

# 基于行波理论的多电源配电网故障定位方法

盖志强, 薛斌, 李雅洁

(国网山西省电力公司 长治供电公司, 山西 长治 046000)

**摘要:**传统的故障定位方法因缺少有效的故障点测距过程,导致其测距误差、故障定位耗时以及故障定位复杂度增加。为有效解决上述问题,针对多电源配电网,基于行波理论设计了一种新的故障定位方法。首先选取多电源配电网故障初始行波最先到达的位置点作为参考测量点。然后基于行波理论分析参考测量点和其他接收到故障行波信号的测量点,并计算多个故障点到参考测量点的距离,通过选取最大值确定多电源配电网最终的故障点位置。仿真实验结果表明:该方法能够有效降低测距误差、减少故障定位耗时、降低故障定位复杂度,且受噪声影响较低,具有较强的有效性和实用性。

**关键词:**行波理论;多电源配电网;故障定位;故障测距

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23357

## Fault Location Method for Multi-power Distribution Network Based on Traveling Wave Theory

GAI Zhiqiang, XUE Bin, LI Yajie

(Changzhi Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Changzhi 046000, Shanxi, China)

**Abstract:** The traditional fault location method lack effective fault location process, which leads to the increase of ranging error, fault location time and complexity. In order to effectively solve the above problems, a new fault location method for multi-power distribution network based on traveling wave theory was designed. Firstly, the position point where the initial traveling wave reaches the fault of multi-power distribution network was selected as the reference measurement point. Then, based on traveling wave theory, the reference measurement points and other measurement points receiving fault traveling wave signals were analyzed, and the distances between multiple fault points and reference measurement points were calculated, and the final fault point location of multi-power distribution network was determined by selecting the maximum value. The simulation results show that this method can effectively reduce the ranging error, the time of consumption and complexity of fault location, and it is less affected by noise, so it is effective and practical.

**Key words:** traveling wave theory; multi-power distribution network; fault location; fault distance measurement

在电力系统中,配电网承担着分配电能的功能,其直接面向终端客户,在电力系统中占据十分重要的地位。配电网有多种不同的接线方式,如单电源辐射型接线和多电源环网接线。在单电源辐射型接线方式中,继电保护装置的整定过程较为简单,使得整体供电安全性偏低<sup>[1-2]</sup>。相比之下,多电源环网接线方式具有较高的供电安全性,但其中继电保护装置与其余设备之间的配合存在较大的难度。

为了有效解决上述问题,相关学者针对多电源配电网故障定位方面的内容展开研究。例如:

针对含多个分布式电源的配电网,文献[3]构建了故障电流编码方式和适应多个分布式电源的开关函数,通过免疫算法计算各个抗体的匹配度,同时对个体进行评价,从而实现故障定位。该方法虽然测距误差较小,但故障定位耗时较长。文献[4]利用了适应度更强的变异和交叉算子,在提升收敛速度的同时,避免定位过程陷入局部最优解。采用改进遗传算法的含分布式电源配电网故障定位方法,使用适应度函数和开关函数,以更好地适应分布式电源的不同投切情况,从而实现配电网故障定位。但该方法缺少有效的故障

**基金项目:** 国家电网公司科技项目(5205D020000X)

**作者简介:** 盖志强(1980—),男,硕士,高级工程师, Email: gzq198080@163.com

点测距过程,导致故障定位复杂度大幅度增加。文献[5]在识别畸变节点故障信息的基础上,采用赋值法校正畸变节点,然后根据节点过流信息初步判定故障位置。基于此,利用故障范围内节点间的虚拟导纳值,形成虚拟阻抗矩阵从而确定具体的故障位置。该方法虽然定位速度较快,但故障定位过程的复杂度较大。文献[6]通过分析配电网结构及故障行波的路径,设定有参考节点,通过判断故障发生前后的矩阵差值来构建故障分支判定矩阵。然后在最优行波采集配置的前提下,构建分支系数函数来定位故障点。该方法虽然定位速度较快,但测距误差也较大。

为了解决以上方法存在的问题,本研究提出一种基于行波理论的多电源配电网故障定位方法,通过选取多电源配电网故障初始行波最先到达的位置点作为参考测量点,然后基于行波理论分析参考测量点和其他接收到故障行波信号的测量点,得到多个故障点到参考测量点的距离,再选取最大值确定多电源配电网最终的故障点位置,从而实现了多电源配电网故障定位。

