

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240107

# 计及相位偏移的小电阻接地系统电压梯度测距方法

俞小勇, 李克文, 吴丽芳, 张碧芸

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 针对小电阻接地系统发生单相接地故障后保护直接跳闸导致的供电可靠性低的问题, 提出一种计及相位偏移的电压梯度测距方法。首先, 利用小电阻接地系统单相接地故障零序电流通回路, 分析了忽略零序电压相位偏移时和计及零序电压相位偏移时的零序电压幅值分布特征。其次, 针对不能忽略零序电压相位偏移的情况, 以母线出口处的零序电压为基准, 分析了故障线路任一点的零序电压相对量分布特征。最后, 在准确获取区段定位结果的基础上, 提出了基于零序电压相对量梯度的测距方法。仿真结果表明, 对于典型参数的架空线, 相比于传统的基于零序电压幅值梯度的测距方法, 利用零序电压相对量梯度后, 测距精度显著提高。

**关键词:** 小电阻接地系统; 故障测距; 电压分布特征; 零序电压相位偏移; 相对量

## Voltage gradient location method for a small resistance grounding system considering phase offset

YU Xiaoyong, LI Kewen, WU Lifang, ZHANG Biyun

(Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, China)

**Abstract:** There is a problem of the low reliability of power supply due to direct tripping of protection after a single-phase grounding fault in a small resistance grounding system. Thus a voltage gradient location method taking into account the phase offset is proposed. First, using the zero sequence current flow loop of a single-phase grounding fault in small resistance grounding system, the zero sequence voltage amplitude distribution characteristics are analyzed when the zero sequence voltage phase offset is ignored and when the zero sequence voltage phase offset is taken into account. Secondly, for the case when the zero sequence voltage phase offset cannot be ignored, the distribution characteristics of the relative amount of zero sequence voltage at any point of the fault line is analyzed by taking the zero sequence voltage at the exit of the bus as the reference. Finally, on the basis of accurately obtaining the sector location results, a location method based on the gradient of the relative amount of zero sequence voltage is proposed. Simulation results show that, for overhead lines with typical parameters, compared with the traditional location method based on zero sequence voltage amplitude gradient, the ranging accuracy is significantly improved by using the gradient of the relative amount of zero sequence voltage.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. GXKJXM20222183).

**Key words:** small resistance grounding system; fault location; voltage distribution characteristics; zero sequence voltage phase offset; relative amount

## 0 引言

小电阻接地系统具有保护配置简单、可及时切除故障线路、有效限制弧光接地过电压以及非故障相过电压幅度小等优点, 在我国的城市电缆网络中得到了广泛应用。但小电阻接地系统发生单相接地故障后, 保护直接跳闸, 造成供电中断, 通过人工

排查故障点耗时较长, 影响供电可靠性<sup>[1-2]</sup>。因此, 小电阻接地系统发生单相接地故障后, 迅速、准确地找到故障位置并及时处理, 对提高供电可靠性、减少停电损失具有重要意义<sup>[3-8]</sup>。

目前配电网中具有应用可行性的故障测距方法主要是行波法<sup>[9-11]</sup>和阻抗法<sup>[12]</sup>。单端行波法在配电网中应用时存在难以辨识首反射波波头的问题<sup>[13-14]</sup>。文献[15]给出了双端法根据初始行波到达时间确定故障点位置的公式, 同时提出了利用两端

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(GXKJXM20222183)

检测装置分别使用单端法，推导了根据初始行波波头和首反射波波头到达时间计算故障点位置的双单端法测距公式。多端行波法存在经济性与精度相矛盾的问题<sup>[16]</sup>，且多端装置的定时误差会引起测距误差，需解决多端装置的定时问题<sup>[17]</sup>。文献[18]提出了一种基于注入双极性矩形小波脉冲的时域反射电缆测距方法。通过相关分析，将行波往返时间转化为相关曲线峰值位置，从而实现波形的自动分析。根据故障信息来源数量不同，阻抗法可分为单端法<sup>[19]</sup>和双端法<sup>[20]</sup>。文献[21]利用故障点过渡电阻仅消耗有功功率的特性，构建了适用于不同故障类型的测距方程，但中性点接地方式会影响这种特性，从而会影响测距的准确性。文献[22]提出了一种可求解故障距离解析式的分布参数模型，但传统的测距方法相同，均假设故障线路的各项参数已知，但实际的线路参数与理论上的参数有所差异，测距结果不可避免地存在误差。

因此，本文针对小电阻接地系统发生单相接地故障后保护直接跳闸导致的供电可靠性低的问题，在分析计及相位偏移时的零序电压分布特征的基础上，提出一种基于零序电压相对量梯度的测距方法。仿真结果表明，该方法不受故障线路参数影响，测距准确性高。

## 1 小电阻接地系统单相接地故障零序电流和零序电压分布特征

### 1.1 小电阻接地系统单相接地故障零序电流分布特征

经小电阻接地的配电网发生不对称的单相接地故障后，将在故障点处产生零序电压源。配电网各处流经对地电容的电流和流经中性点小电阻的零序电流经故障点返回配电网，构成了零序电流通路，如图1所示。

