

基于配电网故障 D 型行波的改进型检测定位方法

黄守华* 张浩 孙晓燕 杜轶轩

国网安徽省电力有限公司黄山分公司 黄山 245000

* 通讯作者: huangshouhuadl@126.com

【摘要】传统的配电网故障定位方法在复杂性方面存在一定的缺陷,特别是故障发生在支线上。本研究提出了一种基于 D 型行波的故障定位新方法。该方法选择初始行波首先到达的测量点作为参考测量点,并计算出多个故障点之间接收到故障行波信号到参考测量点的距离。然后,选择多个故障点到参考测量点之间的最大距离作为最终故障点的位置。ATP 仿真软件和 MATLAB 软件的仿真结果表明,该方法可以在很短的时间内快速而准确地定位故障。与现有算法相比,该方法无论故障是发生在干线还是支线上都是一致的,从而提高了配电网行波故障定位的准确性和可靠性。

【关键词】配电网;故障定位;D 型行波

Improved detection and location method based on D-type traveling wave in distribution network

Huang Shouhua*, Zhang Hao, Sun Xiaoyan, Du Yiexuan

State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Huangshan Branch, Huangshan, 245000

*Corresponding author: huangshouhuadl@126.com

Abstract: The traditional distribution network fault location method has certain defects in complexity, especially the fault occurs on the branch line. This study proposes a new method for fault location based on D-type traveling waves. This method selects the measurement point where the initial traveling wave first arrives as the reference measurement point, and calculates the distance between the received fault traveling wave signal and the reference measurement point between multiple fault points. Then, the maximum distance between multiple fault points and the reference measurement point is selected as the location of the final fault point. The simulation results of ATP simulation software and MATLAB software show that this method can locate the fault quickly and accurately in a short time. Compared with the existing algorithm, this method is consistent regardless of whether the fault occurs on the trunk or branch, thereby improving the accuracy and reliability of the traveling wave fault location in the distribution network.

Keywords: distribution network; fault location; D-type traveling wave

1 引言

当配电线路发生故障时,快速准确地定位故障非常重要。因为它可以减少电气维护人员故障排除的难度,缩短故障导致的停电时间,并提高电源的可靠性。同时,它也可以给电力公司带来巨大的经济和社会效益。国内外学者对配电网故障的定位方法进行了广泛的研究。国内对配电线路故障定位的研究按原理可分为:阻抗法、行波法、S注入法、智能法和故障指示技术。国外的研究主要集中在故障指示器技术和行波方法上。

阻抗法的优点是投资少,但受线路阻抗,负载和功率参数的影响。因此,该方法不适用于多条支线,而仅适用于相对简单的结构线^[1]。有研究^[2]描述了 S 注入方法的原理。S 注入法的信号能量是有限的,如果故障点通过大电阻接地,或者故障点距离线路起点较远,则信号太弱,无法准确测量^[3, 4]。Intelligent method 将人工智能方法和技术引入了故障距离分析。它包括专家

系统,遗传算法和人工神经网络^[5]。还有研究^[6]描述了一种结合了 BP 算法和 BP 网络,形成了一种新的神经网络,并实现配电网的故障定位的方法。该方法提高了 BP 算法的收敛速度。有研究^[7]改进了蚁群算法以适应动态修饰信息素。但是智能方法的知识基础并不完善,智能方法难以适应配电线路运行的变化。故障指示器技术^[8]由于其结构和原理简单,成本低廉且易于安装而得到了实用。因此,接地故障指示器的效果不能令人满意,其准确性不是很高,并且在发生单相接地故障时常常没有响应。目前主要认为基于行波传播理论的行波方法受过渡电阻,线路负载和系统运行模式的影响较小,可以大大提高配电线路故障定位的可靠性和准确性。研究^[9]和研究^[10]分别提出了一种基于自身故障产生的行波信号的单端和双端方法,但是在故障分支中很难实现。此外,还有研究^[11]针对配电网存在 T 结的情况,提出了一种基于拓扑识别的配电网故障定位算法。研究^[12]