## 1 故障定位方法设计

### 1.1 多电源配电网故障行波过程及测距

电力系统线路中的各种故障主要对应了电压和电流的变化,这种变化在各配电节点中并不是立即出现的,而是通过规定的形式、速度从该点向电力线路或者其他各点传播。在整个过程中,电力线路中的电压、电流不仅和时间存在关联,同时也和距离存在一定联系<sup>[5-6]</sup>。所以,在实际研究的过程中,电力线路的特征需以分布参数的形式表示,整个过渡的过程实际就是电磁波在电力线路的传播过程,简称为波过程。

利用现代电力系统分析软件,以馈电线路的形式简化描述多电源配电网结构,简化模型如图1所示。

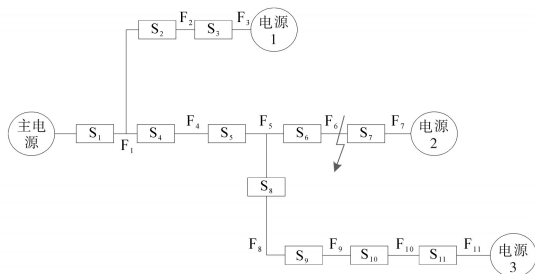


图1 多电源配电网简化模型示意图

Fig.1 Schematic of simplified multi-power distribution network model

图1中,多电源包括1个主电源和3个分布式电源。当馈线区段 $F_6$ 中存在故障时, $S_1 \sim S_{11}$ 的状态依次为1,-1,-1,1,1,1,-1,0,0,0,0。假设从主电源至负载侧的方向为馈线正方向,那么上述状态中,1表示开关S处流过与正方向相同的故障电流,-1表示开关S处流过与正方向相反的故障电流,0表示无故障电流流过。

电压和电流以波的形式沿着导线传播的过程称为行波。当开关闭合时,将经过时间 $t$ 后沿水平方向传播的电压行波以及电流行波到达位置设置为 $x$ 点。当前,对地电容 $C_0x$ 两端电压均为 $u$ ,则获取的电荷为 $C_0xu$ ;线路电感 $L_0x$ 形成的磁链表示为 $L_0xi$ , $i$ 为电流行波。其中,电力线路电感磁链依托于时间 $t$ 建立,为此能够获取下式所示结果:

$$\begin{cases} C_0xu = it \\ L_0xi = ut \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_0$ 为对地电容, $L_0$ 为线路电感初始值。

对式(1)进行求解,能够获取电压行波和电流行波表达式如下:

$$\begin{cases} Z = \frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \\ k = \frac{x}{t} = \frac{1}{\sqrt{L_0C_0}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z$ 为电压行波; $k$ 为电流行波。

结合式(2),通过基尔霍夫电压定律以及电流定律能够获取如下式所示的微分方程:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

通过式(3)分别对 $x, t$ 再次进行求导<sup>[7]</sup>,获取以下的二阶偏微方程:

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases} \quad (4)$$

以下获取的波动方程通解为

$$\begin{cases} u(x,t) = u_q(x+vt) + u_f(x+vt) \\ i(x,t) = i_q(x+vt) + i_f(x+vt) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_q, u_f$ 分别为运动波沿线 $q$ 点、 $f$ 点处波动电压; $i_q, i_f$ 分别为运动波沿线 $q$ 点、 $f$ 点处波动电流。

通过式(5)可知,电压和电流的解均包含 $(x-vt)$ 和 $(x+vt)$ 函数部分;同时也能够看出: $(x-vt)$ 代

表速度  $v$  沿着  $x$  正方向运动的波,  $(x+vt)$  代表速度  $v$  沿着  $x$  负方向运动的波。

行波在电力线路传播的过程中,假设任意节点参数突然发生变化,通过能量守恒定律<sup>[8]</sup>可知,电磁场能量必须经过重新分配后,才能够有效地确保节点前后单位长度导线中的电磁场能量一致。

设定在节点  $A$  中仅有一组电压值  $(u_{1q}, u_{2q})$  和电流值  $(i_{1q}, i_{2q})$  则存在下式关系:

$$\begin{cases} u_{1q} + u_{1f} = u_{2q} \\ i_{1q} + i_{1f} = i_{2q} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_{1f}$  为节点  $A$  处的波动电压;  $i_{1f}$  为节点  $A$  的波动电流。