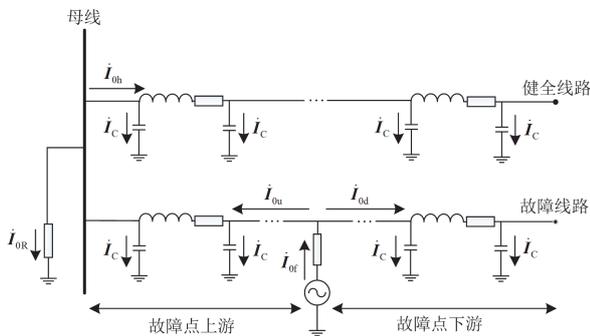


图1 零序电流通路

Fig. 1 Zero sequence current flow loop

图1中： $i_{0f}$ 为故障点零序电流； $i_{0r}$ 为流经中性点小电阻的零序电流； $i_{0h}$ 为健全线路零序电流之

和； $i_{0u}$ 为故障点上游零序电流； $i_{0d}$ 为故障点下游零序电流； $i_c$ 为单位对地电容电流。

从图1可以看出，故障线路任一点的零序电流 $i_{0x}$ (从母线到线路末端方向)与到母线距离 $x$ 的关系如式(1)所示。

$$i_{0x} = \begin{cases} -(i_{0R} + i_{0h} + i_c x) & (x < x_f) \\ i_c (l_f - x) & (x \geq x_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $x_f$ 为故障点到母线的距离； $l_f$ 为故障线路长度。

由于故障线路的对地电容电流远小于中性点小电阻的零序电流，所以可忽略故障线路的对地电容电流。因此，故障点上游线路的零序电流近似为恒定值： $-(i_{0R} + i_{0h})$ ，故障点下游线路的零序电流近似为0。

### 1.2 小电阻接地系统单相接地故障零序电压分布特征

线路两点之间的零序电压变化是由零序电流流过零序阻抗形成的，由于故障点上、下游的零序电流差异较大，因此故障点上、下游的零序电压分布特征也有较大差异，这是基于电压梯度的测距方法的实质。

根据零序电流的分布特征，可以推导得到故障点上游任两点之间的零序电压相量差，如式(2)所示。

$$\dot{U}_0(x_2) - \dot{U}_0(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} Z_0 (i_{0R} + i_{0h}) dx = Z_0 (i_{0R} + i_{0h})(x_2 - x_1) \quad (2)$$

式中， $Z_0$ 为单位零序阻抗。

由于忽略故障线路对地电容电流，故障点下游任两点之间的零序电压差值为0。

进一步推导得到故障线路任一点的零序电压，如式(3)所示。

$$\dot{U}_0(x) = \begin{cases} Z_0 (i_{0R} + i_{0h})x + \dot{U}_0(0) & (x < x_f) \\ \dot{U}_0(x) = \dot{U}_0(x_f) = \dot{U}_0(l_f) & (x \geq x_f) \end{cases} \quad (3)$$

### 1.3 忽略相位偏移时的零序电压幅值分布特征

传统的方法<sup>[23-24]</sup>往往忽略故障线路零序电压的相位偏移，即将式(3)简化为

$$U_0(x) = \begin{cases} |Z_0| |i_{0R} + i_{0h}| x + U_0(0) & (x < x_f) \\ U_0(x) = U_0(x_f) = U_0(l_f) & (x \geq x_f) \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出，对于故障线路任一点的零序电压幅值，其分布特征呈现从母线到故障点均匀增大，从故障点到线路末端基本不变，如图2所示。

从图2可以看出，小电阻接地系统发生单相接地故障后，故障点上、下游的零序电压幅值分布特征呈现不同的线性梯度，这一特征有利于设计测距算法。

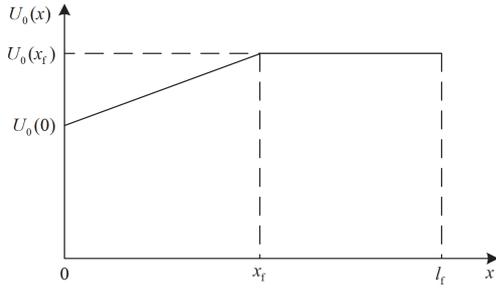


图2 忽略相位偏移时的零序电压幅值分布

Fig. 2 Zero sequence voltage amplitude distribution ignoring phase offset

#### 1.4 计及相位偏移时的零序电压幅值分布特征

为分析零序电流流过零序阻抗后引起的零序电压的相位变化, 建立单位配电线路等效电路图, 如图3所示。

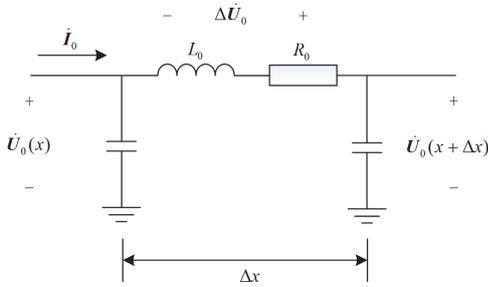


图3 单位配电线路等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram for unit distribution line

图3中:  $\dot{I}_0$  为流过单位零序阻抗的零序电流;  $R_0$  为单位零序电阻;  $L_0$  为单位零序电抗;  $\Delta\dot{U}_0$  为零序电流  $\dot{I}_0$  流过单位零序阻抗后产生的反相零序压降;  $\Delta x$  为单位长度线路。

根据基尔霍夫电压定律可得到零序电压相量的变化情况, 如式(5)所示。

$$\dot{U}_0(x + \Delta x) = \dot{U}_0(x) + \Delta\dot{U}_0 \quad (5)$$

式中,  $\Delta\dot{U}_0 = -\dot{I}_0(R_0 + j\omega L_0)$ 。

典型线路参数如表1所示。以典型参数的架空线为例, 当流过其零序阻抗的零序电流中感性或容性成分占比较高时,  $\Delta\dot{U}_0$  和  $\dot{U}_0(x)$  的相位近似反相或同相, 此时可以忽略零序电压的相位偏移。反之, 当流过其零序阻抗的零序电流中阻性成分占比较高时,  $\Delta\dot{U}_0$  和  $\dot{U}_0(x)$  的相位近似相差  $90^\circ$ , 此时不能忽略零序电压的相位偏移。