描述了一种新的矩阵算法，该算法不仅可以实现径向网络、树环网络和环形网络的故障定位，而且还可以实现多种能力和多种故障的定位。同时，它也可以准确地定位结束的故障。但是这种方法更加复杂并且需要大量数据。研究^[13]描述了一个35kV故障定位系统。该系统首先用C型行波确定了近似的距离，然后用S注入法对故障进行了精确定位。该方法虽然实现了故障的精确定位，但仍需要高质量的信号产生和接收设备。

本研究提出了一种基于D型行波的故障定位新方法，该方法利用了故障初始波首先到达线端和线长的时间。该方法使故障发生在干线或支线上是一致的，从而提高了配电网行波故障定位的准确性和可靠性。

2 配电线路故障行波传播

如图1所示，1是电源端子的测量点，分支线长为 l_1 ；2、3，…，13、14是每个线路端子的测量点，分支线的长度分别为 $l_2, l_3, \dots, l_{13}, l_{14}$ ；A、B、C，…，J、K是线的分支点，两个相邻点之间的距离是 $l_{AB}, l_{BC}, \dots, l_{IJ}, l_{JK}$ ；S是功率接入点，分别是分支点A和F到 l_{SA} 和 l_{SF} 的距离；当发生k点故障时，故障初始行波从故障点传播到线路末端。在两端，发生反射和投影。同时，折射波可以继续沿线传播。如箭头所示，到达该行的末尾后，将有些反射。

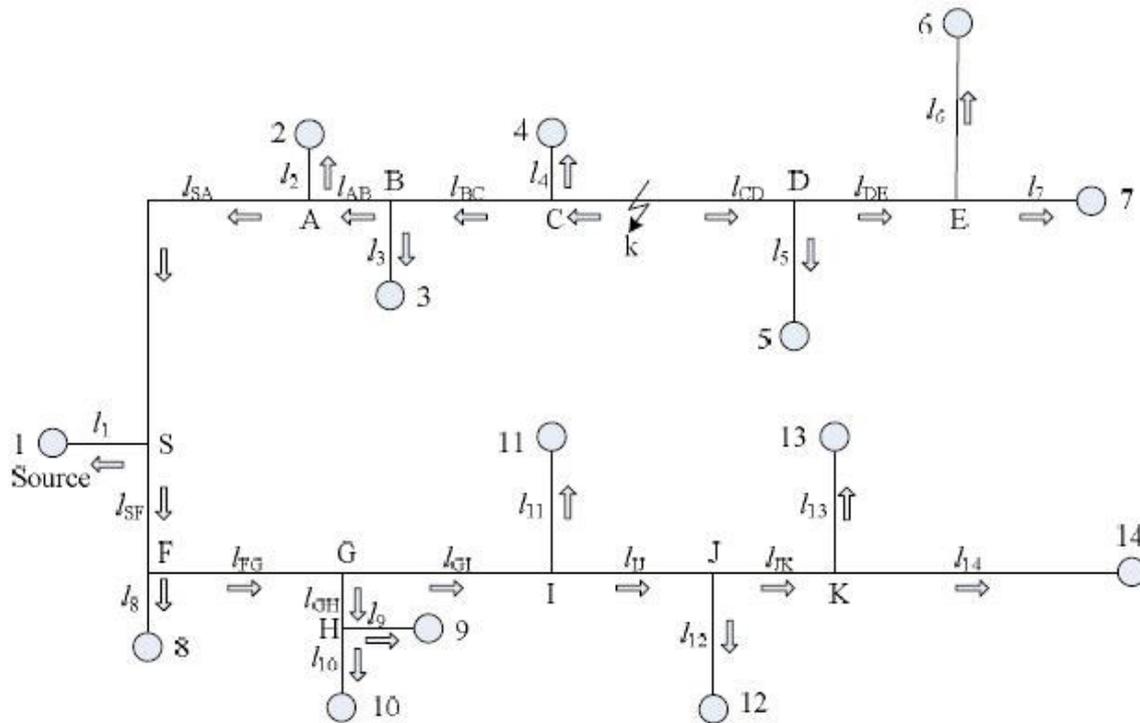


图1 故障行波在配电网中传播的示意图

Figure 1. Schematic diagram of the traveling wave of faults in the distribution network