将式(6)和各个线路的波动方程进行联立,获取电压前行波在节点  $A$  的反射行波和折射行波:

$$\begin{cases} u_{1f} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_{1q} = \alpha_u u_{1q} \\ u_{2q} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u_{1q} = \beta_u u_{1q} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\alpha_u$  为电压行波对应的反射系数;  $\beta_u$  为电压行波对应的折射系数。

结合行波理论可知,假设以一样的传播速度  $v$  传输至  $M$  端和  $N$  端母线,两者的传输时间分别为  $T_M, T_N$ ,那么则存在如下式所示的关系:

$$\begin{cases} \frac{D_{MF}}{v} - \frac{D_{NF}}{v} = T_M - T_N \\ D_{MF} - D_{NF} = L \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $D_{MF}$  为  $M$  端电荷量;  $D_{NF}$  为  $N$  端电荷量;  $L$  为线路两端电荷量的差动值。

通过公式(8),能够分别对  $D_{MF}, D_{NF}$  进行求解,过程如下:

$$\begin{cases} D_{MF} = \frac{L + v(T_M - T_N)}{2} \\ D_{NF} = \frac{L - v(T_M - T_N)}{2} \end{cases} \quad (9)$$

在上述过程中,为了更加准确获取故障初始行波运动到母线两端的具体时间,分别在线路两端安装时钟,同时确保时钟的时间是相同的<sup>[9-10]</sup>。

## 1.2 多电源配电网故障定位

设定配电网在形成故障后,在时钟完全同步的情况下,故障点初始行波运动至各个测量点  $f$  ( $f=1, 2, \dots, 13$ ) 所用的时间为  $T_f$ 。采用行波理论可以计算测量点所在线路对应故障点到测量点的距离以及实际故障点到测量点的距离。以下分别针对不同的故障情况进行分析研究。

### 1.2.1 配电网主线故障

如果故障初始行波最先到达预先设定的测量点3,通过行波理论,获取测量点3和其它测量点所在线路中故障点到测量点3的距离:

$$D_1 = \begin{cases} \frac{L_{3-1} + v(T_3 - T_1)}{2} \\ \frac{L_{3-2} + v(T_3 - T_2)}{2} \end{cases} \quad (10)$$

$$D_2 = \begin{cases} \frac{L_{3-4} + v(T_3 - T_4)}{2} \\ \frac{L_{3-5} + v(T_3 - T_5)}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $D_1$  为距离组合,即点1、点2到测量点3的距离;  $D_2$  为距离组合,即点4、点5到测量点3的距离;  $L_{3-1}$  为实际故障点到点1的距离;  $L_{3-2}$  为实际故障点到点2的距离。

### 1.2.2 配电网分支点故障

假设测量点3优先测到故障初始行波,通过行波理论,计算测量点3和剩余测量点所在线路的故障点<sup>[11-12]</sup>,然后计算故障点和测量点3两者之间的距离:

$$D_3 = \begin{cases} \frac{L_{3-6} + v(T_3 - T_6)}{2} \\ \frac{L_{3-7} + v(T_3 - T_7)}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$D_4 = \begin{cases} \frac{L_{3-8} + v(T_3 - T_8)}{2} \\ \frac{L_{3-9} + v(T_3 - T_9)}{2} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $D_3$  为距离组合,即点6、点7到测量点3的距离;  $D_4$  为距离组合,即点8、点9到测量点3的距离;  $L_{3-6}$  为实际故障点到点6的距离;  $L_{3-7}$  为实际故障点到点7的距离;  $L_{3-8}$  为实际故障点到点8的距离;  $L_{3-9}$  为实际故障点到点9的距离。

### 1.2.3 配电网分支线故障

假设测量点3优先测到故障初始行波,通过行波理论,计算各个故障点到测量点3的距离:

$$D_5 = \begin{cases} \frac{L_{3-10} + v(T_3 - T_{10})}{2} \\ \frac{L_{3-11} + v(T_3 - T_{11})}{2} \end{cases} \quad (14)$$

$$D_6 = \begin{cases} \frac{L_{3-12} + v(T_3 - T_{12})}{2} \\ \frac{L_{3-13} + v(T_3 - T_{13})}{2} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $D_5$  为距离组合,即点10、点11到测量点3

