotic particle swarm. A typical 10 kV distribution network is established by PSCAD/EMTDC and single-phase-to-earth faults are simulated. The calculation results show the effectiveness and reliability of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China in 2017 (No. 2017YFC0804400).

Key words: zero-sequence current; distribution measurement; distribution network; single phase to earth fault; accurate fault location

0 引言

随着我国经济的发展与城镇化水平的提高, 电

力工业取得了长足的进步, 配电系统规模不断扩大, 分支众多, 连接形式复杂^[1-4]。在我国, 10 kV 配电网大多为中性点非有效接地的小电流接地系统, 发生单相接地故障几率最高, 可达 80%以上^[5-6]。如不能及时清除故障, 易扩大为多相故障, 引发更严重的停电事故, 危及配电网安全运行, 影响社会生产生活稳定。

基金项目: 2017 年国家重点研发计划子课题项目资助 (2017YFC0804400); 江苏方天电力技术有限公司科技项目资助 (KJ201914)

近年来,小电流接地系统故障选线技术已经较为成熟,方法简单、可靠,在现场有很好的应用效果,因此,如何更进一步缩小故障范围,缩短故障查找时间,减小停电损失,加快供电恢复,成为众多学者关注的重点。

目前,对于配电网故障定位技术的研究可分为两大类:故障区段定位与故障精确定位。故障区段定位是在选线技术的基础上,通过故障点上、下游故障特征的差异判断故障区段。随着配网自动化的发展,配网中安装的故障指示器、馈线终端设备(Feeder Terminal Unit, FTU)等智能量测装置能实时提供配电网运行信息,为故障区段定位提供数据支持。文献[7]通过定义 FTU 的基波零序和暂态相电流故障方向辨别故障区段,并建立多指标决策优化模型提高方法的容错能力。文献[8]基于故障点上、下游零序电流重心频率的差异判定故障区段,并使用 K-means 聚类算法提高方法的容错性能。文献[9]定义了各馈线首端相电流的暂态有效能量,并基于有效能量循迹法实现单相接地故障区段定位。以上方法均需要高采样的测量设备,对于配电网来说,装设和运维成本很高,且仅用于故障区段定位,对于故障信息的利用不够充分。

故障精确定位是通过故障暂、稳态信息计算故障点的准确位置,从原理上看,大致可分为阻抗法、行波法、信号注入法与人工智能算法^[10-13]。行波法^[14-15]原理简单,但受限于配电网行波折反射复杂,波头识别困难,检测装置造价昂贵等问题,在实际现场中仍很难应用;信号注入法^[16-17]需要额外增加信号注入设备,成本较高,并且检测信号的注入可能导致故障的进一步扩大;人工智能方法^[18-19]的训练样本不易获取,基于仿真数据的训练模型在实际现场的应用效果仍需要进一步的观察。阻抗法通过求解故障线路阻抗确定故障位置,方法简单实用。文献[20]建立了包含故障距离和过渡电阻的节点阻抗矩阵,利用节点阻抗的物理意义构造测距方程,代入变电站出线的电压、电流计算故障位置。文献[21]基于不平衡功率构造测距方程,代入变电站电压、电流计算,能适用于多种故障类型。以上方法均只利用变电站处的信息推算故障点信息,受故障位置及数据波动的影响较大。

综上所述,现有的故障定位方法存在以下缺陷:通常利用线路两端故障信息定位,而在大多数情况下,故障点附近故障特征更明显;仅利用有限个测量设备所得信息,容错性较差;多数方法依赖于电压的获取,而在实际现场中电压的精确测量困难;此外,由于目前配电网测量设备的时钟同步性

差、通信可靠性低,导致数据常常出现波动,甚至是错误,而上述方法均依赖于数据的准确获取,适应性较差。

随着智能配网建设的不断深入,高精度的分布式量测设备逐渐进入电网。针对传统方法的缺陷,本文利用线路沿线量测数据,充分考虑电压、电流的映射关系,建立仅包含零序电流、线路参数与故障位置的定位方程。该方法无需测量零序电压,能抵抗一定程度的数据波动甚至错误;与传统方法相比,能实现更精确的故障定位。

1 故障精确定位方法

如图 1 所示,当线路上发生故障时,故障线路上安装的分布式量测设备能够记录多周期的故障电流波形,在实际中,故障电阻大多不稳定,零序电流的幅值不断波动;故障发生位置的不同也会使故障电流数据在幅值、相位方面呈现不同的表征,即多测点、多时刻的电流数据是故障信息在时间、空间两个维度的映射,能更精确地刻画故障位置。