3 基本原理

如图1所示，假设配电网故障发生在点k。 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_m, \dots, T_{14}$ 是故障初始波基于同步时钟到达每个测量点的时间。初始故障行波首先到达测量点m，到达时间为 T_m 。根据D型行波原理，由测量m和j计算出的测量点与故障点之间的距离为 d_j 。实际故障点至测量值m的距离为 l_{mk} ；其中， $j=1,2,3, \dots, 14$ 。接下来，将对不同的案例进行讨论。

3.1 如果故障发生在干线上，则故障点为 k_1 ，如图2所示。

假定初始故障行波首先到达测量点4。基于D型行波原理，测量点4与故障点之间的距离可以根据测量点4和其他测量点所在的线来计算。

$$d_1 = \frac{l_{4-1} + v(T_4 - T_1)}{2} = l_4, \quad d_2 = \frac{l_{4-2} + v(T_4 - T_2)}{2} = l_4,$$

$$d_3 = \frac{l_{4-3} + v(T_4 - T_3)}{2} = l_4, \quad d_4 = \frac{l_{4-4} + v(T_4 - T_4)}{2} = 0,$$

$$d_5 = \frac{l_{4-5} + v(T_4 - T_5)}{2} = l_{4k}, \quad d_6 = \frac{l_{4-6} + v(T_4 - T_6)}{2} = l_{4k},$$

$$d_7 = \frac{l_{4-7} + v(T_4 - T_7)}{2} = l_{4k}, \quad d_8 = \frac{l_{4-8} + v(T_4 - T_8)}{2} = l_{4k},$$

$$d_9 = \frac{l_{4-9} + v(T_4 - T_9)}{2} = l_4, \quad d_{10} = \frac{l_{4-10} + v(T_4 - T_{10})}{2} = l_4,$$

$$d_{11} = \frac{l_{4-11} + v(T_4 - T_{11})}{2} = l_4, \quad d_{12} = \frac{l_{4-12} + v(T_4 - T_{12})}{2} = l_4,$$

$$d_{13} = \frac{l_{4-13} + v(T_4 - T_{13})}{2} = l_4, \quad d_{14} = \frac{l_{4-14} + v(T_4 - T_{14})}{2} = l_4;$$

其中: l_{4j} ($j = 1, 2, 3, \dots, 14$) 代表测量 4 到测量 j 的长度。所以 $l_{4k} = d_5 = d_6 = d_7$ 并且 $l_{4k} > l_4 > 0$ 。最终结果是, 故障点位于测量 4 和测量 5 之间的直线中, 并且距测量 4 的距离为 l_{4k} 。

