

基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究

王 博¹, 谷昌瑞¹, 吉晓筱², 王 俊²

(1. 扬州科宇电力有限公司, 江苏 扬州 225000; 2. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要:在对高压输电线路进行故障定位的方法中,行波法因其具有较好的抗干扰性和较高的测距精度而受到国内外关注。传统的行波测距法在输电线路发生多点故障时行波混叠可能引起测距误差增大,难以实现准确定位。针对上述问题,文中通过分析输电线路行波的波动过程及其传输特性,给出了常规行波测距算法的适用范围,在此基础上,提出了改进的分布式行波测距方法。该方法通过获取故障后多个测量点的行波到达时刻,拟合出行波波头传输特性曲线,然后利用该曲线去求解故障点的具体位置。最后运用 PSCAD 构建 500 kV 输电线路仿真模型对文中的方法进行仿真,验证了其有效性。

关键词:高压输电线路; 故障测距; 分布式行波测距; 多点故障; PSCAD

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)05-0120-08

1 引言

阻抗法和行波法是用于测距的两类方法。其中行波法依据输电线路故障时产生的行波传播特征(传播速度、路径、时间等)来进行测距^[1]。目前,行波测距法主要包括 A-F 这 6 类^[2],其中 A, C, E 和 F 型利用的是行波到达同一个检测点的时间差,属于单端测量方法, B 和 D 型则是利用故障行波到达不同检测点所用时间的不同来检测,属于双端测量方法^[3]。

行波测距的准确性依赖于突变信号检测算法来标定行波波头的到达时刻,常见的波头检测方法有小波变换^[4]、希尔伯特-黄变换^[5]和数学形态学^[6]等方法。其中,小波变换因其多分辨率、且在时、频域都具有表征信号局部特征的能力等优点得到了广泛采用。在行波测距中,通常使用小波变换模极大值与信号突变点相对应的方法来检测波头^[7]。

传统的行波测距法在线路单点故障时具有较好的准确性,但是当发生多点故障时,由于行波混叠可能引起传统的行波测距法测距误差增大,难以实现准确定位^[8]。

针对上述问题,文中通过分析输电线路行波的波动过程及其传输特性,给出了常规行波测距算法的适用范围,在此基础上,针对传统行波测距法的局限性,提出改进的分布式行波测距方法。该方法通过获取故障后多个测量点的行波到达时刻,拟合出行波波头传输特性曲线,然后利用该曲线去求解故障点的具体位置。最后,运用 PSCAD 构建 500

kV 输电线路仿真模型对文中的方法进行仿真,验证了其有效性。

2 行波测距法的适应性分析

2.1 单端行波测距原理分析

利用单端行波检测的测距方法中,根据故障测距时选用的反射波的不同,可将单端行波测距分为基于故障点反射波的单端行波法和基于对端母线反射波的单端行波^[9]。其主要原理都是利用行波第一次到达测量端与其从故障点反射回的时间差进行故障距离的计算。

基于故障点反射波的单端行波法是通过检测初始行波与该行波经故障点反射后到达母线端的时间差,来实现测距,运用该方法进行测距的原理示意图如图 1 所示。该方法适用于故障点处反射系数较大(即故障电阻较小)的情况^[10]。

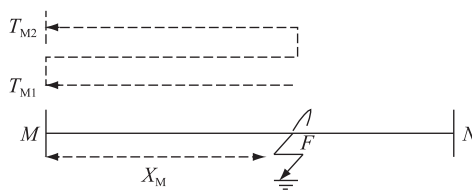


图 1 利用故障点反射波的单端行波测距原理示意图

Fig.1 Single-ended traveling wave fault location using its reflected waves

设行波传播的正方向为由母线到故障点,则故障初始行波波头到达测量端时的时刻为 T_{M1} , 其为反向行波,该行波经母线反射后,传播到故障点经再次反射传播回母线,设再次到达母线的时间为 T_{M2} 。则故障距离为:

$$X_M = \frac{1}{2}(T_{M2} - T_{M1})v \quad (1)$$

式(1)中: X_M 为故障点与 M 端母线的距离; v 为行波传播的速度。

2.2 双端行波测距原理分析

双端行波测距方法的原理:输电线路故障时发出的行波信号,由于距两端距离的不同,从而使得到达线路两端的时间也不一样。双端行波测距就是利用这个时间的差值来计算出故障点位置的^[11]。其测距原理示意图如图 2 所示。