因此, 当故障点上游线路为典型参数的架空线时, 对于故障点上游线路零序电流(从母线到故障点方向)呈感性的不接地系统和呈容性的谐振接地系统, 可以忽略零序电压的相位偏移, 根据1.3节的

理论分析设计测距算法。反之, 对于故障点上游线路零序电流主要是阻性成分的小电阻接地系统, 则不能忽略零序电压的相位偏移。图4给出了阻性成分占比较高的零序电流连续流过两个单位配电线路时的零序电压相量变化情况, 以模拟小电阻接地系统故障点上游线路的零序电压相量变化情况。

表1 典型线路参数

Table 1 Typical line parameters

	$R_0/(\Omega/\text{km})$	$L_0/(\text{H}/\text{km})$
架空线	0.23	$5.47 \times 10^{-3}$
电缆	2.8	$1.11 \times 10^{-3}$

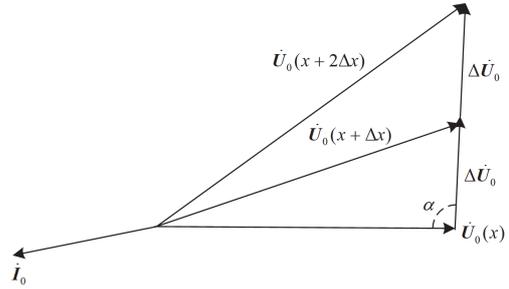


图4 故障点上游线路的零序电压相量变化图

Fig. 4 Zero sequence voltage phase change of the line upstream of the fault point

从图4可以看出, 当近似认为故障点上游线路零序电流  $\dot{I}_0$  幅值和相位均不发生变化时,  $\Delta\dot{U}_0$  在故障点上游线路幅值和相位亦均不发生变化, 根据余弦定理可得到故障点上游线路任一点的零序电压幅值, 如式(6)所示。

$$U_0(x) = \sqrt{U_0^2(0) + (\Delta U_0 x)^2 - 2U_0(0)\Delta U_0 \cos \alpha x} \quad (6)$$

式中:  $\Delta U_0$  为  $\Delta\dot{U}_0$  的幅值;  $\alpha$  为  $\dot{U}_0(0)$  和  $\Delta\dot{U}_0$  夹角。对于一确定系统中的确定故障,  $\alpha$  为一定值, 对于小电阻接地系统中典型参数的架空线发生的单相接地故障,  $\alpha \approx 90^\circ$ 。

由于近似认为故障点下游线路的零序阻抗上没有零序电流流过, 因此当计及零序电压的相位偏移时, 故障点下游线路零序电压幅值的分布特征仍然呈现从故障点到线路末端基本不变。

故障线路任一点零序电压幅值的分布如图5所示。从图5可以看出, 当计及零序电压的相位偏移时, 故障点上游线路零序电压幅值的分布特征并不呈现从母线到故障点均匀增加, 而是呈现较为复杂的非线性梯度。一方面, 由于实际测距中只能获取少数几个检测点的信息, 难以拟合非线性特征; 另一方面, 如果将零序电压幅值分布强行当作直线, 则测距结果难免会出现原理误差, 这给设计测距算法造成了一定困难。

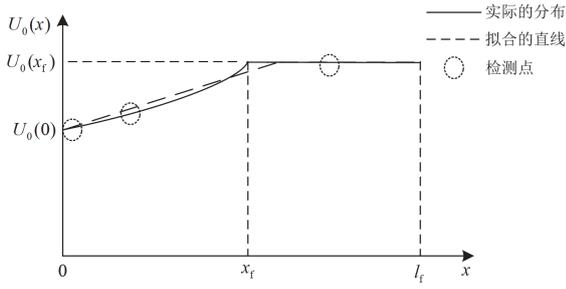


图5 计及相位偏移时的零序电压幅值分布

Fig. 5 Zero sequence voltage amplitude distribution considering phase offset

对于典型参数的电缆,分析过程类似,本文不再赘述。当系统是小电阻接地系统时,可以忽略故障点上游线路零序电压的相位偏移,根据1.3节的理论分析设计测距算法。

## 2 零序电压相对量及其分布特征

记标量  $\Delta U_0(x) = |\dot{U}_0(x) - \dot{U}_0(0)|$  为以母线出口处的零序电压为基准故障线路任一点的零序电压相对量,  $\Delta U_0(0) = 0$ 。

从图4可以看出,对于小电阻接地系统,由于忽略故障线路不跨越故障点的任两点之间的零序电流变化,因此故障点上游线路任一点的零序电压与母线出口处的零序电压的差相量相位均相同,幅值与该点到母线的距离成正比,如式(7)所示。

$$\dot{U}_0(x) - \dot{U}_0(0) = x\Delta\dot{U}_0 \quad (x \leq x_f) \quad (7)$$

从零序电压相对量表达式和式(7)可以推导出故障点上游线路零序电压相对量分布规律。

$$\Delta U_0(x) = x\Delta U_0 \quad (x \leq x_f) \quad (8)$$

即故障点上游任一点的零序电压相对量  $\Delta U_0(x)$  关于到母线距离  $x$  的分布是一条过原点的直线。

对于故障点下游线路,不论是何种接地系统和线路类型,故障点下游线路零序电压相对量从故障点到线路末端基本不变。

故障线路任一点的零序电压相对量  $\Delta U_0(x)$  如式(9)所示。

$$\Delta U_0(x) = \begin{cases} x\Delta U_0 & (x < x_f) \\ x_f\Delta U_0 & (x \geq x_f) \end{cases} \quad (9)$$