3.2 如果故障发生在线路分支点, 则故障点为 k_2 ,

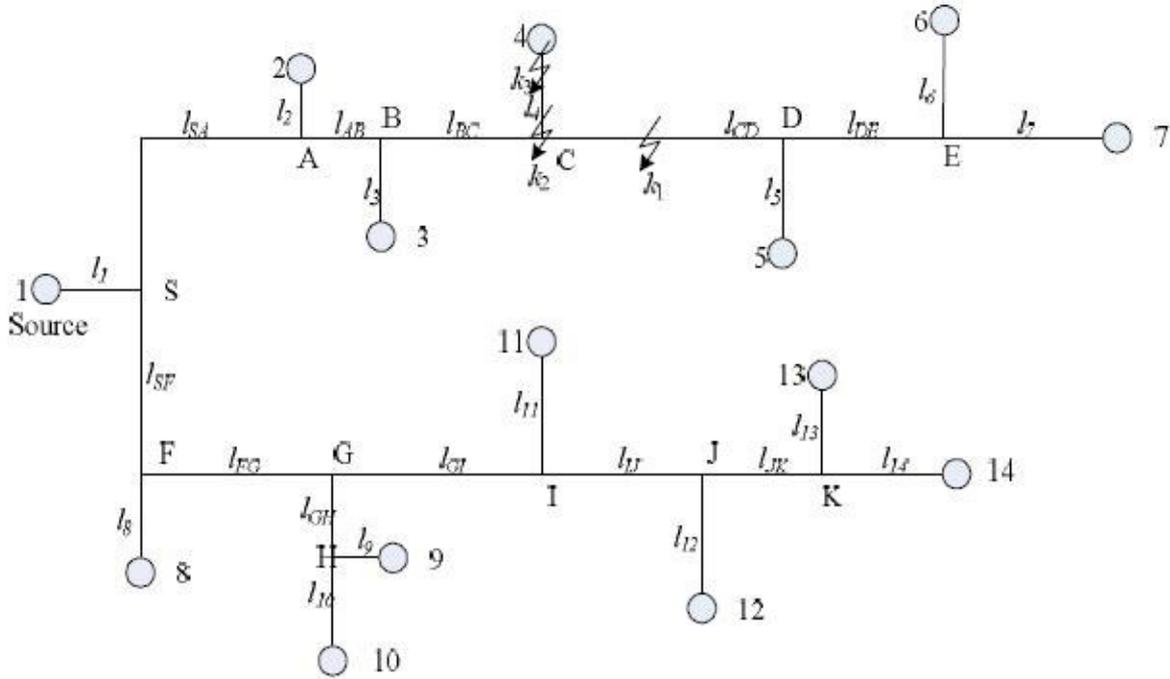


图 2 配电网故障位置图

Figure 2. Fault location diagram of distribution network

$$d_1 = \frac{l_{4-1} + v(T_4 - T_1)}{2} = l_4, d_2 = \frac{l_{4-2} + v(T_4 - T_2)}{2} = l_4,$$

$$d_3 = \frac{l_{4-3} + v(T_4 - T_3)}{2} = l_4, d_4 = \frac{l_{4-4} + v(T_4 - T_4)}{2} = 0,$$

$$d_5 = \frac{l_{4-5} + v(T_4 - T_5)}{2} = l_4, d_6 = \frac{l_{4-6} + v(T_4 - T_6)}{2} = l_4,$$

$$d_7 = \frac{l_{4-7} + v(T_4 - T_7)}{2} = l_4, d_8 = \frac{l_{4-8} + v(T_4 - T_8)}{2} = l_4,$$

$$d_9 = \frac{l_{4-9} + v(T_4 - T_9)}{2} = l_4, d_{10} = \frac{l_{4-10} + v(T_4 - T_{10})}{2} = l_4,$$

$$d_{11} = \frac{l_{4-11} + v(T_4 - T_{11})}{2} = l_4, d_{12} = \frac{l_{4-12} + v(T_4 - T_{12})}{2} = l_4,$$

$$d_{13} = \frac{l_{4-13} + v(T_4 - T_{13})}{2} = l_4, d_{14} = \frac{l_{4-14} + v(T_4 - T_{14})}{2} = l_4;$$

其中: l_{4j} ($j = 1, 2, 3, \dots, 14$) 代表测量点 4 到测量点 j 的长度。所以 $l_{4k} = d_1 = \dots = d_{14}$, 且 $l_{4k} > l_4 > 0$ 。最终结果是, 故障点位于测量 4 和测量点 1 之间的直线上, 并且距测量点 4 的距离为 l_{4k} ;

3.3 如果故障发生在支线上, 则故障点为 k_3 , 如图 2 所示。

假定初始故障行波首先到达测量点 4。基于 D 型行波原理, 测量点 4 与故障点之间的距离 可以通过测量点 4 和其他测量点所在的线来计算。

如图 2 所示。

假定初始故障行波先到达测量点 4。根据 D 型行波原理, 测量 4 与故障点之间的距离 可以通过测量 4 和其他测量点的线来计算该点。

$$d_1 = \frac{l_{4-1} + v(T_4 - T_1)}{2} = l_{4k}, d_2 = \frac{l_{4-2} + v(T_4 - T_2)}{2} = l_{4k},$$

$$d_3 = \frac{l_{4-3} + v(T_4 - T_3)}{2} = l_{4k}, d_4 = \frac{l_{4-4} + v(T_4 - T_4)}{2} = 0,$$

$$d_5 = \frac{l_{4-5} + v(T_4 - T_5)}{2} = l_{4k}, d_6 = \frac{l_{4-6} + v(T_4 - T_6)}{2} = l_{4k},$$

$$d_7 = \frac{l_{4-7} + v(T_4 - T_7)}{2} = l_{4k}, d_8 = \frac{l_{4-8} + v(T_4 - T_8)}{2} = l_{4k},$$

$$d_9 = \frac{l_{4-9} + v(T_4 - T_9)}{2} = l_{4k}, d_{10} = \frac{l_{4-10} + v(T_4 - T_{10})}{2} = l_{4k},$$

$$d_{11} = \frac{l_{4-11} + v(T_4 - T_{11})}{2} = l_{4k}, d_{12} = \frac{l_{4-12} + v(T_4 - T_{12})}{2} = l_{4k},$$

$$d_{13} = \frac{l_{4-13} + v(T_4 - T_{13})}{2} = l_{4k}, d_{14} = \frac{l_{4-14} + v(T_4 - T_{14})}{2} = l_{4k};$$

