

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210632

# 基于零序电压分布特征的小电流接地故障测距初探

刘江东<sup>1</sup>, 董礼清<sup>2</sup>, 薛晨<sup>1</sup>, 薛永端<sup>2</sup>, 李娟<sup>3</sup>, 陈艳<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司, 江苏 扬州 225001; 2. 山东理工大学智能电网研究院, 山东 淄博 255049; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 故障测距能够大大提高故障巡线与修复速度, 但现有配电网小电流接地故障测距技术存在经济性较差的问题。为此, 提出一种基于零序电压分布特征、可在现有配网自动化系统上实现的小电流接地故障测距方法。首先, 利用小电流接地故障分布参数等值电路, 验证零序电压分布特征作为故障测距判据的可行性。其次, 在故障区段已知的基础上, 利用配网自动化系统获取有限检测点的故障零序电压信息, 并通过函数拟合得到故障点上、下游区段的零序电压分布函数。最后, 求解两区段零序电压分布函数的联立方程组, 得到故障点位置。仿真和现场数据的测试结果表明, 该方法的测距精度较高, 且可以利用现有设备实现, 具有良好的经济性。

**关键词:** 小电流接地故障; 零序电压分布; 故障测距; 配网自动化系统; 函数拟合

## Fault location of a small current grounding fault based on distribution characteristics of zero sequence voltage

LIU Jiandong<sup>1</sup>, DONG Liqing<sup>2</sup>, XUE Chen<sup>1</sup>, XUE Yongduan<sup>2</sup>, LI Juan<sup>3</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>

(1. Yangzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225001, China;  
2. Research Center for Smart Grid, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Fault location technology can greatly improve the speed of fault line inspection and repair, but the existing small current grounding fault location technology in a distribution network has the problem of poor economy. Therefore, a small current grounding fault location method based on the distribution characteristics of zero sequence voltage and can be realized on the existing distribution network automation system is proposed. First, the distribution parameter equivalent circuit of a small current grounding fault is used to verify the feasibility of zero sequence voltage distribution as a fault location criterion. Secondly, based on the known fault section, the distribution automation system is used to obtain the fault zero sequence voltage information of limited detection points, and the zero sequence voltage distribution function of upstream and downstream sections of the fault point is obtained by function fitting. Finally, the simultaneous equations of the zero sequence voltage distribution function of the two sections are solved to obtain the location of the fault point. The test results of simulation and field data show that this method has high ranging accuracy, can be realized by existing equipment, and has good economy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

**Key words:** small current grounding fault; zero sequence voltage distribution; fault location; distribution network automation system; function fitting

## 0 引言

配电网故障中绝大部分为小电流接地故障, 小

电流接地故障发生后, 快速、准确地找到故障点所在位置并进行维修, 是提高供电可靠性、保证系统安全运行的关键<sup>[1-6]</sup>。

为了提高配电网小电流接地故障处置能力, 提升运维检修效率, 降低故障停电时间, 国内外专家学者投入了大量的人力物力, 在配电网故障选线<sup>[7-10]</sup>、故障定位<sup>[11-17]</sup>和故障测距<sup>[18-20]</sup>等方面开展了大量艰苦的研究工作, 且取得了丰硕的研究成果。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52077221); 国网江苏省电力有限公司科技项目资助“国网江苏扬州-利用配电网终端电压信息的配电网故障定位技术研究服务”(J2020101)

目前,配电网故障定位技术的应用效果还有待提升<sup>[21-22]</sup>。配电网故障定位技术可以分为故障区段定位技术和故障测距技术两种。故障区段定位技术能够判断出故障点所在区段,发展较为成熟,且应用较为广泛;但具体故障点位置还依赖人工在故障区段内巡线,利用能够直接判断故障点到母线(或检测点)距离的故障测距技术可有效解决该问题<sup>[23-24]</sup>,但由于配电线路接线方式复杂、分支线多、运行方式多变等,故障测距技术的开发和应用较为困难<sup>[25]</sup>。现有的配电网小电流接地故障测距技术主要为行波法,行波法利用故障暂态行波的传送时间进行测距,测距精度较高,但需要增设特定的检测装置,投资高、维护量大,且解决故障波头识别及混合线路波阻抗变化等问题有较大难度,目前仍在研究与试用阶段<sup>[26-27]</sup>。

现阶段,我国的配电网大多装设了配网自动化系统。配网自动化系统集成数据采集、数据处理、软件平台等诸多功能于一体,其配电终端所采集的数据具有重要的价值<sup>[28]</sup>,若能够在现有的配网自动化系统上,利用其数据开发新的功能,则可以在不增加新设备投资与维护工作量的基础上,充分发掘配网自动化系统的潜能<sup>[29-30]</sup>。本文在配电网故障区段定位技术的基础上,结合现有的配网自动化系统,利用小电流接地故障分布参数模型进行分析,提出一种基于故障线路零序电压分布特征进行小电流接地故障测距的新方法。