故障线路任一点的零序电压相对量,其分布特征呈现母线处为0,从母线到故障点均匀增大,从故障点到线路末端基本不变,如图6所示。与图5对比可以看出,相比于幅值的非线性梯度,零序电压相对量的线性梯度更有利于设计测距算法。

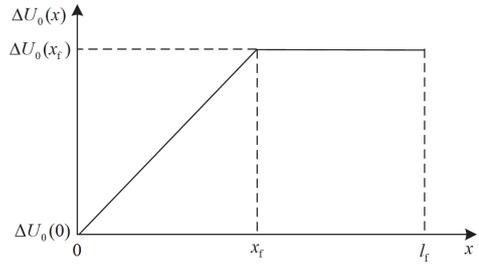


图6 零序电压相对量分布

Fig. 6 Relative amount distribution of zero sequence voltage

由于  $\Delta\dot{U}_0 = -\dot{I}_0(R_0 + j\omega L_0)$ , 故  $\Delta\dot{U}_0$  随中性点小电阻和故障点过渡电阻变化的规律与  $\dot{I}_0$  (从母线到故障点方向)类似。

当中性点小电阻增大时,  $\dot{I}_0$  中的阻性电流成分减少,感性电流成分增多,  $\Delta\dot{U}_0$  逆时针旋转。当中性点小电阻增大到一定程度时,系统会呈现不接地系统的特征,  $\Delta\dot{U}_0$  与  $\dot{U}_0(0)$  近似反相,故障点上游线路零序电压幅值和零序电压相对量的分布特征均呈现从母线到故障点均匀减小。随着中性点小电阻增大,  $\Delta\dot{U}_0$  幅值减小。  $\Delta\dot{U}_0$  随中性点小电阻增大时的变化趋势如图7所示。

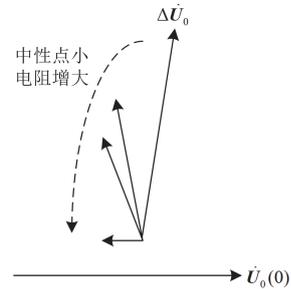


图7 中性点电阻变化时的单位压降相量图

Fig. 7 Phase diagram of unit voltage drop with a change in resistance at the neutral point

当故障点过渡电阻增大时,  $\Delta\dot{U}_0$  幅值减小,因过渡电阻变化不改变各零序电流相互之间的关系,故  $\Delta\dot{U}_0$  相位基本不变。  $\Delta\dot{U}_0$  随故障点过渡电阻增大时的变化趋势如图8所示。

从图7、图8可以看出: 1) 不同的中性点小电阻和故障点过渡电阻只影响  $\Delta\dot{U}_0$  的幅值和相位,而不改变零序电压相对量的分布规律; 2) 小电阻接地系统发生单相接地故障后,  $\Delta\dot{U}_0$  幅值远大于不接地系统,这一特征有利于提高基于此原理的故障测距方法在小电阻接地系统中应用时的测距可靠性; 3) 故障点过渡电阻较大时,故障点上、下游的零序

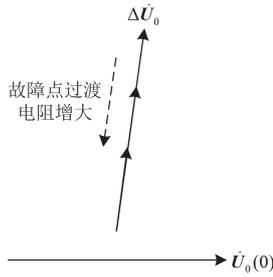


图8 过渡电阻变化时的单位压降相量图

Fig. 8 Phase diagram of unit voltage drop with a change in transition resistance

电压相对量梯度差异变得不明显, 这一特点在理论上不影响基于此原理的故障测距方法在高阻故障测距中的适用性, 但在实际应用时, 高阻故障信号微弱, 该方法存在一定的局限性。

特别地, 分支线任一点的零序电压相对量分布特征与故障点下游线路类似, 即当忽略分支线对地电容电流时, 近似认为分支线任一点的零序电压相对量与分支点处的零序电压相对量相同。

### 3 基于电压梯度的故障测距方法

从图2和图6可以看出, 不论是利用传统的零序电压幅值梯度还是利用零序电压相对量梯度, 求解故障点位置的核心都是首先求解故障点上游电压分布直线和下游电压分布直线表达式, 然后求解两直线交点。

#### 3.1 基于零序电压幅值梯度的测距方法在小电阻接地系统中的扩展

面向小电阻接地系统, 基于零序电压幅值梯度的测距方法的主要步骤如下所述。

1) 划分故障点上游检测点和下游检测点。小电阻接地系统发生单相接地故障后, 故障线路各检测点获取区段定位结果, 将各检测点划分为上游检测点和下游检测点。

2) 根据故障点上游检测点的数量, 选择相应的方法, 求解故障点上游线路零序电压幅值分布函数表达式  $y = k_u x + b_u$ 。

(1) 当故障点上游检测点数量大于2时, 以上游各检测点到母线的距离  $x_{ui}$  ( $i=1,2,\dots$ ) 为横坐标、各检测点测得的零序电压幅值  $U_0(x_{ui})$  为纵坐标, 借助最小二乘法拟合一次函数表达式  $y = k_u x + b_u$ , 其中,  $k_u$  和  $b_u$  的求解过程分别如式(10)和式(11)所示。

$$k_u = \frac{n(\sum x_{ui} U_0(x_{ui})) - (\sum x_{ui})(\sum U_0(x_{ui}))}{n(\sum x_{ui}^2) - (\sum x_{ui})^2} \quad (10)$$

$$b_u = \frac{(\sum x_{ui}^2)(\sum U_0(x_{ui})) - (\sum x_{ui})(\sum x_{ui} U_0(x_{ui}))}{n(\sum x_{ui}^2) - (\sum x_{ui})^2} \quad (11)$$