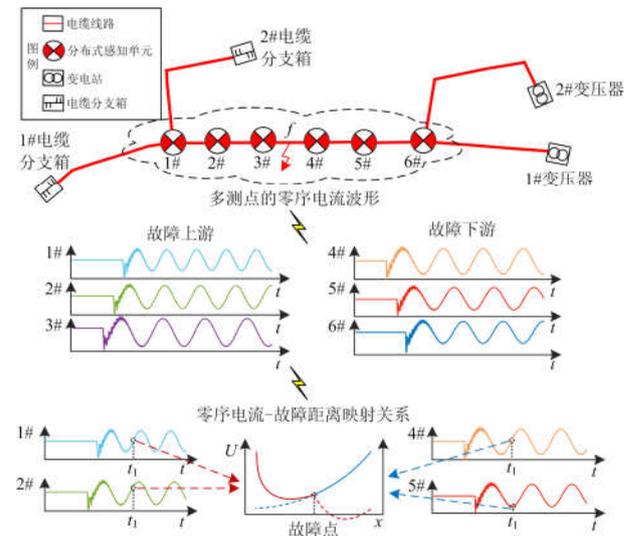


图 1 零序电流-故障距离映射关系图

Fig. 1 Mapping between zero sequence current and fault distance

1.1 故障定位函数矩阵

对于零序参数恒定的线路,在已知线路始、末端零序电压、电流相量的条件下,可分别利用式(1)和式(2)计算任意点 x 处的零序电压、电流相量^[22]。

$$\begin{cases} \dot{I}_{st}^{(0)}(x) = \dot{I}_{st}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)}x) - \frac{\dot{U}_{st}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh(\gamma^{(0)}x) \\ \dot{I}_{ed}^{(0)}(x) = \dot{I}_{ed}^{(0)} \cosh[\gamma^{(0)}(L-x)] - \frac{\dot{U}_{ed}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh[\gamma^{(0)}(L-x)] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{st}}^{(0)}(x) = \dot{U}_{\text{st}}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)}x) - Z_c^{(0)} \dot{I}_{\text{st}}^{(0)} \sinh(\gamma^{(0)}x) \\ \dot{U}_{\text{ed}}^{(0)}(x) = \dot{U}_{\text{ed}}^{(0)} \cosh[\gamma^{(0)}(L-x)] - Z_c^{(0)} \dot{I}_{\text{ed}}^{(0)} \sinh[\gamma^{(0)}(L-x)] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\dot{I}_{\text{st}}^{(0)}(x)$ 、 $\dot{I}_{\text{ed}}^{(0)}(x)$ 、 $\dot{U}_{\text{st}}^{(0)}(x)$ 与 $\dot{U}_{\text{ed}}^{(0)}(x)$ 分别代表从线路始端、末端推算至 x 处的零序电流、电压； $Z_c^{(0)}$ 、 $\gamma^{(0)}$ 分别为零序等值线路的特征阻抗和传播常数； L 代表线路长度。本文将 $\dot{U}_{\text{st}}^{(0)}(x)$ 和 $\dot{U}_{\text{ed}}^{(0)}(x)$ 二者之差的绝对值作为故障精确定位函数，如式(3)所示。

$$y(x) = \left| \dot{U}_{\text{st}}^{(0)}(x) - \dot{U}_{\text{ed}}^{(0)}(x) \right| \quad (3)$$

假设故障点上游的量测设备编号为 p_1, \dots, p_m ，下游的量测设备编号为 q_1, \dots, q_n ，数据时刻分别为 t_1, \dots, t_s ，为了便于分析，假定相邻设备的距离均为 L_s ，将线路中的 p_i 与 q_j 两点当作始、末端，将式(2)代入式(3)，构造故障定位函数 $y_{p_i q_j}(x)$ 如式(4)所示。

$$y_{p_i q_j}(x) = \left| \dot{U}_{p_i}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)}x) - Z_c^{(0)} \dot{I}_{p_i}^{(0)} \sinh(\gamma^{(0)}x) - \dot{U}_{q_j}^{(0)} \cosh[\gamma^{(0)}(L_{p_i q_j} - x)] + Z_c^{(0)} \dot{I}_{q_j}^{(0)} \sinh[\gamma^{(0)}(L_{p_i q_j} - x)] \right| \quad (4)$$

式中， $L_{p_i q_j}$ 为 p_i 与 q_j 之间的距离。考虑到分布式量测设备难以测量精确的电压相量 $\dot{U}_{p_i}^{(0)}$ 与 $\dot{U}_{q_j}^{(0)}$ ，可综合利用 p_i 、 q_j 及相邻的设备 p_{i+1} 、 q_{j-1} 的电流信息求解未知的零序电压。参照式(1)，以 p_i 作为线路首端计算 p_{i+1} 处的电流，以 q_j 作为线路末端计算 q_{j-1} 处的电流，如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_{p_{i+1}}^{(0)} = \dot{I}_{p_i}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)}L_s) - \frac{\dot{U}_{p_i}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh(\gamma^{(0)}L_s) \\ \dot{I}_{q_{j-1}}^{(0)}(x) = \dot{I}_{q_j}^{(0)} \cosh(\gamma^{(0)}L_s) - \frac{\dot{U}_{q_j}^{(0)}}{Z_c^{(0)}} \sinh(\gamma^{(0)}L_s) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)移相可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{p_i}^{(0)} = Z_c^{(0)} [\dot{I}_{p_i}^{(0)} \coth(\gamma^{(0)}L_s) - \dot{I}_{p_{i+1}}^{(0)} \operatorname{csch}(\gamma^{(0)}L_s)] \\ \dot{U}_{q_j}^{(0)} = Z_c^{(0)} [\dot{I}_{q_j}^{(0)} \coth(\gamma^{(0)}L_s) - \dot{I}_{q_{j-1}}^{(0)} \operatorname{csch}(\gamma^{(0)}L_s)] \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)，消掉 $\dot{U}_{p_i}^{(0)}$ 与 $\dot{U}_{q_j}^{(0)}$ ，得到仅包含电流相量与线路参数的故障定位函数，如式(7)所示。

