

DOI: 10.7667/PSPC151361

基于线模行波突变的配电网全架空线路 单相接地的多端检测定位新方法

杨萃源, 舒勤

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对配电网单相接地故障, 提出了两种有效的故障定位方法。离线状态下, 先后在线路的首端和末端向三相注入相同的高压脉冲, 并分别在首末端采集线模电压信号的双端注入法。在线路首端向三相注入相同的高压脉冲, 并在首端、末端和必要的二级分支末端检测线模电压信号的单端注入多端检测法。两种方法都利用了线模电压首个非零突变点对应时刻与故障点到测量点之间距离的关系进行综合定位。通过理论推导, PSCAD 仿真和 Matlab 分析, 证明了单端注入法比双端注入法效率更高, 同时单端注入多端检测法能准确定位故障。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 双端注入法; 单端注入多端检测法

A new multiterminal detecting location method of single-phase grounding to the overhead-line for distribution network based on travelling-wave mutation of line-mode

YANG Luoyuan, SHU Qin

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: For the single-phase earth fault in the distribution network, this paper proposes two kinds of effective fault location methods. In the offline state, firstly the same high voltage pulse is injected to three-phase and the line-mode voltage signal is gathered at the head of the line; then, the same high voltage pulse is injected to three-phase and the line-mode voltage signal is adopted at the end of the line, which is called doubled-side injection method. And the same high voltage pulse is injected to three-phase and the line-mode voltage signal is gathered at the head, end and some necessary secondary branch ends of the line under the outline state, which is called the way of single-ended injection, multiterminal detection. Both methods use the relationship between the first nonzero mutation point moment of the line-mode voltage with fault distance. Through theoretical derivation, PSCAD simulation and Matlab analyzing, it proved that the single-ended injection method is more efficient than the double-side injection method, and the single-side injection can locate fault accurately.

Key words: distribution network; single-phase earth fault; doubled-side injection method; single-ended injection multiterminal detection

0 引言

单相接地故障是配电网中发生几率最高的一种故障。我国 6~35 kV 配电网线路一般采用小电流接地方式, 发生单相接地故障后可带故障继续运行一段时间, 但若不及时准确地排除故障点, 线路绝缘系统极易受到损伤, 导致事故扩大, 影响系统的安

全可靠运行^[1-6]。

然而, 配电网网络结构多为树枝状辐射型, 分支多, 线路长度相对较短, 故障的检测定位十分困难, 是属于一个世界性的难题, 也是目前研究的热点。传统的故障检测方式都是先实施逐线拉路的模式来筛选对应的线路, 之后再通过人工巡线来进行故障点的判断。这需要依靠巨大的物力、时间以及人力^[7-8]。现阶段国内外配电网全架空线故障定位的方法有阻抗法、行波法、对称分量法等。而行波法又分为 A 型行波法、B 型行波法、C 型行波法和 D

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2014GZ0010, 2014GZ0083)

型行波法, 其中 C 型行波法是一种单端注入行波的方法, 通过在线路始端注入检测信号, 并利用注入信号与故障点返回信号的时差来确定故障距离^[8-10]。

文献[7]提出了一种基于线模行波突变的注入行波的 C 型测距方法。依据电压行波在配电变压器的传变特性和单相接地故障点处的传播特点, 从线路首端三相同时注入相同的高压脉冲, 测得各相返回的行波数据, 用线模分量的首次出现的时间构造判据进行故障测距。文献[7]提出的方法虽可以进行故障测距, 但不能选出故障发生区段。

基于文献[7]提出的 C 型行波测距法, 本文提出了两种故障定位方法。第一种是先后在线路的首端和末端向三相注入相同的高压脉冲, 并分别在首末端采集线模电压信号, 利用线模电压首个非零突变点对应时刻与故障点到测量点之间距离的关系进行综合定位的双端注入法; 第二种方法是通过在线路首端向三相同时注入相同的高压脉冲, 在首端、主干线末端和必要的二级分支末端采集线模电压信号, 利用三端采集到的线模分量首次出现时刻进行综合定位的单端注入多端检测法。经过理论分析和仿真验证, 第二种方法比第一种方法效率更高。且单端注入多端检测法能准确选出故障发生区段。