## 1 小电流接地故障零序电压分布特征

### 1.1 小电流接地系统零模网络分布参数模型

配电网发生小电流接地故障后,系统各处的对地电容电流经由故障点流入大地,形成零序电流,流通回路如图1所示。图中 $Z_{0h1} \cdots Z_{0hn}$ 、 $Z_{0b1} \cdots Z_{0bn}$ 、 $Z_{0a1} \cdots Z_{0an}$ 分别表示各段线路的零序阻抗,  $C_{0h1}(C'_{0h1}) \cdots C_{0hn}(C'_{0hn})$ 、 $C_{0b1}(C'_{0b1}) \cdots C_{0bn}(C'_{0bn})$ 、 $C_{0a1}(C'_{0a1}) \cdots C_{0an}(C'_{0an})$ 分别表示各段线路的对地电容,线路 I 代表所有健全线路,线路 II 代表故障线路,将故障线路以故障点为分界,划分为故障点上游区段(电源侧)和故障点下游区段(负荷侧)两个大区段;开关 K 的打开和闭合代表中性点不接地和经消弧线圈接地两种接地方式,  $I_{Lp}$  表示消弧线圈接地电流,  $I_{hc\Sigma}$  表示健全线路总对地电容电流,  $I_b$ 、 $I_a$  分别表示故障点上、下游区段总对地电容电流,  $I_C$  表示单位长度  $\Delta x$  对地电容电流,  $I_f$  表示接地点零序电流。

考虑配电线路各处的对地电容电流分布均匀,将健全线路和故障线路划分为多个单位长度区间,每个区间的对地电流大小相同,其分布情况如图2所示。

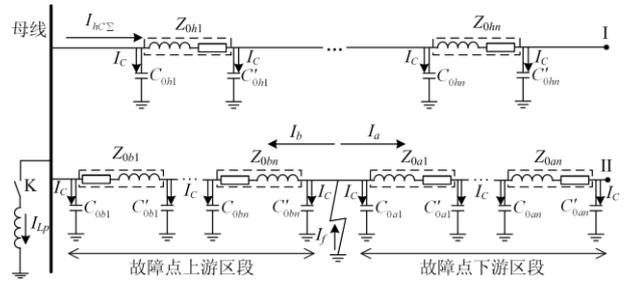


图1 小电流接地故障零模等效网络

Fig. 1 Zero mode equivalent network of small current grounding fault

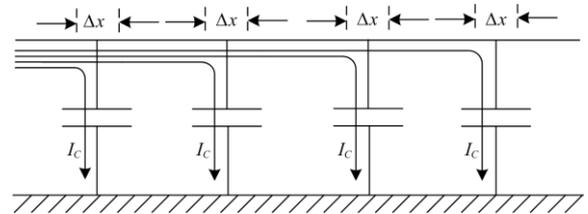


图2 零序电流沿线分布示意图

Fig. 2 Distribution of zero sequence current along the line

### 1.2 零序电流分布特征

对于不接地系统,当发生小电流接地故障时,零序电流从故障点向故障点上游方向和故障点下游方向流动,且沿着流动方向逐渐减小。其中故障点上游区段和故障点下游区段任意一处零序电流幅值  $I_0(x)$  大小与到母线电气距离  $x$  的关系如式(1)所示。

$$I_0(x) = \begin{cases} I_C x + I_{hc\Sigma} & (x < x_f) \\ I_C (l_f - x) & (x > x_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_f$  为故障点到母线的电气距离;  $l_f$  为故障线路长度。

由式(1)得到不接地系统故障线路零序电流分布如图3所示。图中虚线表示故障点上游区段对地电容电流形成的零序电流幅值,  $I_{0b}$ 、 $I_{0a}$  分别表示  $x_{f+}$ 、 $x_{f-}$  的零序电流幅值(图4同)。

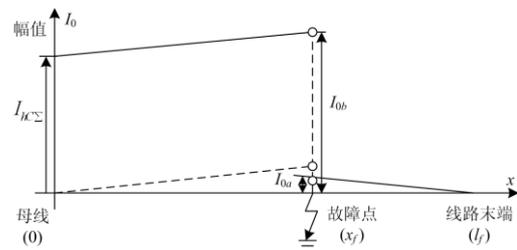


图3 不接地系统故障线路零序电流分布

Fig. 3 Zero sequence current distribution of ungrounded system

对于谐振接地系统,故障点下游区段则与不接地系统一致。由于消弧线圈的过补偿作用,其故障

线路中, 故障点上游区段的零序电流分布特征与不接地系统有所不同, 故障点上游区段任意一处零序电流幅值大小与到母线电气距离的关系如式(2)所示。

$$I_0(x) = \begin{cases} I_{Lp} - I_{hC\Sigma} - I_C x & (x < x_f) \\ I_C(l_f - x) & (x > x_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $I_{Lp}$  为消弧线圈电流, 有  $I_{Lp} > I_{hC\Sigma} + I_C l_f$ 。