$$y_{p_i p_{i+1} q_{j-1} q_j}(x) = \left| \dot{I}_{p_i}^{(0)} \cdot A(x) + \dot{I}_{p_{i+1}}^{(0)} \cdot B(x) + \dot{I}_{q_{j-1}}^{(0)} \cdot C(x) + \dot{I}_{q_j}^{(0)} \cdot D(x) \right| \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} A(x) = Z_c^{(0)} \cosh\{x - (i-1)L_s\} \coth(\gamma^{(0)}L_s) - Z_c^{(0)} \sinh\{x - (i-1)L_s\} \\ B(x) = -Z_c^{(0)} \cosh\{x - (i-1)L_s\} \operatorname{csch}(\gamma^{(0)}L_s) \\ C(x) = Z_c^{(0)} \cosh\{(i-1)L_s - x\} \operatorname{csch}(\gamma^{(0)}L_s) \\ D(x) = -Z_c^{(0)} \cosh\{(i-1)L_s - x\} \coth(\gamma^{(0)}L_s) + Z_c^{(0)} \sinh\{(i-1)L_s - x\} \end{cases} \quad (8)$$

式中， x 代表距线路始端的距离。此外，除了利用相邻的设备 p_{i+1} 、 q_{j-1} 的电流信息，还可以利用故障点上游 $p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+2}, \dots, p_m$ 与故障点下游 $q_1, \dots, q_{j-2}, \dots, q_{j+1}, \dots, q_n$ 中任意两个设备的信息，与 p_i 、 q_j 一起构建故障定位函数。因此利用故障线路多测点、多时刻的量测数据，可以构造多个故障定位函数，形成故障定位函数矩阵 \mathbf{Y} ，如式(9)所示。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{p_1 p_2 q_1 q_2 t_1}(x) & \cdots & y_{p_m p_{m-1} q_{n-1} q_n t_1}(x) \\ \vdots & & \vdots \\ y_{p_1 p_2 q_1 q_2 t_s}(x) & \cdots & y_{p_m p_{m-1} q_{n-1} q_n t_s}(x) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： \mathbf{Y} 的行表示同一时刻不同测点构造的故障定位函数；列表示不同时刻相同测点构造的故障定位函数。

特殊地，对于线路始端/末端，故障点的某一侧仅安装有一个量测设备，无法利用本线路四个位置的电流数据构造故障定位函数，可利用上/下级线路的数据实现函数构造；另外，对于近母线和近负载故障，可代入母线、变压器处电压互感器测量的电压值计算，则该侧无需存在两个量测设备，依旧可以实现故障定位。

1.2 考虑分布式零序电流关系的精确定位方法

矩阵 \mathbf{Y} 中的故障定位函数是基于线路两端推至故障点的零序电压相等这一原理构造的，理论上，在故障点处，故障定位函数的值为零。因此，对故障位置的求解可以转化成对以下非线性方程组的求解：

$$\begin{bmatrix} y_{p_1 p_2 q_1 q_2 t_1}(x) & \cdots & y_{p_m p_{m-1} q_{n-1} q_n t_1}(x) \\ \vdots & & \vdots \\ y_{p_1 p_2 q_1 q_2 t_s}(x) & \cdots & y_{p_m p_{m-1} q_{n-1} q_n t_s}(x) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (10)$$

该方程组为非线性超定方程组，没有办法得到精确解，但可以求解该方程组的最小二乘解，使观测值与估计值之间的差值尽可能的小。

假设 $f(\mathbf{X})$ 为非线性超定方程组，如式(11)所示。

$$\begin{cases} f(\mathbf{X}) = [f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_m(\mathbf{X})]^T \\ \mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n] \\ F(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) - \mathbf{L} \\ \mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_m] \\ S(\mathbf{X}) = \min \sum_{i=1}^m F_i^2(\mathbf{X}) = \|F(\mathbf{X})\|_2^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $n < m$; \mathbf{X} 为自变量向量; \mathbf{L} 为观测值向量; $F(\mathbf{X})$ 代表残差向量; $S(\mathbf{X})$ 代表残差平方和。按照上述定义, 可以得到式(11)非线性方程组对应的残差平方和函数 $S(x)$ 。

$$S(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^s y_{p_i, p_{i+1}q_{j-1}q'_{j,k}}^2(x) \quad (12)$$