(2) 当故障点上游检测点数量等于2时, 以两检测点到母线的距离  $x_{u1}$ 、 $x_{u2}$  为横坐标, 两检测点测得的零序电压幅值  $U_0(x_{u1})$ 、 $U_0(x_{u2})$  为纵坐标, 通过式(12)和式(13)求解  $k_u$  和  $b_u$ 。

$$k_u = \frac{U_0(x_{u2}) - U_0(x_{u1})}{x_{u2} - x_{u1}} \quad (12)$$

$$b_u = U_0(x_{u1}) - k_u x_{u1} \quad (13)$$

(3) 当故障点上游检测点数量等于1时, 首先需要借助该检测点测得的零序电流幅值  $I_0(x_{u1})$  和事先获取的单位零序阻抗模值  $|Z_0|$ , 通过式(14)求解  $k_u$ 。

$$k_u = I_0(x_{u1}) |Z_0| \quad (14)$$

然后以该检测点到母线的距离  $x_{u1}$  为横坐标、该检测点测得的零序电压幅值  $U_0(x_{u1})$  为纵坐标, 通过式(13)求解  $b_u$ 。

(4) 当故障点上游检测点数量等于0时, 无法利用零序电压幅值梯度设计测距算法。

3) 求解故障点下游零序电压幅值分布函数表达式  $y = k_d x + b_d$ 。

(1) 当故障点下游检测点数量大于等于2时, 下游分布函数表达式求解方法与上游检测点数量大于等于2时的分布函数表达式求解方法基本相同。

需要说明的是, 为充分利用各检测点信息, 减轻单一检测点在实际测距中可能的测量误差对测距可靠性的影响, 当故障点下游检测点数量大于等于2时, 将下游零序电压幅值分布函数当作一  $|k_d|$  极小的一次函数  $y = k_d x + b_d$  求解。

(2) 当故障点下游检测点数量等于1时, 令  $k_d = 0$ 、 $b_d = U_0(x_{d1})$ , 其中  $U_0(x_{d1})$  为该检测点测得的零序电压幅值。

(3) 当故障点下游检测点数量等于0时, 同样无法利用零序电压幅值梯度设计测距算法。

4) 联立上、下游直线表达式, 求解故障点位置, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} y = k_u x + b_u \\ y = k_d x + b_d \end{cases} \quad (15)$$

式(15)的解即为故障点到母线的距离。

#### 3.2 基于零序电压相对量梯度的测距方法

根据本文第2节零序电压相对量的表达式, 基于零序电压相对量梯度的测距方法有两个基础技术条件: 1) 实际测距中, 具有高精度对时功能的检测点才能视作有效检测点(本小节所述“检测点”均指

有效检测点); 2) 母线出口处必须设有检测点。

基于零序电压相对量梯度的测距方法的主要步骤如下所述。

1) 步骤 1) 与 3.1 节基于零序电压幅值梯度的测距方法中的步骤 1) 基本相同。

2) 根据故障点上游检测点的数量, 选择相应的方法, 求解故障点上游线路零序电压相对量分布函数表达式  $y = k_u x + b_u$ 。

(1) 当故障点上游检测点数量大于 2 时, 此时有一检测点为母线出口处检测点。令  $\Delta U_0(x_{u1}) = 0$ , 根据母线出口处检测点测得的零序电压相量  $\dot{U}_0(x_{u1})$  和上游其余各检测点测得的零序电压相量  $\dot{U}_0(x_{ui})(i=2,3,\dots)$ , 通过零序电压相对量表达式计算其余各检测点的零序电压相对量  $\Delta U_0(x_{ui})$ 。以各检测点到母线的距离  $x_{ui}(i=1,2,\dots)$  为横坐标、各检测点的零序电压相对量  $\Delta U_0(x_{ui})$  为纵坐标, 借助最小二乘法拟合一次函数表达式  $y = k_u x + b_u$ , 其中,  $k_u$  和  $b_u$  的求解过程如式(16)和式(17)所示。

$$k_u = \frac{n(\sum x_{ui} \Delta U_0(x_{ui})) - (\sum x_{ui})(\sum \Delta U_0(x_{ui}))}{n(\sum x_{ui}^2) - (\sum x_{ui})^2} \quad (16)$$

$$b_u = \frac{(\sum x_{ui}^2)(\sum \Delta U_0(x_{ui})) - (\sum x_{ui})(\sum x_{ui} \Delta U_0(x_{ui}))}{n(\sum x_{ui}^2) - (\sum x_{ui})^2} \quad (17)$$

同样需要说明的是, 为充分利用各检测点信息, 当故障点上游检测点数量大于 2 时, 将上游零序电压相对量分布函数当作一  $|b_u|$  极小的一次函数  $y = k_u x + b_u$  求解。