的距离; $D_6$ 为距离组合,即点12、点13到测量点3的距离; $L_{3-10}$ 为实际故障点到点10的距离, $L_{3-11}$ 为实际故障点到点11的距离; $L_{3-12}$ 为实际故障点到点12的距离, $L_{3-13}$ 为实际故障点到点13的距离。

综合分析上述情况可知,不管故障是发生在配电网的哪个部分,故障点中的故障初始行波优先到达测量点的距离明显高于采用行波理论进行计算结果的最大取值。所以,通过行波理论能够有效实现多电源配电网故障定位,具体操作步骤如图2所示。

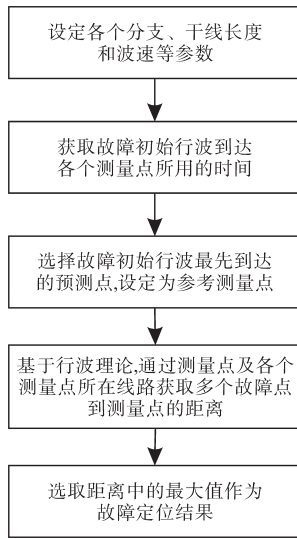


图2 基于行波理论的多电源配电网故障定位过程示意图

Fig.2 Schematic of fault location process of multi-power distribution network based on traveling wave theory

图2中,在设置相关参数的基础上,获取故障初始行波到达各个测量点所用的时间。然后设置参考测量点,利用行波理论获得通过测量点及各个测量点所在线路获取多个故障点到测量点的距离,并将测量结果中的最大值作为故障定位结果。

综上所述,基于行波理论的多电源配电网故障定位具体步骤如下:

1)选取参考测量点:设定 $T_p, T_q$ 为时钟整体同步情况下,计算故障点初始行波运行到测量点 $P, Q$ 所用时长<sup>[13-14]</sup>。假设测量点 $P$ 是最先测量到故障初始行波的。所以,将其设定为参考测量点。

2)对多电源配电网故障展开初步定位:当确定参考测量点 $P$ 后,通过行波理论,分别采用参考测量点 $P$ 和测量点 $Q$ 所在线路,计算多个故障点到参考点之间的距离<sup>[15]</sup>,如下式所示:

$$D_Q = \frac{L_{P-Q} + v(T_p - T_Q)}{2} \quad (16)$$

3)多电源配电网故障精确定位:在步骤2)的故障初步定位结果中距离最大值,将其设定为最终的故障定位结果,也就是实际故障点到测量点 $P$ 的距离:

$$L_{pf} = \max(D_Q) \quad (17)$$

综上所述,完成了基于行波理论的多电源配电网故障定位,首先准确选取多电源配电网故障初始行波最先到达的位置点作为参考测量点,从根本上降低测距误差,然后在行波理论的基础上计算多个故障点到参考测量点的距离,通过选取最大值的方式确定多电源配电网最终的故障点位置。该过程故障定位复杂度较低,使得故障定位耗时也随之降低。

## 2 仿真实验

为验证上述基于行波理论的多电源配电网故障定位方法的综合有效性,以PSCAD/EMTDC为平台建立配电网仿真模型,该仿真系统参数设置如下:以69节点配电网为仿真对象,该配电网由2条放射链路构成,线路共包含69个节点、67条馈线,其中包含2个分布式电源,额定电压为120 kV,线路最高输送容量为21 MV·A。

由于仿真模型中节点较多,因此,以其中含有故障的一部分为例,绘制其节点模型,如图3所示。

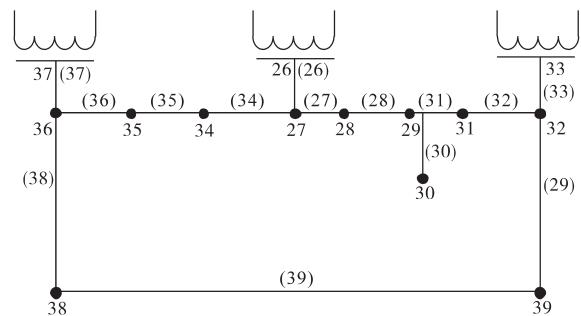


图3 实验算例节点模型

Fig.3 Experimental example node model

以测距误差、故障定位耗时和定位过程资源占用率为指标,设计对比测试实验。文献[3]中的基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位方法以及文献[4]中的基于改进遗传算法的配电网故障定位方法分别利用免疫算法和遗传算法,从群智能搜索的角度设计故障定位过程,与本文利用行波理论的方式分属于不同的定位方