其中: l_{4j} ($j = 1, 2, 3, \dots, 14$) 代表测量 4 到测量 j 的长度。所以 $l_{4k} = d_1 = \dots = d_{14}$, 且 $l_{4k} > l_4 > 0$ 。最终结果是故障点位于测量 4 和测量 1 之间的直线上, 并且距测量 4 的距离为 l_{4k} 。

通过以上分析, 在电网干线, 支线或分支点上, 距离故障初始行波首先到达的故障点与测量点之间的距离 始终是 D 型行波原理计算出的最大值。因此, 可以通过以下步骤实现基于 D 型行波原理的配电网故障定位方法:

首先选择参考测量点。假设 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_m, \dots, T_{14}$ 是故障初始波基于同步时钟到达每个测量点的时间, 测量点 m 是初始故障行波最先到达的点, 到达时间为 T_m , 选择该测量点作为参考测量点;

然后进行故障的初步定位。选择参考测量点 m 后, 使用参考测量点 m 和测量点 j 计算参考测量点与多个故障点之间的距离。该距离可以定义为: $d_j = \frac{l_{m-j} + v(T_m - T_j)}{2}$, 其中 l_{m-j} 是测量点 m 和测量点 j 之间的距离, v 是行波在该行中的传播速度;

最后进行精确的故障位置定位。从初始故障位置结果中选择最大值, 这就是准确的故障位置, 即故障点与测量点之间的距离为 l_{mk} , $l_{mk} = \max(d_j)$ 。

可以看出, 该方法不需要考虑故障分支, 可以用相同的方法简单计算和故障发生在什么位置。因此这种方法是简便而通用的。

4 仿真分析

首先利用 ATP 仿真软件构建典型的 10kV 配电网线路仿真模型, 然后利用 MATLAB 软件对 ATP 仿真数据进行处理。使用基于 D 型理论的配电网行波故障定位分析处理数据。构建图 2 中的 10kV 架空配电网模型。选择 LCC 架空线模型作为线模型。电线型号选择 LGJ-70/10, 塔架型号选择 ZY-12A, 横臂选择 HD-106A, 并且电线排列成三角形。1 是电源中的测量点, 支线的长度为 $l_1=100m$ 。2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14 是配电网中各线路终端的测量点, 各支线路的长度分别为 $l_2=100m, l_3=150m, l_4=100m, l_5=200m, l_6=300m, l_7=200m, l_8=100m, l_9=100m, l_{10}=200m, l_{11}=200m, l_{12}=200m, l_{13}=200m, l_{14}=400m$; A, B, C, ..., J, K 是每条线的分支点。每个相邻点之间的距离为: $l_{AB}=500m, l_{BC}=800m, l_{CD}=1500m, l_{DE}=1000m, l_{FG}=500m, l_{GH}=100m, l_{GI}=1500m, l_{Ij}=1000m, l_{JK}=100m$; S 是电源接入点, S 与分支点 A 之间的距离为 $l_{SA}=1500m$ 。点 S 与分支点 F 之间的距离为 $l_{SF}=500m$ 。实际故障点 K 与测量点 2 之间的距离为 50m。行中行波速度为 $v=3 \times 10^8 m/s$ 。采样频率为 10MHz。故障发生时间为 0.025s。