1 注入法测距原理

对于一多分支的配电网线路, 在离线状态下, 从线路首端三相同时注入幅值为 U 的高压脉冲信号, 则根据凯伦鲍尔(Karrenbauer)变换矩阵^[11], 对首端测得的三相电压进行模量解耦, 有

$$\begin{cases} u_0 = \frac{1}{3}(u_A + u_B + u_C) \\ u_1 = \frac{1}{3}(u_A - u_B) \\ u_2 = \frac{1}{3}(u_A - u_C) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_A, u_B, u_C 分别为 A, B, C 三相电压; u_0, u_1, u_2 分别为零模电压, 1 模电压, 2 模电压。由式(1)可知, 当线路没有故障时, 由于三相注入电压相等, $u_A = u_B = u_C = U$, 所以在首端采集到的线模电压(1 模和 2 模电压)幅值为 0; 而当线路发生单相接地故障时(为了便于讨论后文所述故障均为单相接地故障), 在故障点处三相电压幅值不再相等, 线模电压非零。也就是说, 在首端测量到的线模信号一定来自故障点, 因此可以根据首端采集到的线模分量的第一个非零突变点对应时刻进行测距^[12-15]。

测距公式如下, 当线路发生故障后, 从线路首端三相同时注入相同的脉冲电压, 记录采集到的线

模行波第一个非零突变点对应时刻为 T , 则故障点距测量点的位置为

$$l = \frac{1}{2}v \cdot T \quad (2)$$

式中, v 为行波线模波速度, 取 $v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ^[15]。

2 基于线模行波突变测距原理的故障定位

2.1 定位原理

为了分析故障分支的判定, 首先来定义配电网线路拓扑结构图的分支级数, 如图 1 所示。 ak 为配电网的主干线, 其中包括了 ab, bf, fh 和 hk 这 4 个线段, 和主干线直接相连的线路定义为一级分支, 如图中的 bc, fg 和 hi 这 3 个线段, 而与一级分支相连的线路则定义为二级分支, 如图中的 cd 和 ce 这 2 个线段。从实际情况以及方便考虑, 不失一般性, 这里只分析最大分支级数为二级的配电网, 更多分支级数的情况可用类似方法分析。

2.1.1 双端注入定位法

当如图 1 所示的配电网线路在距离首端为 x 的 M 点发生单相接地故障时, 同时距离首端 a 为 x 的点还有 fh 段的点 H_1 , cd 段的点 H_2 , ce 段的点 H_3 。首先在离线状态下向线路首端 a 三相注入脉冲电压, 采集线模电压回波。设各段线路长度如图 1 所示, 设在首端测得的线模首个非零突变点对应时刻为 t_1 , 则有

$$x = \frac{1}{2}v \cdot t_1 = \begin{cases} L_{ab} + L_{bf} + L_{fM} \\ L_{ab} + L_{bf} + L_{fH_1} \\ L_{ab} + L_{bc} + L_{cH_2} \\ L_{ab} + L_{bc} + L_{cH_3} \end{cases} \quad (3)$$

即根据 t_1 时刻算出的故障距离可推出的故障点可能是 M 点、 H_1 点、 H_2 点、 H_3 点。后文分析同理。

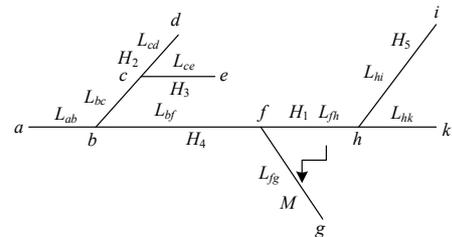


图 1 配电网线路图

Fig. 1 Circuitry of distribution network

设 M 点距离末端 k 的位置为 Y , 同时距离末端 k 为 Y 的点还有 bf 段的点 H_4 和 hi 段的点 H_5 。则向线路末端 k 三相注入脉冲电压, 采集线模电压信号, 设在末端 k 测得的线模首个非零突变点对应时刻为

t_2 , 则有

$$Y = \frac{1}{2}v \cdot t_2 = \begin{cases} L_{kh} + L_{bf} + L_{fM} \\ L_{kh} + L_{bf} + L_{fH_4} \\ L_{kh} + L_{hH_5} \end{cases} \quad (4)$$