式,因此,将二者作为对比方法,与本文方法共同完成性能验证。

### 2.1 测距误差

为了验证多电源配电网故障定位结果的准确性,将测距误差设定为评价指标,测距误差越低,则说明多电源配电网故障定位结果准确性越高;反之,则说明多电源配电网故障定位结果准确性越低。实验对比三种方法在不同故障类型下的测距误差变化情况,具体实验对比结果如表1所示。

表1 不同方法的测距误差对比结果

Tab.1 Comparison results of ranging errors of different methods

故障类型	接地电阻/ $\Omega$	测距误差/m		
		本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
AB短路	5	1.2	1.4	1.6
	15	1.2	1.2	1.8
	20	1.2	1.4	2.0
	30	1.2	1.6	1.8
	50	1.2	1.6	1.6
	100	1.2	1.3	2.0
三相短路接地	5	1.2	1.7	1.4
	15	1.2	1.8	1.8
	20	1.3	1.8	2.0
	30	1.2	1.7	1.7
	50	1.2	1.6	1.8
单相短路接地	5	1.2	1.4	2.1
	15	1.1	1.4	1.9
	20	1.2	1.6	1.9
	30	1.2	1.6	1.8
	50	1.3	1.5	2.0
100	1.2	1.4	1.8	

分析表1中的实验数据可知,在三种测试方法中,本文方法的测距误差为最低,不管是针对AB短路、三相短路接地还是单相短路接地,本文方法的测距误差几乎维持在1.2 m左右。这是因为本文方法通过行波理论计算多个故障点到参考测量点的距离,确保计算结果的准确性,有效地降低了测距误差。

### 2.2 故障定位耗时

针对不同类型的故障,采用三种不同的方法进行故障定位,并对比三种方法的故障定位耗时,具体对比结果如表2所示。为更直观地反映不同方法的故障定位耗时,将表2数据绘制为图4。

表2 不同方法的故障定位耗时对比结果

Tab.2 Comparison results of time-consuming fault location of different methods

故障类型	接地电阻/ $\Omega$	故障定位耗时/s		
		本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
AB短路	5	5	9	9
	15	7	11	9
	20	6	12	11
	30	5	9	9
	50	5	12	10
	100	5	9	12
三相短路接地	5	5	9	9
	15	5	13	12
	20	6	10	13
	30	5	11	9
	50	5	9	13
	100	8	11	11
单相短路接地	5	5	11	9
	15	5	9	9
	20	7	12	9
	30	5	10	10
	50	5	9	9
	100	5	12	12

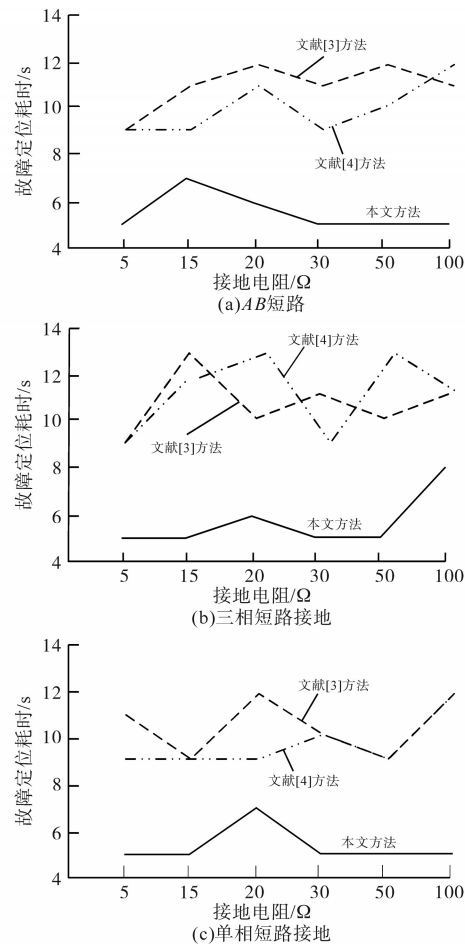


图4 不同方法的故障定位耗时对比

Fig.4 Time consuming comparison of different fault location methods

综合分析表2和图4中的实验数据可知,相比另外两种传统方法,本文方法的故障定位耗时明显更低一些,这主要是因为本文方法采用行波理论对故障点对测量点之间的距离进行计算,有效确保计算结果的准确性,从而简化计算环节,促使整个方法定位耗时得到明显降低。