由式(2)得到谐振接地系统故障线路零序电流分布如图4所示。

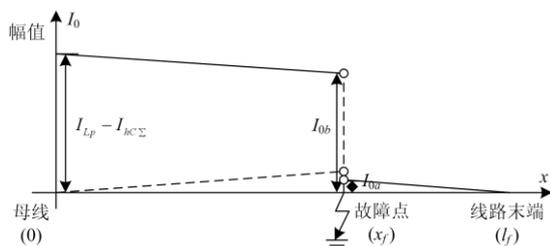


图4 谐振接地系统故障线路零序电流分布

Fig. 4 Zero sequence current distribution of resonant system

一般情况下, 故障线路的总对地电容电流远小于健全线路的总对地电容电流, 因而故障点上游区段的总对地电容电流较小, 从图3和图4可以看出, 故障点上游区段的零序电流近似为恒定值, 故障点下游区段的零序电流近似为0, 因此, 可近似认为故障点上游区段零序电流幅值恒为  $I_{hC\Sigma}$ , 故障点下游区段零序电流幅值恒为  $I_{Lp} - I_{hC\Sigma}$ 。

### 1.3 零序电压分布特征

线路中的零序电流流经沿线的零序阻抗时, 会形成零序压降。由于故障线路中故障点上游区段和故障点下游区段的零序电流分布情况不同, 因此零序电压的分布特征也不同。

对于不接地系统, 根据故障点上、下游区段的零序电流分布, 可以推导得到故障点上、下游区段任一点的零序电压幅值  $U_0(x)$  分别如式(3)、式(4)所示。

$$U_0(x) = -Z_0 I_{hC\Sigma} x + U_0(0) \quad (x < x_f) \quad (3)$$

$$U_0(x) = U_0(x_f) = U_0(l_f) \quad (x > x_f) \quad (4)$$

式中:  $Z_0$  为单位长度的零序阻抗;  $U_0(x)$ 、 $U_0(x_f)$ 、 $U_0(l_f)$  分别为母线处、故障点处、线路末端零序电压幅值。

根据式(3)和式(4), 以到母线距离为横坐标, 零序电压幅值为纵坐标, 得到不接地系统故障线路零序电压分布如图5所示。

对于谐振接地系统, 根据故障点上、下游区段的零序电流分布, 推导得到故障点上游区段任一点

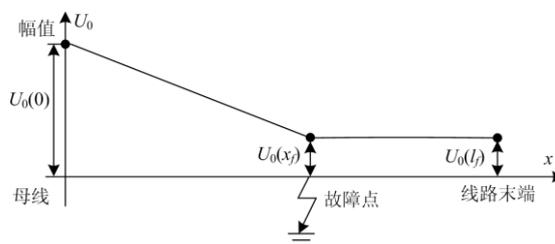


图5 不接地系统故障线路零序电压分布

Fig. 5 Zero sequence voltage distribution of ungrounded system

的零序电压如式(5)所示, 故障点下游区段则与不接地系统一致。

$$U_0(x) = Z_0(I_{Lp} - I_{hC\Sigma})x + U_0(0) \quad (x > x_f) \quad (5)$$

由式(5)和式(4)可得谐振接地系统故障线路零序电压分布如图6所示。

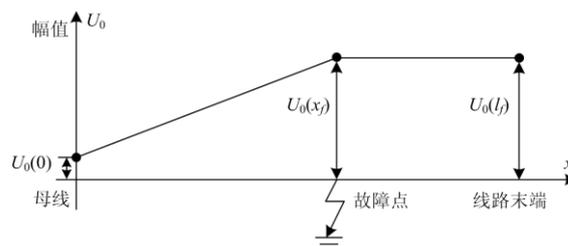


图6 谐振接地系统故障线路零序电压分布

Fig. 6 Zero sequence voltage distribution of resonant system

从图5和图6可以看出, 对于不接地系统和谐振接地系统, 其故障点上游区段零序电压分布特征呈一次函数, 故障点下游区段近似呈常数。当故障点距离母线较近、故障点下游区段较长时, 故障点下游区段的零序电流较大, 此时其零序电压近似呈一次函数分布。

## 2 基于零序电压分布特征的故障测距

根据以上分析可知, 在小电流接地系统的故障线路中, 故障点上游区段和故障点下游区段的零序电压分布函数呈现不同特征。基于零序电压分布特征实现故障测距, 其核心是找到两段函数曲线的交点, 而实现该目的的关键是得到两区段的分布函数。因此, 该小电流接地故障测距方法包括两大步骤:

(1) 通过配电终端(以下简称检测点)到母线的电气距离及其测得的零序电压幅值, 求故障点上游区段和故障点下游区段的零序电压分布函数; (2) 通过两区段分布函数曲线的交点判断故障点位置。

由式(3)、式(4)和式(5)可知, 对于不接地系统和谐振接地系统, 故障点上游区段零序电压均呈一次函数分布, 如式(6)所示, 故障点下游区段零序电压

均近似呈常数分布。

$$U_0(x) = ax + b \quad (6)$$

利用故障线路上检测点处的零序电压幅值和距离信息求取零序电压分布函数, 当检测点信息存在冗余时, 可以借助最小二乘法求取零序电压分布函数, 以减小测距误差。

### 2.1 故障点上游区段零序电压分布函数求解方法

对于故障点上游区段, 由于其零序电压分布特征较故障点下游区段更为明显, 其零序电压分布函数对于故障测距结果起主要作用。

对于实际故障点上游区段零序电压分布函数的求取分为以下3种情况。

1) 当故障点上游区段的检测点数量不足2个时, 故障点上游区段的零序电压分布函数只能拟合为常数, 其对于测距结果的影响较大, 故不适用于本方法。

2) 当故障点上游区段的检测点数量为2个时, 可将2个检测点的数据代入式(6), 求解未知参数 $a$ 、 $b$ ; 假设2个检测点数据为 $(x_1, U_0(x_1))$ 、 $(x_2, U_0(x_2))$ , 将其分别代入式(6), 通过联立方程组求解, 从而求得 $a$ 、 $b$ 的数值, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} a = \frac{U_0(x_1) - U_0(x_2)}{x_1 - x_2} \\ b = \frac{x_1 U_0(x_2) - x_2 U_0(x_1)}{x_1 - x_2} \end{cases} \quad (7)$$

3) 当故障点上游区段的检测点数量大于2个, 即存在冗余数据时, 则需要利用最小二乘法拟合曲线。最小二乘法的基本原理, 是在给定目标函数, 且已知数据的数量大于未知参数的情况下, 以误差最小为目标进行近似拟合<sup>[31]</sup>。假设已知的数据如式(8)所示。

$$(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n \quad (n \geq 3) \quad (8)$$

以式(6)所示一次函数作为曲线拟合的目标函数, 其均方误差 $Y$ 可表示为

$$Y(a, b) = \sum_{i=1}^n [(ax_i + b) - y_i]^2 \quad (9)$$

用最小二乘法估计参数时, 需令均方误差 $Y$ 最小。根据式(9)分别对 $a$ 、 $b$ 求偏导, 得到式(10)。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n [(ax_i + b) - y_i]^2 = 2 \sum_{i=1}^n x_i (ax_i + b - y_i) \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n [(ax_i + b) - y_i]^2 = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i) \end{cases} \quad (10)$$

令式(10)中两方程分别等于0, 整理后得到方程组, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} a \sum x_i + bn = \sum y_i \\ a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i \end{cases} \quad (11)$$

解上述方程, 即可得到直线参数 $a$ 、 $b$ 的最优值, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \end{cases} \quad (12)$$

以故障点上游区段的4个检测点为例, 利用最小二乘法求解零序电压分布函数曲线, 其示例如图7所示。

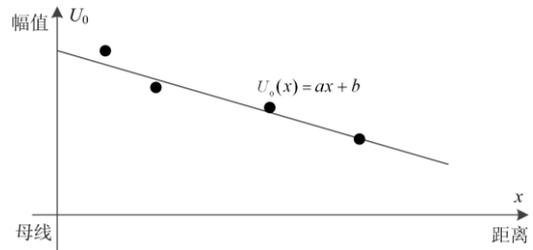


图7 最小二乘法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of least square method

### 2.2 故障点下游区段零序电压分布函数求解方法

对于故障点下游区段, 由于其占整个系统的零序电流比例较小, 因此其零序电压分布特征不明显, 当数据较少时, 可近似用水平线表示。

故障点下游区段零序电压分布函数的求取分为以下3种情况。

1) 当故障点下游区段的分支线上存在检测点时, 假设分支线上的检测点处于故障点下游区段主干线路上、与分支点同距离处, 根据故障点下游区段的检测点数量, 选择零序电压分布函数拟合方法。

2) 当故障点下游区段的检测点数量为1个时, 设该检测点的数据为 $(x_1, U_0(x_1))$ , 则可直接利用该点数据拟合常数函数, 此时参数 $a=0$ ,  $b=U_0(x_1)$ , 则故障点下游区段零序电压分布函数如式(13)所示。

$$U_0(x) = U_0(x_1) \quad (13)$$

3) 当故障点下游区段的检测点数量大于1时, 则与故障点上游零序电压分布函数求解方法一致。

### 2.3 基于零序电压分布特征的故障测距方法

通过上述方法, 得到故障点上、下游区段的零序电压分布函数, 将两区段的零序电压分布函数联立, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} U_0(x) = a_1x + b_1 \\ U_0(x) = a_2x + b_2 \end{cases} \quad (14)$$