综合式(3)和式(4), 最后判断故障点只能位于 fg 段距离 a 端为 x 的点 M 处, 实现了故障定位。

2.1.2 单端注入多端检测法定位原理

如图 2 所示, 在首端 a 向三相线路注入相同的电压脉冲, 由式(1)和第一节分析知, 只有当线路故障后才存在线模波形, 也就是在任一端检测到的线模波形一定来自故障点。对于配电网中的任一节点, 若故障点在其与首端的最短路径上, 如故障点 o_2 在节点 g 与首端 a 的最短路径主支路 ag 上, 不在节点 k 与首端 a 的最短路径 ak 上, 则在节点 g 检测到的首个线模行波波头到达时刻与线模波速的乘积等于节点 g 到首端 a 的最短路径 ag 距离; 而若故障点不在其与首端的最短路径上, 如当 o_2 点发生故障时, 在节点 k 检测到的第一个线模行波波头到达时刻与波速的乘积等于节点 k 到首端 a 的最短路径距离 ak 与故障点 o_2 到分支点 f 距离的 2 倍之和。以下分情况详细讨论。

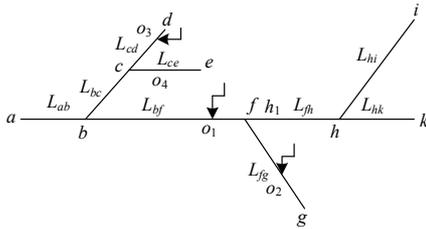


图 2 配电网线路图

Fig. 2 Circuitry of distribution network

1) 故障发生在主干线上

如图 2 所示, 当主干线的 o_1 点发生单相接地故障时, 设 o_1 点与 a 端的距离为 x_1 , 同时距离 a 端 x_1 的点还有 cd 段的 o_3 点和 ce 段的 o_4 点。在 a 端三相同步注入高压脉冲, 并在 a 端和 k 端均检测三相电压行波。在 a 端检测到的线模波形第一个非零突变点时刻为 t_1^a , 根据式(1)有

$$x_1 = \frac{1}{2}v \cdot t_1^a = \begin{cases} L_{ab} + L_{bo_1} \\ L_{ab} + L_{bc} + L_{co_3} \\ L_{ab} + L_{bc} + L_{co_4} \end{cases} \quad (5)$$

k 端检测到的线模波形第一个非零突变点时刻为 t_1^k , 则有

$$v \cdot t_1^k = L_{ab} + L_{bo_1} + L_{o_1f} + L_{fh} + L_{hk} = L_{ak} \quad (6)$$

即当末端 k 检测到的线模波形第一个非零突变点时刻 t_1^k 与线模波速 v 的乘积为主干线 ak 的长度, 故障一定发生在主干线 ak 上。结合式(5)和式(6)可唯一确定故障位于主干线 ak 距离 a 端为 x_1 处。

2) 故障发生在一级分支

当一级分支 fg 上的 o_2 点发生故障时, 设 o_2 点与 a 端的距离为 x_2 , 同时距离 a 端为 x_2 的点还有 fh 上的 h_1 点。在 a 端注入脉冲后, 设首端 a 检测到的线模波形的第一个非零突变点对应时刻为 t_2^a , 则有

$$x_2 = \frac{1}{2}v \cdot t_2^a = \begin{cases} L_{ab} + L_{bf} + L_{fo_2} \\ L_{ab} + L_{bf} + L_{fh_1} \end{cases} \quad (7)$$