将残差平方和函数 $S(x)$ 作为迭代寻优算法的目标函数, 使用混合粒子群算法(CPSO)在故障区段内搜索故障点的位置, 当满足收敛条件时, 停止循环, 输出故障位置。CPSO 的迭代计算公式如式(13)所示。

$$\begin{cases} v_{k+1} = wv_k + c_1n_1(p_{best,k} - x_k) + c_2n_2(g_{best,k} - x_k) \\ x_{k+1} = x_k + v_{k+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x_k 为当前的粒子位置; x_{k+1} 为迭代后的粒子位置; k 表示迭代次数; $p_{best,k}$ 为当前粒子的最优解位置; $g_{best,k}$ 为整个种群的最优解位置; v_k 、 v_{k+1} 为粒子速度; n_1 、 n_2 为 $[0,1]$ 之间的伪随机数; c_1 、 c_2 为加速度常数; w 为惯性权重。

综上所述, 故障精确定位流程如图 2 所示。

2 仿真实验

2.1 算例分析

图 3 为 10 kV 区域配电网电缆线路示意图, 电缆转弯、分支处设有电缆 T 形井, 电缆线路间隔一

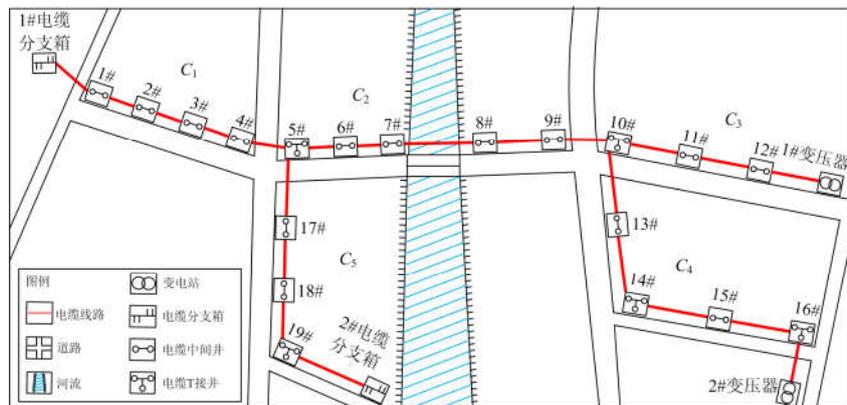


图 3 10 kV 区域配电网电缆线路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 10 kV regional distribution network cable lines

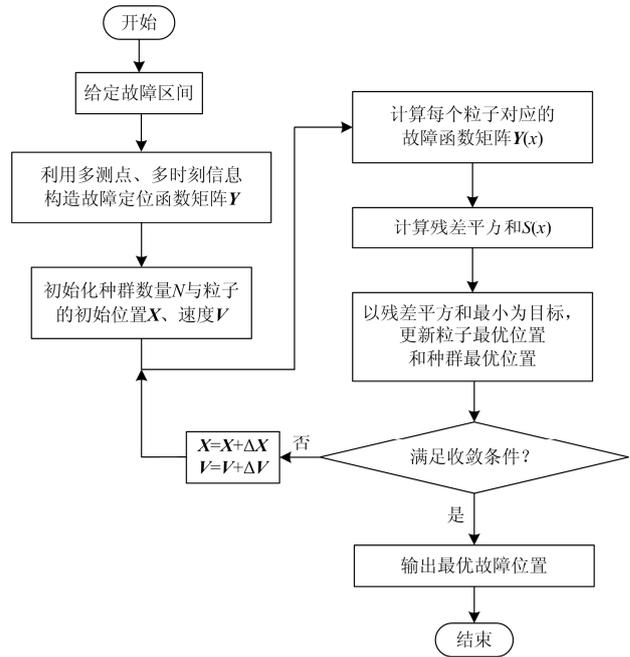


图 2 故障精确定位流程图

Fig. 2 Accurate fault location flow chart

定距离设有电缆中间井。2#电缆分支箱、1#、2#变压器均接有电缆线路, 为了便于仿真, 将其等效成恒定负载。考虑到电缆敷设在电缆沟中, 不易在线路上安装分布式量测设备, 可以将其安装在电缆分支箱、电缆 T 形井与电缆中间井中, 方便施工与维护, 并以井坑的编号作为量测设备的编号。为保证信号不失真, 一般现场设备的采样频率在 3.2 kHz 以上, 实际中具有录波功能的量测设备的采样频率大多为 4 kHz, 故本文采样频率参照实际设备设置。按图 3 所示在 PSCAD 中搭建 10 kV 配电网仿真模型, 包含 $C_1 \sim C_5$ 共 5 条电缆线路, 电缆型号为 YJV22-8.7/10 kV-3×300, 线路参数如表 1 所示。

表 1 电缆线路参数

Table 1 Cable line parameters

线路类型	$R^{(+)}/(\Omega/m)$	$XL^{(+)}/(\Omega/m)$	$XC^{(+)}/(M\Omega\cdot m)$
	6.5×10^{-5}	7.854×10^{-5}	5.488
电缆线路	$R^{(0)}/(\Omega/m)$	$XL^{(0)}/(\Omega/m)$	$XC^{(0)}/(M\Omega\cdot m)$
	9×10^{-5}	1.634×10^{-4}	8.162