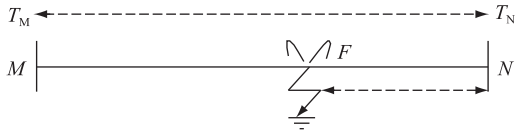


图 2 双端行波测距原理示意图

Fig.2 Double-ended traveling wave fault location

图 2 中,在高压输电线路的两端即 M, N 端均装设行波测量装置,故障发生在 F 点处,设 L 为线路的全长, T_M 与 T_N 分别为故障产生的行波波头到达 M, N 端的时间,则根据图示可得:

$$\begin{cases} X_M = vT_M \\ X_N = vT_N \\ L = X_M + X_N \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: X_M 为故障点距离 M 端母线的距离; X_N 为故障点距离 N 端母线的距离; v 为行波波速。

则可以得到:

$$\begin{cases} X_M = \frac{1}{2}[v(T_M - T_N) + L] \\ X_N = \frac{1}{2}[v(T_N - T_M) + L] \end{cases} \quad (3)$$

双端行波测距原理简单,且由于其仅需识别两端检测到的第一个波头到达时刻,无需对行波的折反射信号进行识别,而具有较高的可靠性。

2.3 传统行波测距方法的适应性

传统行波测距法的研究主要从波速、信号分析、奇异点时刻获取以及对有分支线路、光纤电缆混合线路的测距方法等方面^[12,13]进行了深入的研究,但大都针对发生单处故障进行研究。高压长距离输电线路由于途径的很多气候环境比较恶劣的地区,故障类型相对也较为复杂,一条输电线路很可能发生不止一处故障^[14],当输电线路发生多重故障时,将会产生复杂的行波过程,且以 2 处故障为例,对传统行波测距法的适应性进行分析。输电线路发生 2 处故障的示意图如图 3 所示。

设在 t_0 时刻,输电线路在 $F1$ 和 $F2$ 处发生了故障,输电线路两端分别记为 M 端和 N 端, L 为输电线路的全长, L_{x1} 为故障点 $F1$ 到 M 端的距离, L_{x2} 为

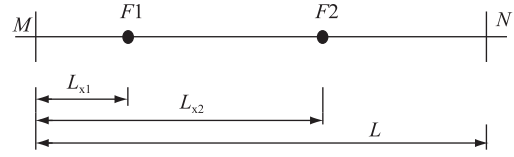


图 3 输电线路两处故障示意图

Fig.3 Two faulty transmission lines

故障点 $F2$ 到 M 端的距离,且 $L_{x1} < L_{x2}$ 。记故障点 $F1$ 处发出的正向行波及其经折反射后到达 M 端的时间与 t_0 的时间差为分别为 $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}$,反向行波经折反射后到达 M 端的时间与 t_0 的时间差分别为 $t'_{11}, t'_{12}, \dots, t'_{1n}$;故障点 $F2$ 处发出的正向行波经折反射后到达检测点的时间与 t_0 的时间差分别为 $t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2n}$,反向行波经折反射后到达检测点的时间与 t_0 的时间差分别为 $t'_{21}, t'_{22}, \dots, t'_{2n}$ 。则可以得到各个检测点检测到的时间,即:

$$\begin{cases} t_{11} = L_{x1}/v \\ t_{12} = 3L_{x1}/v \\ t_{13} = (2L_{x2} + L_{x1})/v \\ t'_{11} = (2L_{x2} - L_{x1})/v \\ t'_{12} = (2L_{x2} + L_{x1})/v \\ t'_{13} = (2L - L_{x1})/v \\ \dots \\ t_{21} = L_{x2}/v \\ t_{22} = (L_{x2} + L_{x1})/v \\ t_{23} = (3L_{x2} - 2L_{x1})/v \\ t'_{21} = (2L - L_{x2})/v \\ t'_{22} = (2L - L_{x2} + 2L_{x1})/v \\ t'_{23} = (2L + L_{x2} - 2L_{x1})/v \\ \dots \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可以得到 M 端测量点行波通过折反射到达的时间与波头首次到达的时间差,各时间差为:

$$\begin{cases} \Delta t_{11} = 0 \\ \Delta t_{12} = 2L_{x1}/v \\ \Delta t_{13} = 2L_{x2}/v \\ \Delta t'_{11} = (2L_{x2} - L_{x1})/v \\ \Delta t'_{12} = 2L_{x2}/v \\ \Delta t'_{13} = 2L - 2L_{x1}/v \\ \dots \\ \Delta t_{21} = L_{x2} - L_{x1}/v \\ \Delta t_{22} = L_{x2}/v \\ \Delta t_{23} = (3L_{x2} - 3L_{x1})/v \\ \Delta t'_{21} = (2L - L_{x2} - L_{x1})/v \\ \Delta t'_{22} = (2L - L_{x2} + L_{x1})/v \\ \Delta t'_{23} = (2L + L_{x2} - 3L_{x1})/v \\ \dots \end{cases} \quad (6)$$

运用单端行波测距法时,需要检测初始行波浪涌到达母线端时刻与故障点反射波(或对端母线反射波)到达时刻的时间差来实现测距。因此使用单端行波测距就必须准确获取待测距故障点的初始行波和反射行波到达测量端的时间^[15]。初始行波浪涌到达时刻为故障点 $F1$ 正向行波首次到达时间,故障点 $F1$ 的位置 L_{x1} 的准确测量依赖于母线反射波到达时刻的测量,因此只有当不等式条件(7)成立时,单端行波测距才能测量出故障点 $F1$ 的位置。

$$\begin{cases} \Delta t_{12} \leq \Delta t'_{12} \\ \Delta t_{12} \leq \Delta t_{21} \\ \Delta t_{12} \leq \Delta t'_{21} \end{cases} \quad (7)$$

由上可以看出,当故障点距离 L_{x1}, L_{x2} 满足 $L_{x1} \leq L_{x2}$, 且 $L_{x1} \leq (2/3)L - (1/3)L_{x2}$ 时运用单端行波测距可以准确地测得故障点 $F1$ 的故障距离。

对于双端行波测距,其测量的是线路两端 M, N 端的信号突变量即行波到达时刻,设故障发生在 t_0 时刻,则故障行波传输到输电线路 M 端的时间为 t_1 ,传输到 N 端的时间为 t_2 ,该传输时间满足的关系为:

$$\begin{cases} t_1 = L_{x1}/v \\ t_2 = (L - L_{x2})/v \end{cases} \quad (8)$$

由方程组只能求得 $L_{x1} + L_{x2}$ 的距离,对于线路发生两处故障的情况下,双端行波测距必须在单端行波测距测得其中一个故障后,再测出另一个故障距离。

综上所述,当线路发生 2 处故障时,由于线路上叠加了 2 个行波波头从线路不同地点朝两端传输,同时在 2 个故障点都将发生行波的折反射,传统行波测距方法将面临一定的局限性。

3 基于分布式行波检测的改进故障测距方法

3.1 改进方法原理

故障时产生的行波波头向两端传播,在时刻 t_1 , 两端波头达到的位置距离 M 端的距离为 $X_{M(t1)}$ 、距离 N 端的距离为 $X_{N(t1)}$,同理 t_2 时刻,故障行波波头分别到达 $X_{M(t2)}, X_{M(t2)}$ 。以此类推可以得到以时间为横坐标的曲线 $X_M = m(t)$ 和 $X_N = n(t)$ 。2 条曲线分别描述了各时刻故障行波波头到达的位置,其描述了行波波头在线路上的传播特性,称为行波波头传播特性曲线^[16]。如图 4 所示。