假设金属 A 相接地故障发生在距测量点 2 距离 50m 的点。故障发生后 0.5ms 内, 测量点 1 到 14 的电压行波的模式如图 3 所示。

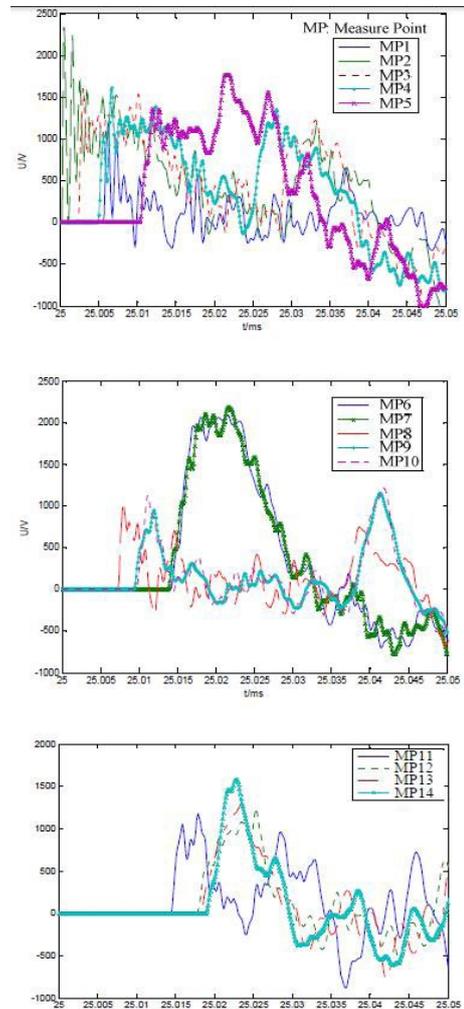


图 3 每个测量点到接地故障的 2 种电压行波模式
Figure 3. Two voltage traveling wave modes from each measurement point to ground fault

小波变换具有时域和频域定位的特点, 已成为行波故障定位的有力工具^[14-15]。对电压行波进行小波变换后, 故障初始行波 (2 模分量) 到达每个测量点终点的时间为 $T_1=25006.2\mu s, T_2=25002.4\mu s, T_3=25002.3\mu s, T_4=25002.7\mu s, T_5=25009.1\mu s, T_6=25011.6\mu s, T_7=25011.3\mu s, T_8=25009.4\mu s, T_9=25011.3\mu s, T_{10}=25000.4\mu s, T_{11}=25012.5\mu s, T_{12}=25012.9\mu s, T_{13}=25017.4\mu s, T_{14}=25019.3\mu s$ 。

首先选择参考测量点。综合以上分析, 测量点 2 为初始故障行波最先到达的点, 对应的初始故障到达时间为 $T_2=25002.4\mu s$ 。因此, 我们选择了测量点 2 作为参考测量点;

然后进行初步故障定位。根据 D 型原理, 使用参考测量点 2 和测量点 1 位于的线计算参考测量点 2 和可能的故障点之间的距离。此距离可以定义为 d_1 :

$d_1 = \frac{l_1 + l_2 + l_{SA} + v(T_2 - T_1)}{2} = 55m$ 。通过相同的方法, 使用参考测量点 2 和另一个测量点所处的线来计算参考

测量点 2 与可能的故障点之间的距离。我们可以得到距离: $d_2=0\text{m}$, $d_3=45\text{m}$, $d_4=45\text{m}$, $d_5=50\text{m}$, $d_6=45\text{m}$, $d_7=40\text{m}$, $d_8=50\text{m}$, $d_9=50\text{m}$, $d_{10}=55\text{m}$, $d_{11}=50\text{m}$, $d_{12}=55\text{m}$, $d_{13}=45\text{m}$, $d_{14}=55\text{m}$;

最后进行准确故障定位。从初步的故障定位结果中选择最大值, 这就是准确的故障定位结果, 即故障点与测量点 2 之间的距离为 $l_{2k} = \max(d_j) = d_1 = 55\text{m}$ 。这意味着故障点位于测量点 2 和点 1 所在的直线上, 参考点与故障点之间的距离为 55m。与实际故障点相比, 测量误差为 5m。

故障定位结果表明故障发生在测量点 2 的支线上, 到测量点 2 的距离为 50m。故障类型为 A 到地故障, 具有不同的电阻抗性和不同的螺栓故障。尽管金属故障类型和过渡电阻都不同, 但是配电网故障定位方法仍然可以实现精确定位。另外, 不同的金属故障和不同的单相过渡电阻故障均不影响故障定位结果。这是因为 D 型故障定位方法仅基于故障初始行波定位时间, 而与行波振幅无关。还可以看出, 当发生配电线路故障时, D 型行波故障定位方法可以实现准确的故障定位。该方法不仅计算简单, 而且对支线和干线具有相同的作用。需要说明的是, 当网络线路比较复杂时, 远离故障点的测量点很难获得初始行波信号, 或者故障起始行波到达的