(2) 当故障点上游检测点数量等于 2 时, 此时有一检测点为母线出口处检测点。令  $b_u = 0$ , 根据母线出口处检测点测得的零序电压相量  $\dot{U}_0(x_{u1})$  和另一检测点测得的零序电压相量  $\dot{U}_0(x_{u2})$ , 计算另一检测点的零序电压相对量  $\Delta U_0(x_{u2})$ 。以另一检测点到母线的距离  $x_{u2}$  为横坐标、另一检测点的零序电压相对量  $\Delta U_0(x_{u2})$  为纵坐标, 通过式(18)求解  $k_u$ 。

$$k_u = \frac{\Delta U_0(x_{u2})}{x_{u2}} \quad (18)$$

(3) 当故障点上游检测点数量等于 1 时, 此时只有母线出口处设有检测点。令  $b_u = 0$ , 借助母线出口处检测点测得的零序电流幅值  $I_0(x_{u1})$  和事先获取的单位零序阻抗模值  $|Z_0|$ , 通过式(14)求解  $k_u$ 。

3) 步骤 3)、4) 与 3.1 节基于零序电压幅值梯度的测距方法中的步骤 3)、4) 基本相同, 区别仅在于利用的特征量不同。

配电线路普遍含有分支线, 一方面, 当主干线路故障时, 根据第 2 节理论分析, 可将分支线上的检测点视作位于主干线路分支点处, 并根据区段定位结果, 将其划分为故障点上游或下游检测点, 以充分利用配电自动化系统信息, 提高测距可靠性。另一方面, 若分支线末端有检测点, 本节所提方法亦可以完成对分支线故障的测距, 即将从母线至故障分支线末端的检测点划分为故障点上游或下游检测点, 将其余检测点视为分支线上的检测点。

## 4 仿真实验

为了验证传统的基于零序电压幅值梯度的测距方法扩展到小电阻接地系统的适用性以及本文所提基于零序电压相对量梯度的测距方法的正确性和优越性, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建 10 kV 经小电阻接地的单端辐射状配电网模型。

系统主变为 Y- $\Delta$  接法的 110 kV/10 kV 变压器, 10 kV 侧母线共有 5 条馈线, 馈线 1—3 类型为电缆, 长度分别为 7 km、8 km、9 km; 馈线 4、5 类型为架空线, 长度分别为 10 km、12 km; 馈线 5 到母线距离 1 km 处有分支点, 引出长度为 5 km 的分支线, 如图 8 所示。各馈线、分支线均采用如表 1 所示的典型参数, 负载皆为 0.5 MW + 0.08 Mvar 的平衡负载。

### 4.1 架空线故障仿真案例

馈线 5 在到母线距离 0、3、6、9、11 km 处设有检测点(以下简称 A、B、C、D、E 号检测点), 在该馈线到母线距离 8 km 处设置 A 相接地故障, 故障点过渡电阻为 10  $\Omega$ , 故障初相角为 90°。仿真电路图如图 9 所示。

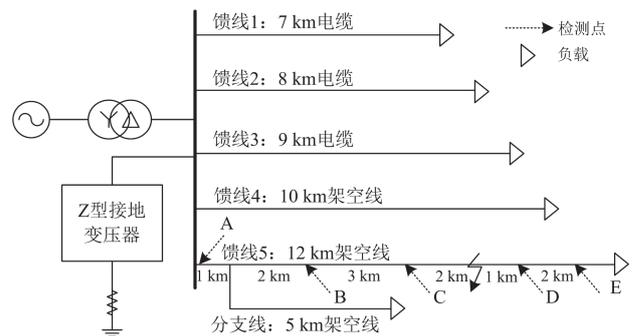


图 9 架空线故障的仿真电路图

Fig. 9 Simulation circuit diagram for overhead line fault

已知故障发生在 C 和 D 号检测点之间, 将 A、B、C 号检测点划分为故障点上游检测点, 将 D、E 号检测点划分为故障点下游检测点。

一般情况下, 小电阻接地系统的单相接地故障

暂态特征量衰减较快, 因此在求取零序电压幅值和零序电压相对量时各检测点均使用故障后第二个工频周期内的零序电压幅值和相位即可。

首先验证传统的基于零序电压幅值梯度的测距方法在小电阻接地系统架空线发生单相接地故障时的适用性, 各检测点测得的零序电压幅值如表 2 所示。

表 2 各检测点的零序电压幅值和零序电压相对量  
Table 2 Zero sequence voltage amplitude and relative amount of each detection point

检测点	到母线距离/km	零序电压幅值/V	零序电压相对量/V
A	0	3889	0
B	3	4103	595
C	6	4388	1189
D	9	4611	1586
E	11	4611	1586

此时, 故障点上游检测点数量大于 2 个, 通过式(10)和式(11)求解上游的零序电压幅值分布函数表达式。

故障点上、下游的零序电压幅值分布函数表达式如式(19)所示。

$$U_0(x) = \begin{cases} 83.2x + 3877.2 \\ 4611 \end{cases} \quad (19)$$

将故障点上、下游的零序电压幅值分布函数表达式联立, 求解得到故障点位置为到母线距离 8.82 km 处, 与实际故障点位置相差 820 m, 测距结果不理想。

然后验证本文所提的基于零序电压相对量梯度的故障测距方法的正确性和优越性, 各检测点零序电压相对量如表 2 所示。

此时, 故障点上游检测点数量等于 3 个, 通过式(16)和式(17)求解上游的零序电压相对量分布函数表达式。

故障点上、下游的零序电压相对量分布函数表达式如式(20)所示。

$$\Delta U_0(x) = \begin{cases} 198.2x + 0.2 \\ 1586 \end{cases} \quad (20)$$

将故障点上、下游的零序电压相对量分布函数表达式联立, 求解得到故障点位置为到母线距离 8.002 52 km 处, 与实际故障点位置相差 2.52 m。与基于零序电压幅值梯度的测距方法相比, 测距准确性显著提高。