### 2.3 定位过程资源占用率

为了更加全面验证所提方法的有效性,以定位过程资源占用率为指标,验证3种不同方法的故障定位复杂度。定位过程资源占用率越低,说明故障定位复杂度越低。具体实验对比结果如图5所示。

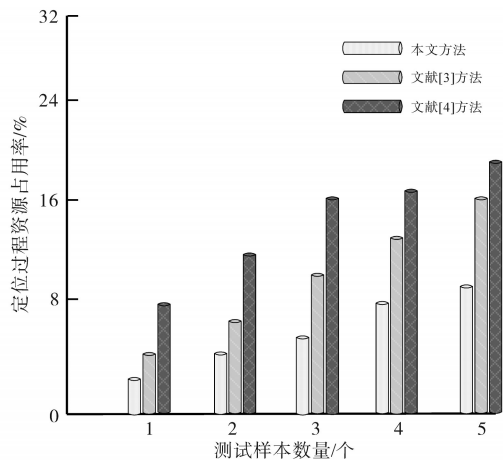


图5 不同方法的故障定位复杂度对比

Fig.5 Comparison of the complexity of fault location of different methods

分析图5中的实验数据可知,本文方法的定位过程资源占用率更低,说明其故障定位复杂度在三种方法中为最低,这是因为本文方法通过行波理论进行故障定位,在降低测距误差的同时避免了无效的测算过程,从而使得故障定位复杂度得到有效降低。

### 2.4 不同噪声下的定位结果

实际系统中,测量到的行波混杂有不同成分的噪声,如高斯白噪声,有可能会对故障定位的结果产生影响。为此,在线路中含有不同噪声的情况下,测试不同方法的定位误差,结果如图6所示。分析图6中的实验数据可知,随着噪声含量的降低,不同方法的定位误差也随之降低。而相比于另外两种方法,本文方法的定位误差始终更少,这是因为本文方法通过行波理论计算多个故障点到参考测量点的距离,受噪声影响较低,有效降低了定位误差。

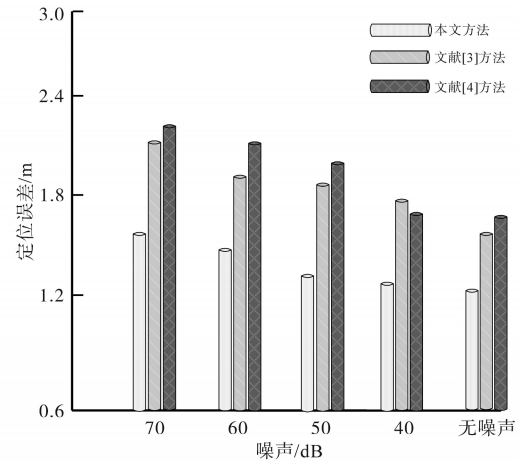


图6 含噪情况下不同方法的定位误差对比

Fig.6 Comparison of positioning errors of different methods under noisy conditions

## 3 结论

配电网是电力系统的重要组成部分,因其中线路复杂、多变,导致在配电网中存在线路故障时,很难快速寻找到故障点的精确位置。为了有效解决该问题,本研究设计了一种基于行波理论的多电源配电网故障定位方法,并通过仿真实验结果证明了该方法能够有效减少测距误差和定位耗时,也能够降低故障定位过程的复杂度,提高噪声影响下的定位结果。主要是由于本文方法通过选取多电源配电网故障初始行波最先到达的位置点作为参考测量点,从根本上降低测距误差,然后基于行波理论分析参考测量点和其他接收到故障行波信号的测量点,并计算多个故障点到参考测量点的距离,通过选取最大值准确判定多电源配电网最终的故障点位置。

### 参考文献

- [1] 陈辉,周羽生,刘诗涵,等.基于改进和声算法的含DG配电网故障定位[J].电力科学与技术学报,2018,33(2):125-130,136.  
Chen Hui, Zhou Yusheng, Liu Shihan, et al. Fault location in DG-containing distribution network based on improved harmony algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):125-130,136.
- [2] 刘文杰,舒勤,韩晓言.基于广义S变换和TEO的配电网故障定位方法[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(1):12-18.  
Liu Wenjie, Shu Qin, Han Xiaoyan. Distribution network fault location method based on generalized S-transform and TEO[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2019, 31(1):12-18.