设此时末端 k 检测到的线模波形第一个非零突变点时刻为 t_2^k , 则有

$$v \cdot t_2^k = L_{ab} + L_{bf} + 2L_{fo_2} + L_{fh} + L_{hk} = L_{ak} + 2L_{fo_2} \quad (8)$$

$$v \cdot t_2^k - L_{ak} = 2L_{fo_2} \quad (9)$$

即当故障发生在一级分支上时, 末端 k 检测到的线模波形第一个非零突变点时刻 t_2^k 与线模波速 v 的乘积为主干线 ak 的长度与分支点 f 到故障点距离的 2 倍之和。可以由式(9)求得分支点 f 与首端 a 的距离, 进而找到 f 的位置, 结合式(7)、式(8)和式(9), 可以得出故障发生在 fg 段。

3) 故障发生在二级分支

同理, 当二级分支的 o_3 点发生故障时利用之前所述可以推出, 故障可能在 cd 段或 ce 段, 此时只需要在 cd 段或 ce 段的末端检测线模行波信号, 设在 ce 段末端测得的线模波形的第一个非零突变点时刻为 t_3^e , 则有

$$v \cdot t_3^e = L_{ab} + L_{bc} + 2L_{co_3} + L_{ce} = L_{ae} + 2L_{co_3} \quad (10)$$

此时就可以确定故障发生在 cd 段。

综上所述, 采用单端注入多端检测方法的定位流程如图 3 所示。

2.2 仿真分析

在 PSCAD 中搭建如图 4 所示的全架空线路, 各分支长度如图所示, 在首端 a 和末端 y 分别注入 10 kV, 持续时间为 4 μ s 的电压脉冲, 并分别在首端 a 和末端 y 采集线模电压信号, 采样频率为 10 MHz, 线模波速度 v 取 3×10^8 m/s^[15], 即采样步长为 30 m。分别选取 5 个故障点进行双端测量, A 相接地电阻设为 500 Ω , 当线模行波绝对值大于 10^{-4} 时, 即可认为线模行波信号出现。具体定位情况如表 1 所示。

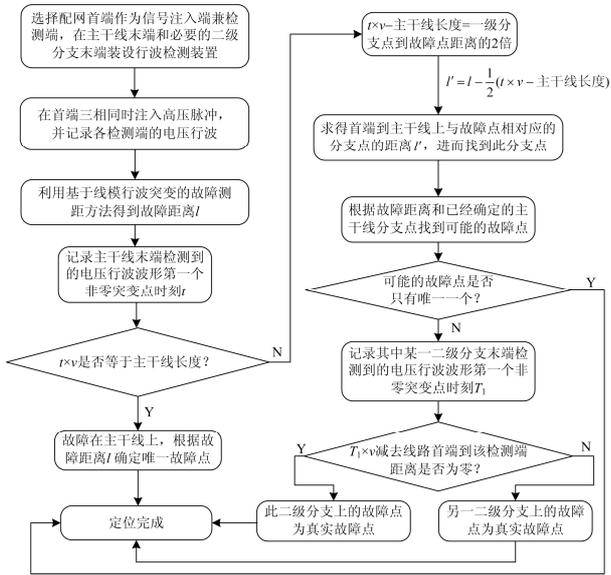


图3 单端注入多端检测定位流程图

Fig. 3 Flow chart of distribution network branch fault location

由表 1 可以看出, 采用两端注入, 当线路有二级分支或一个节点有两个及以上分支时, 只能大致选出故障可能在的几个位置(如 *ef* 段和 *oq* 段的故障), 再现场逐一排查, 此时该算法效率降低。

由表 1 知双端注入法只能针对故障在主支路和一级分支时有效, 在二级分支或一个节点有两个及以上分支处故障时就不能确定故障区段了。并且由于要在首末端分别注入脉冲, 实施起来较为麻烦, 且并不经济。