在线路 C_2 中距始端 3.2 km 处设置 A 相电弧接地故障，故障点在 7#井坑与 8#井坑之间，电弧电阻的变化范围为 0~350 Ω ，如图 4 所示，故障初相角为 90°，中性点接地方式为不接地。

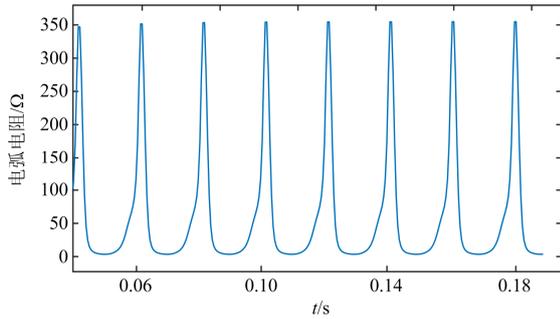
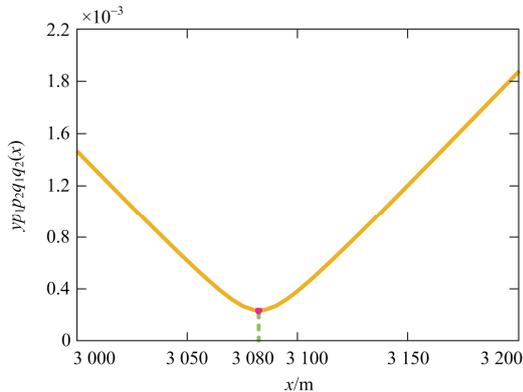


图 4 电弧电阻变化示意图

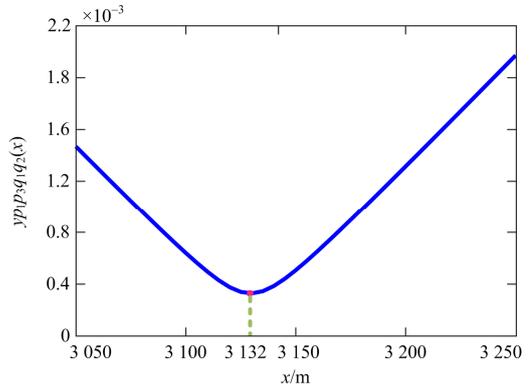
Fig. 4 Schematic diagram of arc resistance variation

假定已判断出故障点位于 7#和 8#之间，使用全周波傅里叶变换提取分布式量测设备记录的零序电流幅值、相位。故障点左侧设备的编号为 5#~7#，记为 $p_1 \sim p_3$ ，右侧设备的编号为 8#~10#，记为 $q_1 \sim q_3$ ，故障点左、右各有三个量测设备，利用同时刻的数据可以构造 9 个故障定位函数，图 5 为利用故障后 0.02 s 时的零序电流幅值、相位构造的故障定位函数曲线，表 2 为每个故障定位函数求解得到的故障点位置与定位误差。

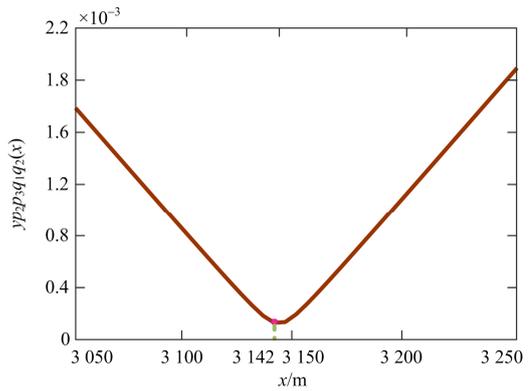
仅利用该时刻的数据，在 [2375, 3421] 范围内，利用 CPSO 算法搜索故障位置，CPSO 循环次数设置为 50 次，迭代完成后，残差平方和 $\min[S(x)] = 3.311 \times 10^{-7}$ ，对应的 $x = 3151$ ，即故障点距线路 C_2 始端 3.151 km，定位误差为 1.531%。