考虑 B、C 两检测点信息未能可靠上传的情况, 仅利用母线处检测点 A 测得的故障线路零序电流幅值和单位零序阻抗模值进行仿真验证, 根据式(14)

求解  $k_u$ , 构造式(21)所示方程组求解故障点位置。

$$\Delta U_0(x) = \begin{cases} 198.258x \\ 1586 \end{cases} \quad (21)$$

求得故障点位置为到母线距离 7.999 68 km 处, 与实际故障点位置相差 0.32 m, 验证了所提算法具有一定的灵活性。

改变故障点过渡电阻, 重复上述仿真过程。表 3 分别给出了不同故障点过渡电阻下基于零序电压幅值梯度的测距方法和基于零序电压相对量梯度的测距方法的测距结果。

表 3 架空线故障的测距结果  
Table 3 Location results with overhead line fault

故障点过渡电阻/ $\Omega$	绝对误差/m	
	基于零序电压幅值梯度的测距方法	基于零序电压相对量梯度的测距方法
10	823	2.52
50	835	2.17
100	801	3.86
500	833	17.54

从表 3 可以看出, 小电阻接地系统中的架空线发生单相接地故障时, 基于零序电压相对量梯度的测距方法的测距准确性明显高于基于零序电压幅值梯度的测距方法, 与第 1、2 节理论分析基本吻合。

#### 4.2 电缆故障仿真案例

改变故障线路类型, 在馈线 3 到母线距离 5 km 处设置单相接地故障, 仿真电路图如图 10 所示。

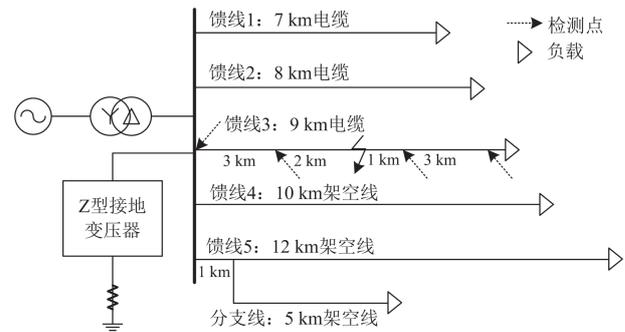


图 10 电缆故障的仿真电路图

Fig. 10 Simulation circuit diagram for cable fault

表 4 分别给出了不同故障点过渡电阻时基于零序电压幅值梯度的测距方法和基于零序电压相对量梯度的测距方法的测距结果。

从表 4 可以看出, 小电阻接地系统中的电缆发生单相接地故障时, 基于零序电压幅值梯度的测距方法和基于零序电压相对量梯度的测距方法的测距准确性没有明显差异, 与第 1 节理论分析基本吻合。

此时，基于零序电压幅值梯度的测距方法在实际测距中具有不需要多端检测点对时的优点，可以作为一种差异化的测距方案。

表 4 电缆故障的测距结果  
Table 4 Location results with cable fault

故障点过渡电阻/ $\Omega$	绝对误差/m	
	基于零序电压幅值梯度的测距方法	基于零序电压相对量梯度的测距方法
10	1	1.13
50	0	0.00
100	10	4.88
500	5	0.00

综合 4.1、4.2 节仿真结果可以看出，相比于传统的基于零序电压幅值梯度的测距方法，本文提出的基于零序电压相对量梯度的测距方法不受故障线路参数影响，测距准确性高。

### 4.3 利用分支线检测点信息的仿真案例

为验证第 3 节所述利用分支线检测点信息实现故障测距的正确性，在分支线到母线距离 2 km 处设置 F 号检测点，在馈线 5 到母线距离 2 km 处设置单相接地故障。

仿真电路图如图 11 所示。已知故障发生在主干线路 A 和 B 号检测点之间，根据第 3 节测距算法，将分支线 F 号检测点当作位于主干线路分支点处，将主干线路 A 号检测点、分支线 F 号检测点划分为故障点上游检测点，将主干线路 B、C、D、E 号检测点划分为故障点下游检测点。

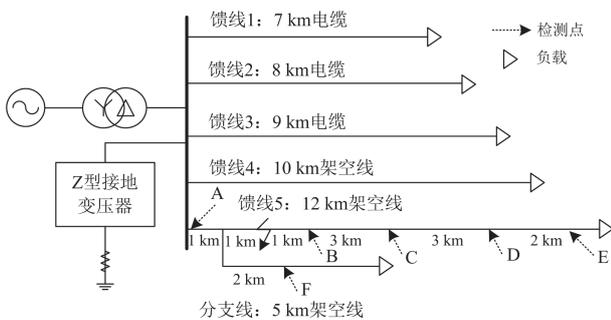


图 11 利用分支线检测点信息的仿真电路图

Fig. 11 Simulation circuit diagram when using the branch line detection point information

求解得到故障点到母线距离为 1.9997 km，与实际故障点位置相差 0.3 m，测距精度高，验证了第 3 节所述利用分支线检测点信息实现故障测距的正确性。

## 5 结语

本文首先探讨了忽略相位偏移与考虑相位偏移

两种情况下零序电压的分布特征，然后据此提出了基于零序电压相对量梯度的测距方法。

小电阻接地系统中典型参数的架空线发生单相接地故障时，故障点上游线路的零序电流主要呈阻性，该电流流过线路零序阻抗后产生的压降与母线出口处零序电压相位相差近似 90°，此时传统的基于零序电压幅值梯度的测距方法会产生较大的原理误差，而零序电压相对量的分布特征不受系统接地方式和故障线路参数的影响，用以故障测距时可以显著提高测距精度。