在 PSCAD 中搭建如图 4 所示的架空线路, 各分支长度如图 4 所示, 在首端 *a* 注入 10 kV、持续时间为 4 μs 的电压脉冲, 先在 *a* 点和 *y* 点设置行波采集装置, 同时在波形采集端分别加一滤除杂波装置, 采样频率为 10 MHz。在 *hl* 段距离 *h* 点为 0.2 km(据 *a* 端 2.2 km)处设置接地电阻为 500 Ω 的 A 相接地故障, 在 *a* 端和 *y* 端采集到的线模电压波形如图 5 所示。

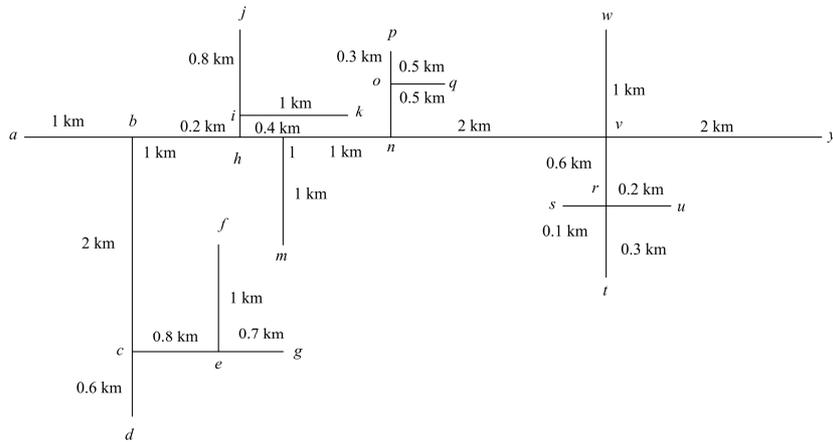


图4 仿真线路

Fig. 4 Simulated lines

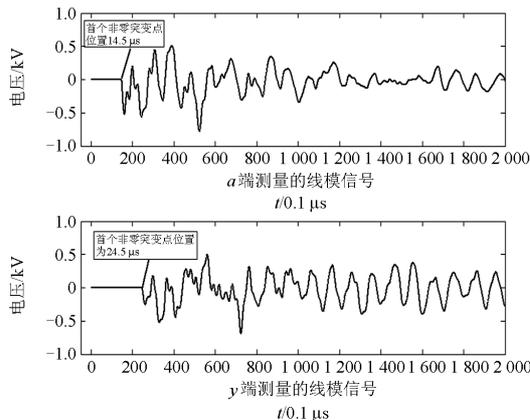


图5 首末端测量的线模电压信号

Fig. 5 Line mode of voltage measured at the first and end overhead-line

由图 5 可知, 在 *a* 端测得的线模电压首个非零突变时刻为 14.5 μs, 则故障点距离 *a* 端为 $14.5 \times 300 \times \frac{1}{2} = 2175 \text{ m}$, 与实际距离 2.2 km 基本符合; 在 *y* 端测得的线模电压首个非零突变时刻为 24.5 μs, 则 $24.5 \times 300 = 7350 \text{ m}$, 因为故障点在 *hl* 上, 而 *hl* 刚好在主支路 *ab* 上, $L_{ay} = 7.4 \text{ km}$, 与 L_{ay} 长度基本符合。

分别选取同表 1 所示的相同的 5 个故障点进行多端测量, *a* 相接地电阻设为 500 Ω, 当线模行波值大于 10^{-4} 时, 即可认为线模行波信号出现。根据图 3 进行定位分析, 具体定位情况如表 2 所示。 $L_{ay} = 7.4 \text{ km}$ 。