- [3] 陈奎,张云,王洪寅,等.基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J].电力系统保护与控制,2017,45(24):57-62.  
Chen Kui, Zhang Yun, Wang Hongyin, *et al.* Fault location of distribution network with distributed generation based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24):57-62.
- [4] 谢涛,蒯圣宇,朱晓虎,等.基于改进遗传算法的配电网故障定位方法[J].沈阳工业大学学报,2019,41(2):126-131.  
Xie Tao, Kuai Shengyu, Zhu Xiaohu, *et al.* Distribution network fault location method based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(2):126-131.
- [5] 倪良华,历馨,吕干云,等.基于虚拟阻抗的复杂配电网故障区段定位新方法[J].电网与清洁能源,2019,35(2):1-8,14.  
Ni Lianghua, Li Xin, Lü Ganyun, *et al.* A new method for locating fault sections in complex distribution network based on virtual impedance[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2):1-8,14.
- [6] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2180-2191,2397.  
Xie Liwei, Li Yong, Luo Longfu, *et al.* Distribution network fault location method based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2180-2191, 2397.
- [7] 张磐,张愉,丁一,等.基于微扰法的低压有源配电网故障定位方法[J].中国电力,2018,51(12):63-71.  
Zhang Pan, Zhang Yu, Ding Yi, *et al.* Low-voltage active distribution network fault location method based on perturbation method[J]. China Electric Power, 2018, 51(12):63-71.
- [8] 张科,朱永利,郑艳艳,等.基于冗余度参数估计的多分支混合线路故障定位方法[J].电网技术,2019,43(3):1034-1040.  
Zhang Ke, Zhu Yongli, Zheng Yanyan, *et al.* Multi-branch hybrid line fault location method based on redundancy parameter estimation[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1034-1040.
- [9] 王天生,樊艳芳,刘群杰,等.基于多区域相位突变量信息的主动配电网接地故障定位方案[J].安徽大学学报(自然科学版),2020,44(1):57-63.  
Wang Tiansheng, Fan Yanfang, Liu Qunjie, *et al.* Active distribution network grounding fault location scheme based on multi-regional phase mutation information[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2020, 44(1):57-63.
- [10] 王禄海,王飞,陈煌,等.基于Fibonacci搜索的含DG配电网故障定位最小故障电抗法[J].电测与仪表,2019,56(2):75-82.  
Wang Luhai, Wang Fei, Chen Huang, *et al.* The minimum fault reactance method for DG-containing distribution network fault location based on Fibonacci search[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2):75-82.
- [11] 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):140-147.  
Tong Ning, Zhang Xuesong, Zhao Bo, *et al.* Single-phase fault location in distribution network based on phase current effective energy tracking method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19):140-147.
- [12] 张波,唐亮,梁晓伟,等.基于遗传粒子群法的配电网故障定位研究[J].计算技术与自动化,2021,40(1):33-37.  
Zhang Bo, Tang Liang, Liang Xiaowei, *et al.* Research on fault location of distribution network based on genetic particle swarm optimization [J]. Computational Technology and Automation, 2021, 40(1):33-37.
- [13] 徐晓春,王栋,李佑伟,等.考虑配电网级联故障的分布式电源选址方法研究[J].电气传动,2021,51(8):65-70,76.  
Xu Xiaochun, Wang Dong, Li Youwei, *et al.* Study on location method of distributed generation considering cascade fault of distribution network [J]. Electrical Transmission, 2021, 51(8): 65-70, 76.
- [14] 李雨琪,杨明,柴娜,等.基于转速信号的电机轴承故障诊断方法[J].电气传动,2019,49(9):92-96.  
Li Yuqi, Yang Ming, Chai Na, *et al.* Fault diagnosis method of motor bearing based on speed signal[J]. Electrical Drive, 2019, 49(9):92-96.
- [15] 陆玉军,李澄,陈颖,等.一种配电网故障区段定位及隔离方法[J].计算技术与自动化,2020,39(4):7-12.  
Lu Yujun, Li Cheng, Chen Hao, *et al.* A method of fault location and isolation in distribution network[J]. Computational Technology and Automation, 2020, 39(4):7-12.

收稿日期:2021-04-14

修改稿日期:2021-07-07