本文所提方法也可以借助行波测距平台，具有不受负荷和分布式能源影响的特点，实现测距结果的选优。本文忽略了线路参数不均匀等复杂情况，下一步将继续研究面向更加复杂的配电线路的测距方法。

### 参考文献

- [1] 刘青, 黄玉河, 王宇, 等. 基于电磁时间反演 P 范数判据的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 74-82.  
LIU Qing, HUANG Yuhe, WANG Yu, et al. Distribution network fault location based on an electromagnetic time reversal P-parametric criterion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 74-82.
- [2] 郑聪, 周海峰, 郑东强, 等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 169-179.  
ZHENG Cong, ZHOU Haifeng, ZHENG Dongqiang, et al. An active distribution network fault location method based on improved multi-universe algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 169-179.
- [3] 陈洁羽, 左宝峰, 谈震, 等. 配电网单相接地快速处置装置运行情况研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 75-81.  
CHEN Jieyu, ZUO Baofeng, TAN Zhen, et al. Operation analysis of rapid disposal device for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 75-81.
- [4] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.  
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [5] 刘健, 张志华, 王毅钊. 基于电压信息的配电网断线故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 123-131.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WANG Yizhao. Voltage information based line-broken fault location for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 123-131.
- [6] 朱晓红, 杨伟荣, 张蓉, 等. 基于 RNN-LSTM 神经网络的小电流接地故障选线方法[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 213-220.  
ZHU Xiaohong, YANG Weirong, ZHANG Rong, et al. Line selection method of low current grounding fault based on

- RNN-LSTM neural network[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7): 213-220.
- [7] 李景丽, 袁豪, 徐铭铭, 等. 小电阻接地系统高阻接地故障检测技术综述[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(6): 10-18, 51.  
LI Jingli, YUAN Hao, XU Mingming, et al. Overview of high impedance fault detection technology in small resistance grounding system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(6): 10-18, 51.
- [8] 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.
- [9] 季涛. 基于暂态行波的配电网故障测距研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.  
JI Tao. Study on fault location of distribution feeders based on transient traveling waves[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [10] LIN S, HE Z Y, LI X P, et al. Traveling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2012, 6(8): 764-772.
- [11] JAFARIAN P, SANAYE-PASAND M. A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(2): 588-599.
- [12] 张建文, 周鹏, 陈焕翎. 基于改进阻抗法的单相接地故障测距仿真[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(3): 84-87.  
ZHANG Jianwen, ZHOU Peng, CHEN Huanxu. Simulation of transmission line single-phase ground fault location based on improved impedance method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(3): 84-87.
- [13] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(13): 76-81.  
WEI Shaokang, CHEN Ping, JIANG Yinghui. A single-ended traveling wave ranging method avoiding wave speed influence[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(13): 76-81.
- [14] 何晓, 雷勇, 周聪聪, 等. 消除零模波速影响的配电网单端行波故障测距算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(23): 39-45.  
HE Xiao, LEI Yong, ZHOU Congcong, et al. A single-terminal fault location algorithm in distribution network for eliminating the effect of the velocity of zero-mode traveling wave[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(23): 39-45.
- [15] LOPES F V, DANTAS K M, SILVA K M, et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2018, 33(2): 873-880.
- [16] 张耘浩, 张姝, 张文海, 等. 基于台区变压器二次侧电压变化的配电网故障区段定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16): 23-32.  
ZHANG Yunhao, ZHANG Shu, ZHANG Wenhai, et al. Fault section location of a distribution network based on voltage variation of the secondary side of a transformer in the station area[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 23-32.
- [17] MOSAVI M R, TABATABAEI A, FARAJIPARVAR P. Stability comparison of fault location techniques against faulty GPS time tagging for three-terminal lines[J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2017, 42(7): 1-11.
- [18] 梁栋, 徐丙垠, 谢伟, 等. 基于小波脉冲相关的电缆故障时域反射测距方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(24): 8050-8057, 8241.  
LIANG Dong, XU Bingyin, XIE Wei, et al. A time-domain-reflectometry cable fault location method using wavelet pulses and cross-correlation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(24): 8050-8057, 8241.
- [19] MORTAZAVI S H, MORAVEJ Z, SHAHRTASH S M. A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(2): 438-447.
- [20] YU C. An unsynchronized measurement correction method for two-terminal fault location problems[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1325-1333.
- [21] 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.
- [22] 施世鸿, 何奔腾. 基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法[J]. *电网技术*, 2008, 32(9): 84-88.  
SHI Shihong, HE Benteng. A two-terminal fault location algorithm using asynchronous phasors based on distributed parameter model[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(9): 84-88.
- [23] 刘江东, 董礼清, 薛晨, 等. 基于零序电压分布特征的小电流接地故障测距初探[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 59-67.  
LIU Jiandong, DONG Liqing, XUE Chen, et al. Fault location of a small current grounding fault based on distribution characteristics of zero sequence voltage[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 59-67.
- [24] 董礼清, 薛永端, 李娟, 等. 小电流接地故障零序电压分布特征与测距[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(19): 180-187.  
DONG Liqing, XUE Yongduan, LI Juan, et al. Zero-sequence voltage distribution characteristics and location of non-solidly grounding fault[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(19): 180-187.

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-04-03

作者简介:

俞小勇(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网运行智能分析技术; E-mail: yxy\_dew@163.com

李克文(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网自动化及新型电力系统故障自愈技术;

吴丽芳(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网数字仿真技术。

(编辑 魏小丽)