对式(14)所示方程组进行求解, 其解为两函数曲线的两个交点, 如式(15)所示。

$$x = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (15)$$

式(15)中的  $x$  即为故障点到母线的电气距离, 从而可以据此判断故障点位置进行查找与维修, 实现故障测距。

故障测距流程如图 8 所示。

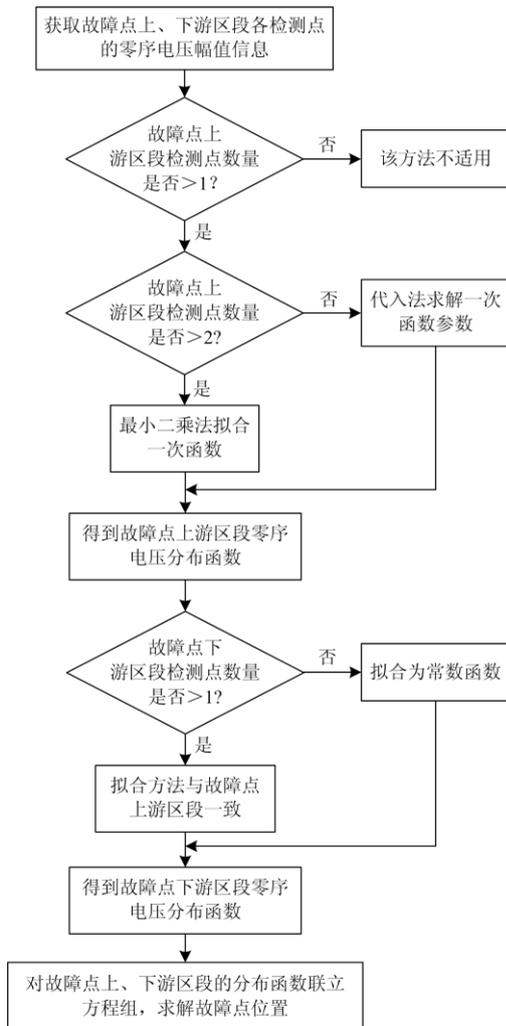


图 8 故障测距流程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of fault location process

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真验证

利用 Matlab/Simulink 仿真软件, 搭建 10 kV 单端辐射状、中性点不接地系统仿真模型, 如图 9 所示。

系统母线侧共有 5 条出线, 包括 2 条电缆和 3 条架空线, 电缆长度分别为 3 km、3.5 km, 架空线长度分别为 8 km、10 km、12 km; 母线侧采用 Y-Δ 接法的 110 kV 变 10 kV 变压器, 负载分别接 0.5 MW+0.08 Mvar 的三相平衡负载。

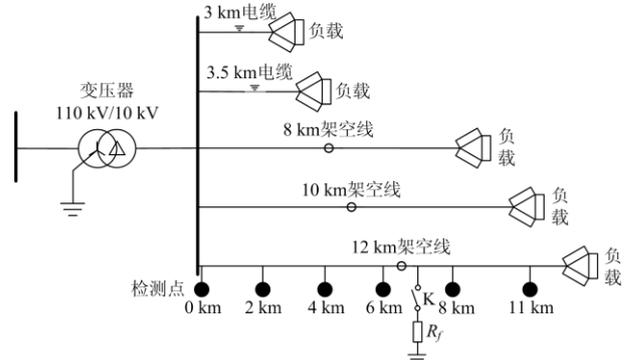


图 9 仿真模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of simulation model

以上述不接地系统为例进行小电流接地故障测距仿真验证: 在 12 km 架空线距离母线 7 km 处设置单相接地故障, 故障相为 A 相, 故障初相角 90°, 过渡电阻为 10 Ω; 故障线路分别在距离母线 0 km、2 km、4 km、6 km、8 km、11 km 共 6 处设置零序电压检测点(以下简称 1#、2#、3#、4#、5#、6#检测点)。

已知故障点位于 4#和 5#检测点之间, 则根据故障点所在区段, 将 1#、2#、3#、4#检测点定义为故障点上游区段, 将 5#、6#检测点定义为故障点下游区段。

小电流接地故障发生后, 零序电压在 85 ms 到达稳态, 取各检测点零序电压幅值, 各检测点数据如表 1 所示。

表 1 各检测点零序电压幅值(仿真)

Table 1 Zero sequence voltage of each detection point (simulation)

区段	检测点	到母线距离/km	零序电压幅值/V
故障点上游	1#	0	8 681.6
	2#	2	8 641.6
	3#	4	8 601.4
	4#	6	8 561.2
故障点下游	5#	8	8 541.2
	6#	11	8 541.4