表 1 双端注入定位情况

Table 1 Locating situation of double injecting

故障位置	测量点 <i>a</i> 检测的线模 第一个非零突变点对 应时刻/ μs	距 <i>a</i> 点测距 长度/ km	距 <i>a</i> 点实际 距离/ km	测量点 <i>y</i> 检测的线模 第一个非零突变点 对应时刻/ μs	据 <i>y</i> 点测距 长度/ km	据 <i>y</i> 点实际距 离/ km	定位 区段
<i>hl</i> 段距离 <i>h</i> 点 0.2 km	14.5	2.175	2.2	34.8	5.22	5.2	<i>hl</i> 段
<i>hi</i> 段距离 <i>h</i> 点 0.1 km	13.8	2.07	2.1	36.9	5.535	5.5	<i>hi</i> 段
<i>ef</i> 段距离 <i>e</i> 点 0.45 km	28.3	4.245	4.25	64.8	9.72	9.65	<i>ef</i> 段 <i>eg</i> 段
<i>lm</i> 段距离 <i>l</i> 点 0.5 km	19.2	2.88	2.9	36.9	5.535	5.5	<i>lm</i> 段
<i>oq</i> 段距离 <i>n</i> 点 0.7 km	26.7	4.005	4.1	31.2	4.68	4.7	<i>op</i> 段 <i>oq</i> 段

当故障点在二级分支或一个节点有两个及以上分支时,如故障点在 *oq* 段时,再在 *q* 点测量线模信号;当故障点在 *ef* 段时,在 *g* 点测量线模信号,测量结果如表 3 所示。 $L_{ag}=4.5\text{ km}$, $L_{aq}=4.3\text{ km}$ 。

表 2 中,当故障点在 *hl* 段时,在末端 *y* 测量到

的线模第一个非零突变点时刻与波速度 v 的乘积与实际 L_{ay} 的取值有 50 m 的误差;表 3 中当故障在 *oq* 段时,在 *q* 端测量到的线模第一个非零突变点时刻与波速度 v 的乘积与实际 L_{aq} 的取值也有 50 m 的误差,这是由于波速度的选取造成的。

表 2 双端检测定位情况

Table 2 Locating situation of double detection

故障位置	测量点 <i>a</i> 检测的线模 第一个非零突变点对 应时刻 $t/\mu\text{s}$	距 <i>a</i> 点测 距长度/ km	距 <i>a</i> 点实 际距离/ km	绝对误差 / m	测量点 <i>y</i> 检测的线 模第一个非零突变 点对应时刻 $t_0/\mu\text{s}$	$v \times t / \text{km}$	$(1/2)(v \times t_0 - L_{ay}) / \text{km}$	定位 区段
<i>hl</i> 段距 <i>h</i> 点 0.2 km	14.5	2.175	2.2	25	24.5	7.35	-0.025	<i>hl</i> 段
<i>hi</i> 段距 <i>h</i> 点 0.1 km	13.8	2.07	2.1	30	25.1	7.53	0.065	<i>hi</i> 段
<i>ef</i> 段距 <i>e</i> 点 0.45 km	28.3	4.245	4.25	5	46.4	13.92	3.26	<i>ef</i> 段 <i>eg</i> 段
<i>lm</i> 段距 <i>l</i> 点 0.5 km	19.2	2.88	2.9	20	27.9	8.37	0.485	<i>lm</i> 段
<i>oq</i> 段距 <i>n</i> 点 0.7 km	26.7	4.005	4.1	5	29.3	8.78	0.695	<i>op</i> 段 <i>oq</i> 段

表 3 三端检测定位情况

Table 3 Locating situation of the third detection

故障位置	测量点 <i>a</i> 检测的线模 第一个非零突变点 时刻/ μs	距 <i>a</i> 点测 距长度/ km	距 <i>a</i> 点实 际距离/ km	绝对 误差/ m	测量点 <i>g</i> 检测的线 模第一个非零突变 点对应时刻 $t/\mu\text{s}$	$v \times t / \text{km}$	$(1/2)(v \times t - L_{ag}) / \text{km}$	定位 区段
<i>ef</i> 段距 <i>e</i> 点 0.45 km	28.3	4.245	4.25	5	17.9	5.37	0.435	<i>ef</i> 段
故障位置	测量点 <i>a</i> 检测的线模 第一个 非零突变点时刻/ μs	距 <i>a</i> 点测 距长度/ km	距 <i>a</i> 点实 际距离/ km	绝对 误差/ m	测量点 <i>q</i> 检测的线 模第一个非零突变 点对应时刻 $t/\mu\text{s}$	$v \times t / \text{km}$	$(1/2)(v \times t - L_{aq}) / \text{km}$	定位 区段
<i>oq</i> 段距 <i>n</i> 点 0.7 km	24.6	3.69	3.7	10	14.4	4.32	-0.01	<i>oq</i> 段