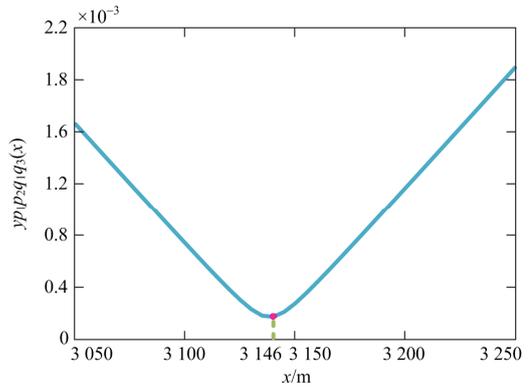
(a) 故障定位函数 $y_{p_1 p_2 q_1 q_2}(x)$ 的图像



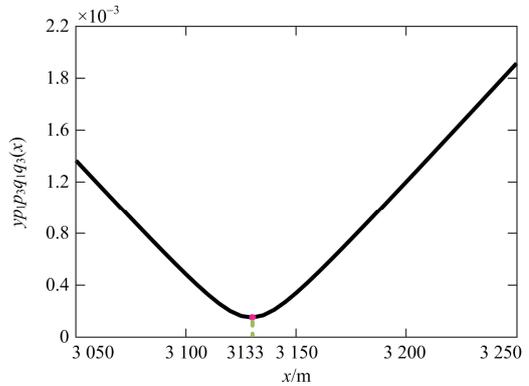
(b) 故障定位函数 $y_{p_1 p_3 q_1 q_2}(x)$ 的图像



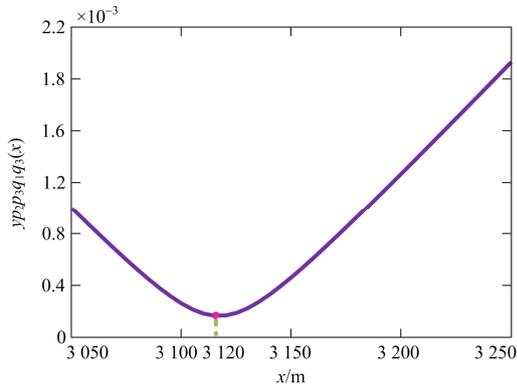
(c) 故障定位函数 $y_{p_2 p_3 q_1 q_2}(x)$ 的图像



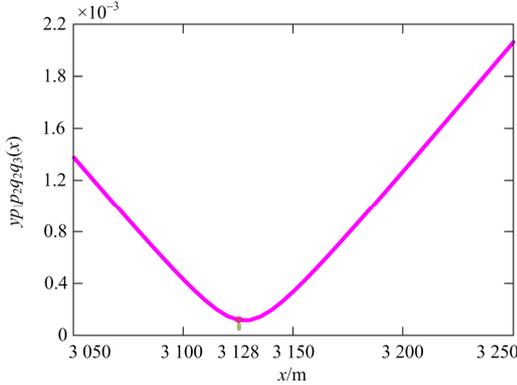
(d) 故障定位函数 $y_{p_1 p_2 q_2 q_3}(x)$ 的图像



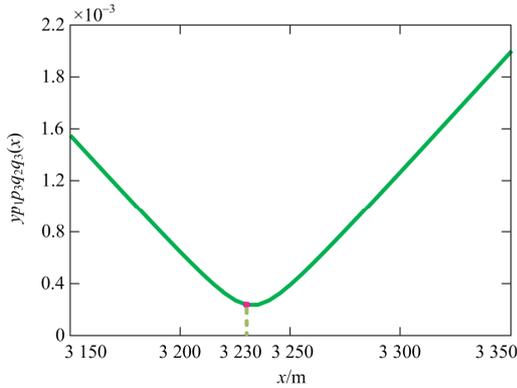
(e) 故障定位函数 $y_{p_1 p_3 q_1 q_3}(x)$ 的图像



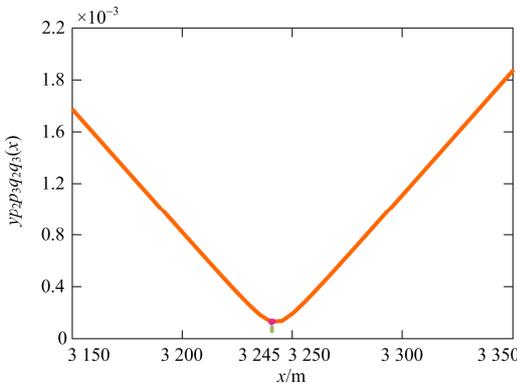
(f) 故障定位函数 $y_{p_2 p_3 q_1 q_3}(x)$ 的图像



(g) 故障定位函数 $y_{p_2 p_3 q_2 q_3}(x)$ 的图像



(h) 故障定位函数 $y_{p_1 p_3 q_2 q_3}(x)$ 的图像



(i) 故障定位函数 $y_{p_2 p_3 q_2 q_3}(x)$ 的图像

图5 故障定位函数曲线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fault location function curve

表2 不同故障定位函数求解得到的故障位置与定位误差

Table 2 Fault position and location errors obtained by solving different fault location functions

故障定位函数	故障位置	定位误差	故障定位函数	故障位置	定位误差
$y_{p_1 p_2 q_1 q_2}(x)$	3.080 km	-120 m	$y_{p_1 p_3 q_1 q_3}(x)$	3.133 km	-67 m
$y_{p_1 p_3 q_1 q_2}(x)$	3.132 km	-68 m	$y_{p_2 p_3 q_1 q_3}(x)$	3.120 km	-80 m
$y_{p_2 p_3 q_1 q_2}(x)$	3.142 km	-58 m	$y_{p_1 p_2 q_2 q_3}(x)$	3.128 km	-72 m
$y_{p_1 p_2 q_1 q_3}(x)$	3.146 km	-54 m	$y_{p_1 p_3 q_2 q_3}(x)$	3.230 km	+30 m
$y_{p_2 p_3 q_2 q_3}(x)$	3.245 km	45 m	—	—	—