以到母线电气距离为横坐标、零序电压幅值为纵坐标, 建立反映故障线路零序电压分布情况的二维坐标系, 然后将表 1 中 6 个检测点的数据代入坐标系。

将故障点上游区段零序电压分布拟合为一次函数, 按照最小二乘法拟合原理, 将故障点上游区段

的 1#、2#、3#、4#检测点数据代入式(12)中, 此时  $n=4$ , 求得式(6)中参数  $a=-20.07$ 、 $b=8\ 681.7$ , 继而得到式(16)所示函数方程。

$$U_0(x) = -20.07x + 8681.7 \quad (16)$$

将故障点下游区段零序电压分布也拟合为一次函数, 按照一次函数参数求解方法, 将故障点下游区段的 5#、6#检测点数据代入式(7)中, 可求得式(6)中参数  $a=0.0667$ 、 $b=8\ 540.7$ , 继而得到式(17)所示函数方程。

$$U_0(x) = 0.0667x + 8540.7 \quad (17)$$

拟合后的故障点上、下游区段零序电压分布函数曲线如图 10 中实线所示。

将式(16)和式(17)所示的两方程联立, 按式(15)进行求解, 得到第一象限内的有效解, 如图 10 中两虚线交点, 其坐标为(7.002 km, 8 541.17 V), 即故障点到母线距离为 7.002 km, 其与实际故障点到母线的电气距离(7 km)相差 0.002 km, 绝对误差为 0.03%, 该误差由电压测量精度引起, 故障测距结果较为精准。

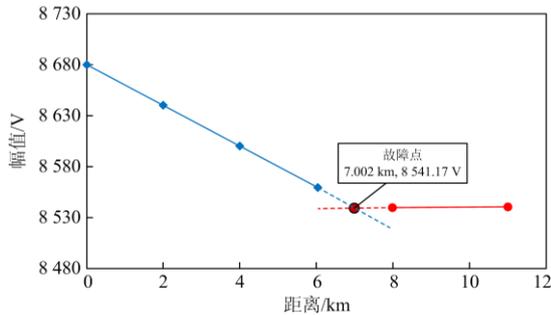


图 10 零序电压分布曲线(仿真)

Fig. 10 Zero sequence voltage distribution curve (simulation)

表 2 给出了利用仿真模型对该小电流接地故障测距方法进行应用测试时, 不同故障距离和不同过渡电阻下的仿真测距结果。

表 2 小电流接地故障测距结果

Table 2 Location results of small current grounding fault

故障距离/km	过渡电阻/ $\Omega$	小电流接地故障测距结果	
		测距结果/km	测距误差/%
5	10	5.001	0.02
	100	4.998	0.04
	1 000	5.003	0.06
7	10	7.002	0.03
	100	7.003	0.04
	1 000	6.996	0.06
9	10	8.998	0.02
	100	8.997	0.03
	1 000	9.004	0.04

### 3.2 实例验证

某地区 10 kV 配电系统发生单相金属性接地故障, 故障线路局部拓扑如图 11 所示。

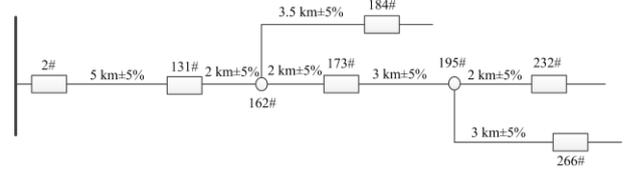


图 11 某地区 10 kV 配电系统局部拓扑

Fig. 11 Local topology of 10 kV distribution system in a region

系统中性点经消弧线圈接地, 故障线路为架空线, 该故障线路主干线中包含 2#、131#、173#、232# 杆塔上 4 个配电终端, 其中 131#和 173#杆塔间的 162#杆塔引出分支线, 分支线上的 184#杆塔装有配电终端, 173#和 232#杆塔间的 195#杆塔引出分支线, 分支线上的 266#杆塔装有配电终端; 2#、131#、173#、232#杆塔与母线距离分别为 0 km、5 km、9 km、14 km, 分支点 195#杆塔与母线距离为 12 km, 分支线上 266#杆塔与分支点距离为 3 km。

由该系统已有的故障区段定位功能模块, 测得 173#杆塔和 195#杆塔之间发生单相接地故障, 将 2#、131#、173#、184#杆塔定义为故障点上游区段, 将 232#、266#杆塔定义为故障点下游区段, 并根据前述的分支线处理方法, 将故障点上游区段的 184#杆数据忽略, 将故障点下游区段的 232#和 266#杆塔视作同在主干线路上, 按照到母线的电气距离排列。

利用配电网自动化系统的终端设备, 获取谐振接地系统发生小电流接地故障时, 故障线路的实时零序电压信息, 故障发生后, 故障线路上的 6 处配电终端, 将故障前 5 个周波和故障后 10 个周波的电压信息上传至主站平台, 取除 184#杆外各配电终端的工频零序电压幅值信息, 如表 3 所示。