时间太长, 这是由于网络的衰减所致。根据 D 型行波原理, $l_{1k} = \frac{l_1+l_2+v(T_1-T_2)}{2}$ 。当 T2 增加时, 从故障点到点 1 的计算距离小于实际距离, 但不会影响故障定位的最终结果。

综上所述, 当配电网发生故障时, 基于 D 型行波故障测距方法, 无需考虑故障分支线, 对分支线和干线的影响相同。该方法计算简单, 提高了配网行波故障测距的准确性和可靠性。

5 结论

本文分析了配电网故障的行波过程, 提出了一种基于 D 型行波的故障定位新方法。该方法首先选择初始行波首先到达的测量点作为参考测量点, 然后计算接收到故障行波信号的多个故障点到参考测量点的距离。最后, 选择多个故障点到参考测量点之间的最大距离作为最终故障点的位置。ATP 仿真软件和 MATLAB 软件的仿真结果表明, 该方法可以在很短的时间内快速、准确地实现故障定位。与现有算法相比, 该方法无论故障发生在干线还是支线上都是一致的, 从而提高了配电网行波故障定位的准确性和可靠性。因此, 该方法具有一定的技术应用前景, 可用于配电网的实时在线监测和故障定位。

【参考文献】

- [1] Ji Tao, Sun Tong-jing, Xue Yong-duan, et al. Current status and development of fault location technique for distribution network[J]. Relay, 2005, 33(24): 32-37.
- [2] Sang Zai-zhong, Pan Zhen-cun, Ding Lei, et al. The Principle and Application of "S Injection Method" for Faulty Line Selection[J]. China Power, 1997, 30(6): 44-45, 62.
- [3] Zhang Hui-fen, Pan Zhen-cun, Sang Zai-zhong. Injecting Current Based Method For Fault Location in Neutral Isolated Power System[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(3): 64-66.
- [4] Qi Zheng . Research on Technology of Line Detection and Fault Location for Single-phase-to-earth Fault in Neutral Point Non-effectively Grounded Systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [5] Xu Ru-jun , Yan Feng . Location methods of single-phase earth fault about 10kV distribution network[C]. Information technology and Application meeting, 2009.
- [6] Dai Guang-wu. Study on Fault Area Location and Isolation of Distribution Network[D]. Nanjing: Nanjing University of Science&Technology, 2009.
- [7] Wang Lin-chuan, Li Qing-xin, Liu Xin-quan, et al. Distribution network fault location based on the improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (22) : 29-33, 53.
- [8] Xu Rong-ming. An Automatic Location System of Distribution Line Fault Based on Fault Indicator[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(10): 66-67.
- [9] NouriH, Chun Wang, Davies T. An accurate fault location technique for distribution lines with tapped loads using wavelet transform[C]. Power Tech Proceedings 2001 IEEE Porto, Volume3, 10 ~ 13 Sept.2001 Page(s): 4pp.vol.3.
- [10] DWP Thomas, C Christopoulos, et al. Single and double ended travelling-wave fault location on a MV system[C]. Development in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference, Volume 1, 5-8 April 2004 Page(s): 200-203 vol.1.
- [11] Lin Jing-dong, Cao Chang-xiu, Zhang Bang-li, et al. Fault Section Diagnosis Algorithm of Distribution Networks Based on Topology Identification[J]. Journal of Chongqing University, 2001, 24(5): 51-54.

- [12] Xie Yan-fei. Study on Improved Matrix Algorithm for Fault Location in Power Distribution Network[J]. Journal of Electric Power, 2011, 26(3): 199-201.
- [13] Cheng Yan, Song Li-jun, Wang Wen, et al. Systematic Research and Relization of Fault Location of 35kV Lines[J]. Relay, 2007, 35(8): 16-20.
- [14] Fernando H. Magnago, Ali Abur. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on Power Deilvery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [15] Dong Xinzhou, He Jiali, Ge Yaozhong. Application of Wavelet Transform in Detection of Fault Travelling Waves[J]. Relay, 1998, 26(5): 1-4.