表 2 和表 3 只考虑了相同接地电阻不同故障位置的定位情况,下面考虑不同接地电阻相同故障位置的定位情况。在 *lm* 段距离 *l* 点为 500 m 处(据 *a*

点 2.9 km)分别设置 A 相接地电阻为 50 Ω , 500 Ω , 1 000 Ω , 5 000 Ω 的单相接地故障,故障定位情况如表 4 所示。

由表 4 可知, 测距的误差随接地电阻的增加而略有增大, 这是因为故障点处反射的线模电压行波随接地电阻增加而减小, 高频分量在线路中更容易被衰减到零^[16-17]。但不同接地电阻对故障定位结果

并无影响。

除表 2、表 3 和表 4 所列情况外, 还做了大量的仿真, 结果表明采用单端注入、多端测量可以准确找到故障点位置, 定位误差不超过 50 m。

表 4 不同接地电阻定位情况

Table 4 Locating situation of different ground resistance

接地电阻/ Ω	a 端测量点第一个线模非零转折点对应时刻/ μs	据 a 点测距长度/km	绝对误差/m	y 端测量点线模第一个非零转折点对应时刻 $t/\mu\text{s}$	$v \times t / \text{km}$	$(1/2)(v \times t - L_{ay}) / \text{km}$	定位区段
50	19.2	2.88	20	27.8	8.34	0.47	lm
500	19.2	2.88	20	27.9	8.37	0.485	lm
1 000	19.2	2.88	20	27.9	8.37	0.485	lm
5 000	19.1	2.865	35	28	8.4	0.5	lm

3 结语

1) 基于线模行波突变的注入行波测距方法可以消除配电网不平衡负载的影响^[18-19], 本文首先提出了一种双端先后注入分别测量首末端线模行波突变点的定位方法, 经过理论推导和 PSCAD 中实验仿真证明该方法只对故障发生在线路主分支和一级分支有效, 对存在二级分支和一个节点连有两个及以上分支的线路该方法效率不高。

2) 然后基于双端注入法的不足之处, 提出了一种更为经济的方法, 即单端注入多端检测线模行波的第一个非零突变点的定位方法, 经过理论推导和 PSCAD 中实验仿真证明了该方法的有效性和可靠性。

在实际工程应用中, 采用一端注入多端检测的方法, 需要基于标准时钟信号的同步测量, 但目前国内外基于时钟信号的同步测量装置发展已比较成熟, 价格也相对低廉, 所以在工程上是可行的^[20-21]。同时如何选取主干线, 使得其所连的一级分支数最多的问题上还有待进行深入的探讨和研究。

参考文献

- [1] 齐郑, 乔丰, 黄哲洙, 等. 基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 34-39.
 QI Zheng, QIAO Feng, HUANG Zhezhu, et al. Genetic algorithm fault location based on transient component for neutral point non-effective grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 34-39.
- [2] 郭林勇, 何正友, 钱清泉. 单端行波故障测距的频域方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 99-104.
 WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A frequency