表 3 各检测点零序电压幅值(实例)

Table 3 Zero sequence voltage of each detection point (scene)

区段	检测点	到母线距离/km	零序电压幅值/V
故障点上游	2#	0	7 866.5
	131#	5	7 887.7
	173#	9	7 900.5
故障点下游	232#	14	7 908.4
	266#	15	7 909.1

以到母线电气距离为横坐标、工频零序电压幅值为纵坐标, 建立反映故障点上游区段和故障点下游区段工频零序电压分布情况的二维坐标系。

对于故障点上游区段, 根据最小二乘法拟合一次函数的原理, 将 2#、131#、173#杆塔的数据代入

式(12)中, 此时  $n=3$ , 可求得式(6)中参数  $a=3.7967$ 、 $b=7867.2$ , 得到式(18)所示函数方程。

$$U_0(x) = 3.7967x + 7867.2 \quad (18)$$

对于故障点下游区段, 根据一次函数参数求解方法, 将 232#、266#杆塔数据代入式(7)中, 可求得式(6)中参数  $a=0.7$ 、 $b=7898.6$ , 得到式(19)所示函数方程。

$$U_0(x) = 0.7x + 7898.6 \quad (19)$$

拟合后的两区段零序电压分布函数曲线如图 12 所示。

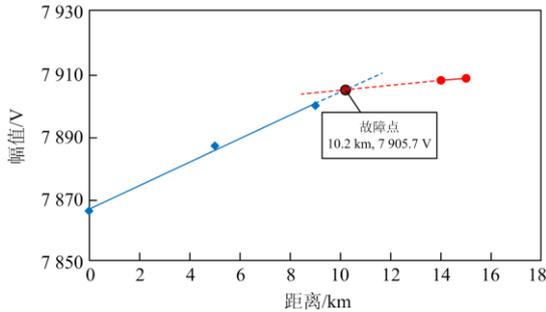


图 12 零序电压分布曲线(实例)

Fig. 12 Zero sequence voltage distribution curve (scene)

将式(18)和式(19)所示的两方程联立, 通过式(15)求解得到在第一象限的有效解, 解坐标为(10.14 km, 7905.70 V), 图 12 中两曲线交点即为计算得到的故障点位置: 173#和 195#杆塔之间, 距离 173#杆塔电气距离 1.14 km 处; 根据后期的现场反馈信息, 实际的故障点位置为 173#和 195#杆塔之间, 距离 173#杆塔电气距离约 1.2 km 处, 本故障测距方法结果与实际故障距离相差 0.06 km, 绝对误差为 0.59%。此误差与线路长度测量误差、数据测量误差及计算误差有关, 测距结果较为精准。

## 4 结论

1) 对于不接地系统和谐振接地系统, 当发生小电流接地故障时, 故障线路的零序电压具有明显的分布规律, 母线至故障点、故障点至负载两个区段内的零序电压与到母线电气距离的关系均呈一次函数分布, 两个区段的零序电压分布曲线在故障点处形成交点。上述零序电压分布特征适用于小电流接地故障测距。

2) 本文所提出的基于零序电压分布特征的小电流接地故障测距方法, 利用少数检测点的数据, 拟合得到故障点上下游区段的零序电压分布函数, 将两区段的零序电压分布函数联立进行求解, 得到故障点到母线的电气距离; 通过仿真和现场数据对

上述方法进行测试, 取得了较为精准的测距结果。

3) 该方法一方面是建立在故障区段定位技术较为成熟的基础上, 另一方面是建立在现有的配电自动化系统上, 其仅利用零序电压进行故障测距, 算法简单, 稳定性好, 且无需增加新设备, 能够和现有技术相互配合, 与行波法相比, 在牺牲了极小测距精度的情况下, 保证了极大的经济性, 因此具有显著的经济效益和实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93.  
CHEN Yueyun, QIN Jian, WANG Xin, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-93.
- [2] 王闰羿, 胡兵, 王良毅, 等. 分布式小电流接地保护研究与应用[J]. 供用电, 2020, 37(5): 56-63.  
WANG Runyi, HU Bing, WANG Liangyi, et al. Research and application of distributed small current grounding protection[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5): 56-63.
- [3] 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.
- [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] 梅睿, 程孟晗, 管廷龙, 等. 基于电流波形聚类的谐振接地系统高阻接地故障定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(5): 36-41.  
MEI Rui, CHENG Menghan, GUAN Tinglong, et al. High-resistance grounding fault location method for resonance grounding system based on current waveform clustering[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5): 36-41.
- [6] 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.
- [7] ZHANG Xipeng, TAI Nengling, WU Pan, et al. A fault