逐渐增加时刻点的数量, 利用多时刻的数据更精准地刻画故障位置, 故障定位精度随数据量增加的变化曲线如图6所示。

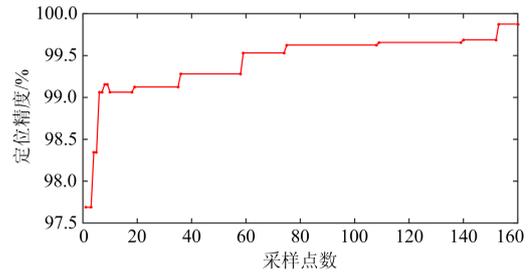


图6 故障定位精度随数据量增加的变化曲线

Fig. 6 Change curve of fault location accuracy with the increase of data quantity

当采用两个周期的数据构造故障定位函数时, 残差平方和 $\min[S(x)] = 2.165 \times 10^{-4}$, 对应的 $x = 3196$, 即故障点距线路 C_2 始端 3.196 km, 定位误差为 0.125%。

2.2 错误数据的影响

为了验证本文所提方法对错误数据的适应性, 按照 2.1 节所述在距线路 C_2 始端 3.2 km 处设置故障, 并对部分测点的数据进行平移、删除, 以模拟实际现场中可能存在的时钟同步误差与部分数据缺失, 对仿真数据的处理方法如下:

(1) 将原起始时刻后移 3 个时刻点作为新的起始时刻, 模拟 13.5° 的同步误差角。

(2) 每周期的仿真数据随机删除 8 个数据点, 模拟上传数据缺失。

使用文中方法计算故障位置, 并与基于双端电压、电流的阻抗法进行比较, 结果如表3所示。

可以看出, 使用多测点、多时刻电流信息计算故障位置可以抵抗部分测点数据的波动, 对定位精度的影响较小, 而使用传统双端阻抗法受影响较为明显, 且在数据缺失下, 所计算的故障位置越限, 不在故障区段内, 此时精确定位已毫无意义。

表 3 错误数据下的定位误差

Table 3 Positioning error under erroneous data

分布式 量测设备	错误 类型	定位误差			
		本文方法		双端阻抗法	
		正确 数据	错误 数据	正确 数据	错误 数据
5#	同步误差		-21 m		+45 m
	数据缺失	+4 m	-131 m	-6 m	越限
10#	同步误差		+12 m		-37 m
	数据缺失		-79 m		越限

2.3 故障条件的影响

为了测试不同中性点接地方式、故障初相角、故障过渡电阻对故障定位精度的影响，分别在线路 C₂ 上设置 A 相接地故障，故障条件如表 4 所示，利用两个周期的数据搜索故障精确位置，不同故障条件下的定位结果如表 4 所示。从表 4 的结果可以看出：本文所提方法能够适用于复杂故障条件，对于不同中性点接地方式、故障初相角、故障过渡电阻的单相接地故障，均能保证较高的故障定位精度。

表 4 不同故障条件下的定位结果

Table 4 Positioning results under different fault conditions

故障线路	故障设置	接地方式	故障初相角	故障电阻	故障位置	定位误差/%
C ₂	距 C ₂ 首端 4.8 km	不接地系统	0°	10 Ω	4.788 km	0.250 0
				500 Ω	4.805 km	0.104 2
				电弧(0~350 Ω)	4.796 km	0.083 3
			45°	10 Ω	4.788 km	0.250 0
				500 Ω	4.784 km	0.333 3
				电弧(0~350 Ω)	4.795 km	0.104 2
		90°	10 Ω	4.793 km	0.145 8	
			500 Ω	4.762 km	0.791 7	
			电弧(0~350 Ω)	4.784 km	0.333 3	
		谐振接地系统	0°	10 Ω	4.756 km	0.916 7
				500 Ω	4.834 km	0.708 3
				电弧(0~350 Ω)	4.783 km	0.354 2
45°	10 Ω		4.798 km	0.041 7		
	500 Ω		4.843 km	0.895 8		
	电弧(0~350 Ω)		4.828 km	0.583 3		
90°	10 Ω	4.808 km	0.166 7			
	500 Ω	4.775 km	0.520 8			
	电弧(0~350 Ω)	4.814 km	0.291 7			

3 结论

本文推导了零序电流、线路参数与故障位置的数学关系式，仅依靠故障零序电流信息即可实现故障定位，方法简单实用，具有较高的工程应用价值：

(1) 基于多测点、多时刻电流数据，构造故障定位函数矩阵，表征故障信息在时间、空间两个维度的映射关系，提高了对故障信息的利用率。

(2) 将残差平方和函数作为目标函数，使用混沌粒子群算法搜索超定方程组的最小二乘解，更精确地刻画故障位置。

经仿真验证，本文所提方法对于不同故障电阻、故障初相角的配电网单相接地故障，均能实现故障精确定位，且对于错误数据的抵抗能力强，具有较高的准确性与鲁棒性。

参考文献

- [1] 王秋杰, 金涛, 申涛, 等. 利用多因素降维的配电网区段定位完全解析模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 3012-3024.
WANG Qiujie, JIN Tao, SHEN Tao, et al. A complete analytic model of section location in distribution network based on multi-factor dimensionality deduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3012-3024.
- [2] DONG X Z, WANG J, SHI S X, et al. Traveling wave based single-phase-to-ground protection method for power distribution system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 75-82.
- [3] TENG J H, HUANG W H, LUAN S W. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution

- systems based on fault indicators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1653-1662.
- [4] 薛永端, 李天友, 李伟新, 等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 101-107.
XUE Yongduan, LI Tianyou, LI Weixin, et al. A novel method of transient analysis and faulty section location for single-phase earth fault in non-effectively earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 101-107.
- [5] 束洪春. 配电网故障选线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] 谭卫斌, 张维, 权立, 等. 一种新型配电网在线监测装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 158-165.
TAN Weibin, ZHANG Wei, QUAN Li, et al. Development of a new on-line monitoring device for distribution network lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 158-165.
- [7] 贾清泉, 郑旭然, 刘楚, 等. 基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5933-5941.
JIA Qingquan, ZHENG Xuran, LIU Chu, et al. Method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5933-5941.
- [8] 张姝, 杨健维, 何正友, 等. 基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2463-2470.
ZHANG Shu, YANG Jianwei, HE Zhengyou, et al. Fault section location of the distribution network based on transient center frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2463-2470.
- [9] 童宁, 张雪松, 赵波, 等. 基于相电流有效能量循迹法的配电网单相故障定位[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 140-150.
TONG Ning, ZHANG Xuesong, ZHAO Bo, et al. Fault location method for single-phase grounding fault in distribution network based on trajectory on trajectory of phase current valid energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 140-150.
- [10] 鹿洪刚, 覃剑, 陈祥训. 35 kV 电力电缆在线故障测距仿真研究[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 81-87.
LU Honggang, QIN Jian, CHEN Xiangxun. Simulative research of on-line fault location for 35 kV power cable[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 81-87.
- [11] 庞清乐, 刘昱超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 101-108.
PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xinian, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 101-108.
- [12] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [13] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.
MA Shicong, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.
- [14] ABDEL-FATTAH M F, LEHTONEN M. Transient algorithm based on earth capacitance estimation for earth-fault detection in medium-voltage networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(2): 161-166.
- [15] 贾惠彬, 赵海锋, 方强华, 等. 基于多端行波的配电网单相接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 96-100.
JIA Huibin, ZHAO Haifeng, FANG Qianghua, et al. A single-phase earth fault location method for distribution network based on multi-terminal traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 96-100.
- [16] 梁睿, 崔连华, 都志立, 等. 基于广域行波初始波头时差关系矩阵的配电网故障选线及测距[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3411-3417.
LIANG Rui, CUI Lianhua, DU Zhili, et al. Fault line selection and location in distribution power network based on traveling wave time difference of arrival relationships[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3411-3417.
- [17] 戚宇林, 成艳, 杨以涵, 等. 35 kV 配电网单相接地故障综合定位方法[J]. 电网技术, 2008, 37(2): 38-42.
QI Yulin, CHENG Yan, YANG Yihan, et al. A composite fault location method for single-phase fault in 35 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 37(2): 38-42.
- [18] 齐郑, 郑朝, 刘占波, 等. “S”信号定位方法的有效性分析及改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 101-104.
QI Zheng, ZHENG Zhao, LIU Zhanbo, et al. Effectiveness analysis and improvement of “S” signal fault location

- method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 101-104.
- [19] 周念成, 肖舒严, 虞殷树, 等. 基于质心频率和 BP 神经网络的配网故障测距[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4154-4166.
ZHOU Niancheng, XIAO Shuyan, YU Yinshu, et al. Fault location in distribution networks based on centroid frequency and BP neural networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4154-4166.
- [20] 束洪春, 董俊, 段锐敏, 等. 基于自然频率的辐射状配电网分层分布式 ANN 故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 83-89.
SHU Hongchun, DONG Jun, DUAN Ruimin, et al. A fault location method for radial distribution networks with layered and distributed ANN based on natural frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 83-89.
- [21] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于节点阻抗矩阵的配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3233-3240.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. A nodal impedance matrix based fault location algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3233-3240.
- [22] ALWASH S F, RAMACHANDARAMURTHY V K. New impedance-based fault location method for unbalanced power distribution systems[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(6): 1008-1021.
- [23] 林富洪, 王增平, 曾惠敏. 基于测距函数相位特性的 T 型高压线路故障定位原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 107-113.
LIN Fuhong, WANG Zengping, ZENG Huimin. A novel fault location algorithm based on phase characteristics of fault location function for three-terminal transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 107-113.

收稿日期: 2020-01-10; 修回日期: 2020-4-25

作者简介:

陈燕擎(1993—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为高电压检测技术及电缆故障定位。E-mail: 1345876155@qq.com

(编辑 周金梅)