- domain approach to single-ended traveling wave fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 99-104.
- [3] 杜林, 陈宏业, 陈伟根, 等. 采用双端电压行波法的输电线路故障定位系统设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 304-307.
 DU Lin, CHEN Hongye, CHEN Weigen, et al. Transmission line fault location system using two-terminal voltage traveling wave[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 304-307.
- [4] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 64-68.
 LUO Mei, YANG Honggeng. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 64-68.
- [5] 刘朕志, 舒勤, 韩晓言, 等. 基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 40(8): 88-94.
 LIU Zhenzhi, SHU Qin, HAN Xiaoyan, et al. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 40(8): 88-94.
- [6] 彭向阳, 毛先胤, 李鑫, 等. 架空输电线路故障分布式行波定位误差分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2706-2713.
 PENG Xiangyang, MAO Xianyin, LI Xin, et al. Errors analysis of overhead transmission line fault location based on distributed travelling-wave[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2706-2713.
- [7] 周聪聪, 舒勤, 韩晓言. 基于线模行波突变的配电网单相接地故障测距方法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 462-467.

- ZHOU Congcong, SHU Qin, HAN Xiaoyan. A single-phase earth fault location scheme for distribution network based on mutation of line mode traveling wave[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 462-467.
- [8] 季涛, 孙同景, 薛永端, 等. 配电网故障定位技术现状与展望[J]. 继电器, 2005, 33(24): 32-37.
- JI Tao, SUN Tongjing, XUE Yongduan, et al. Current status and development of fault location technique for distribution network[J]. Relay, 2005, 33(24): 32-37.
- [9] 梁睿, 孙式想. 单双端行波特征综合考虑的辐射状电网组合测距技术[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1462-1467.
- LIANG Rui, SUN Shixiang. Fault location in radial power grid after analyzing characteristics of both single-terminal and double-terminal traveling waves[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1462-1467.
- [10] 林圣, 何正友, 陈鉴, 等. 基于行波时频特征的单端故障测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 258-264.
- LIN Sheng, HE Zhengyou, CHEN Jian, et al. A single terminal fault location method based on time-frequency characteristic of traveling wave[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 258-264.
- [11] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测距研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [12] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 130-136.
- LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136.
- [13] 李友军, 徐丽娜. 电力系统接地短路故障中零模分量的依频关系分析[J]. 继电器, 2007, 35(15): 4-8.
- LI Youjun, XU Lina. Relationship between earth mode surge and frequency on power system earth fault[J]. Relay, 2007, 35(15): 4-8.
- [14] 梁睿, 孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 700-706.
- LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method of single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 700-706.
- [15] 杜林, 陈宏业, 陈伟根, 等. 采用双端电压行波法的输电线路故障定位系统设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 304-307.
- DU Lin, CHEN Hongye, CHEN Weigen, et al. Transmission line fault location system using two-terminal voltage traveling wave[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 304-307.
- [16] 林圣, 何正友, 李小鹏, 等. 一种考虑时域特征的单端行波固有频率测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 243-248.
- LIN Sheng, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Single terminal fault location by natural frequencies of travelling wave considering its time-domain characteristics[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 243-248.
- [17] 李学生, 盛洪江. 基于波速影响的零模行波研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 93-97.
- LI Xuesheng, SHENG Hongjiang. Study of zero-mode traveling wave based on influence of wave velocity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 93-97.
- [18] 齐郑. 小电流接地系统单相接地故障选线及定位技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [19] 董新, 张波, 潘志远. 改进状态抽样法及其在含微网配电网风险评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 39-45.
- DONG Xin, ZHANG Bo, PAN Zhiyuan. Improved state sampling method applied in the risk assessment of distribution network with configuration of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 39-45.
- [20] MIRZAEI M, KADIR M Z A A, MOAZAMI E, et al. Review of fault location methods for distribution power system[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2009, 3(3): 2670-2676.
- [21] ALBERTO B, MANRO B, MAURO D S, et al. Assessment of fault location in power distribution networks[J]. Electrical Power Quality and Utilization, 2007, 8(1): 33-40.

收稿日期: 2015-08-05; 修回日期: 2016-02-18

作者简介:

舒勤(1958-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统故障检测、现代信号处理、智能电网; E-mail: shuchin@163.com

杨莹源(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位和现代信号处理。E-mail: yangluoyuan1212@163.com

(编辑 周金梅)