- line selection method for DC distribution network using multiple observers[J]. *Energies*, 2019, 12(7).
- [8] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5636-5645.  
FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5636-5645.
- [9] 梁睿, 杨学君, 彭楠, 等. 基于广域零序分布电压特征的小电流接地选线方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 3236-3242.  
LIANG Rui, YANG Xuejun, PENG Nan, et al. A method for single-line-to-ground fault feeder selection based on the characteristic of wide area zero sequence voltage[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 3236-3242.
- [10] 袁佳歆, 李响, 张哲维. 基于注入信号的有源配电网单相接地故障选线方法[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(5): 44-49.  
YUAN Jiaxin, LI Xiang, ZHANG Zhewei. Research on single-phase grounding fault selection technology for active distribution network based on injected signal[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(5): 44-49.
- [11] SADEGH J, ALIREZA B, SIAVASH R. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 174-182.
- [12] 常仲学, 宋国兵, 黄炜, 等. 基于相电压电流突变量特征的配电网单相接地故障区段定位方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2363-2370.  
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, HUANG Wei, et al. Phase voltage and current fault components based fault segment location method under single-phase earth fault in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2363-2370.
- [13] CRISTIAN G, JUAN M, SANDRA P. Advanced fault location strategy for modern power distribution systems based on phase and sequence components and the minimum fault reactance concept[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 140.
- [14] 李卫国, 许文文, 乔振宇, 等. 基于暂态零序电流凹凸特征的配电网故障区段定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 164-173.  
LI Weiguo, XU Wenwen, QIAO Zhenyu, et al. Fault location method of distribution network based on concave convex characteristics of transient zero sequence current[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 164-173.
- [15] WENG Jiaming, LIU Dong, LUO Ning, et al. Distributed processing based fault location, isolation, and service restoration method for active distribution network[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2015, 3(4): 494-503.
- [16] 李卫国, 许文文, 王旭光, 等. 基于广义 S 变换的有源配电网故障定位方法[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(6): 105-112.  
LI Weiguo, XU Wenwen, WANG Xuguang, et al. Fault location method for active distribution network based on generalized S transform[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(6): 105-112.
- [17] 赵卫斌, 王敬华, 方善忠. 基于边端协同的小电流接地故障区段定位方法[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(2): 1-7.  
ZHAO Weibin, WANG Jinghua, FANG Shanzhong. Section location method of small current ground fault based on edge-end coordination[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(2): 1-7.
- [18] 陈燕擎, 刘涛, 韩文建, 等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 118-126.  
CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single phase to ground fault location considering distributed zero sequence current relationship in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 118-126.
- [19] 朱柏寒, 陈羽, 马金杰. 基于波前陡度的输电线路单端行波故障测距[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 130-135.  
ZHU Baihan, CHEN Yu, MA Jinjie. Single terminal traveling wave fault location of transmission lines based on wavefront steepness[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 45(9): 130-135.
- [20] MOHAMED A G, DOAA K I, EMAN S A, et al. A new impedance-based fault location scheme for overhead unbalanced radial distribution networks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 142.
- [21] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 83-89.  
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on distribution network fault location method based on immune binary particle swarm optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 83-89.
- [22] 王雪文, 石访, 张恒旭, 等. 基于暂态能量的小电流接地系统单相接地故障区段定位方法[J]. *电网技术*,

- 2019, 43(3): 818-825.
- WANG Xuewen, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. A single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 818-825.
- [23] 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.
- [24] 葛维春, 张硕, 张艳军, 等. 基于 $\mu$ PMU同步量测数据的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 39-46.
- GE Weichun, ZHANG Shuo, ZHANG Yanjun, et al. A novel method for fault location of distribution network based on  $\mu$ PMU synchronized measurement data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 39-46.
- [25] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.
- LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 472-479.
- [26] 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.
- [27] 邢志杰, 田行军, 刘宇晰, 等. 电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3540-3546.
- XING Zhijie, TIAN Xingjun, LIU Yuxi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3540-3546.
- [28] CHEN Xi, JIAO Zaibin. Accurate fault location method of distribution network with limited number of PMUs[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 1503-1507.
- [29] 刘小春, 伍惠铖, 李映雪, 等. 配电自动化终端配置的双层优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 136-144.
- LIU Xiaochun, WU Huicheng, LI Yingxue, et al. A bi-level optimization model of distribution automation terminal configuration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 136-144.
- [30] 张楠. 配网自动化在电力系统中的应用[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
- ZHANG Nan. Application of distribution automation in power system[D]. Tangshan: North China University of Technology, 2019.
- [31] MICHAELH K, CHRISTOPHERJ N, NETER J, 等. 应用线性回归模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-08-04

作者简介:

刘江东(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气工程及其自动化; E-mail: ljd@js.sgcc.com.cn

董礼清(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障检测与定位; E-mail: dongliqing1996@163.com

薛晨(1990—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 15195568642@qq.com

(编辑 许威)