根据故障点两端行波波头的传播特性曲线可以确定故障点的具体位置,具体流程图如图 5 所示。

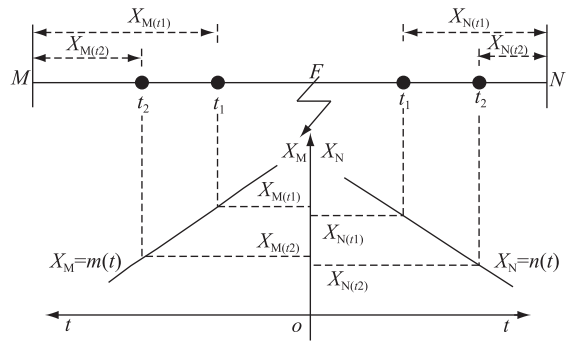


图 4 行波波头传播特性曲线原理图
Fig.4 Propagation characteristics of traveling wave head

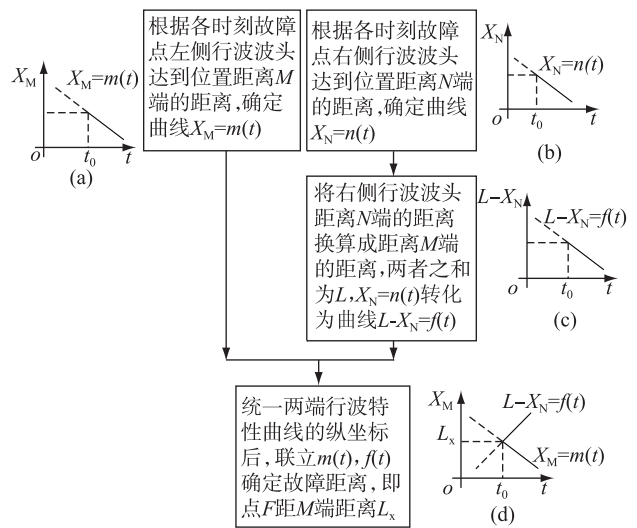


图 5 行波波头传播特性曲线和故障位置求解示意图
Fig.5 Propagation characteristics of traveling wave head and fault location solution

图 5 中 t_0 时刻为故障时刻。由于 t_0 时刻前的传播特性曲线实际并不存在,故用虚线表示。图 5 中的(a)图纵坐标 X_M 是故障点左侧行波波头距离 M 端的距离;图 5 中(b)图的纵坐标 X_N 则是故障点右侧行波波头距离 N 端的距离。要统一两曲线的纵坐标,即都以行波波头距 M 端的距离为纵坐标,需要对图 5 中(b)图的纵坐标进行转换,见图 5 中(c)图。则 $X_M = m(t)$ 与曲线 $X_N = n(t)$ 的交点就表示故障发生的时刻和位置,见图 5 中(d)图。

由图 5 中(d)图可知, $X_M = m(t)$ 和 $L - X_N = f(t)$ 两曲线交点所在位置的纵坐标就是故障点距输电线路 M 端的距离,其横坐标是故障时刻 t_0 。

利用行波波头传播特性曲线求解故障位置消除了波速因素对传统测距方法的精度造成的影响,同时针对多点故障的情况,可以通过分别构建不同故障点的行波波头传播特性曲线来求解各自的位置,从而解决了传统测距方法在多处故障时不适用

的问题。但是如何获取行波波头传播特性曲线是需要重点解决的问题。对此,文中提出了基于分布式行波检测的改进故障测距方法。该方法通过在输电线路沿线的不同位置安装多组故障信号检测装置,利用各装置获取检测点处行波波头到达的时刻,然后通过拟合的方法来构建行波波头在该输电线路上的传播特性曲线,从而定位故障发生的位置。

3.2 改进方法在 2 处故障时的具体应用

设线路 MN 中设有 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 个测量点,当线路发生 2 处故障时,故障点分别为 $F1$ 和 $F2$,假设 $F1$ 位于测量点 A_i 和 A_{i+1} 间, $F2$ 位于测量点 A_j 和 A_{j+1} 间,且 $i < j$,则分布式故障测距系统示意图如图 6 所示。

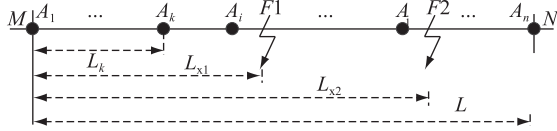


图 6 分布式故障测距检测系统示意图

Fig.6 Distributed traveling wave fault location system

分布式改进行波测距方法中,在输电线路沿线的不同位置安装了多组故障信号检测装置,当输电线路发生故障时,故障点 $F1$ 和 $F2$ 产生的故障行波将依次经过故障检测装置所在的位置。定义 t_{zk}, t_{fk} 分别表示从 $F1$ 发出的正向和反向行波经折反射后依次到达检测点的时间, t'_{zk}, t'_{fk} 表示 $F2$ 发出的正向和反向行波经折反射后依次到达检测点的时间,则各个检测点中, $A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$ 的各个故障行波到达时间顺序惟一确定,即;

$$t_{zk} < t'_{zk} < t_{fk} \quad (0 < k \leq i - 1) \quad (9)$$

$A_{j+1}, A_{j+2}, \dots, A_n$ 的各个故障行波到达时间顺序也是惟一确定的,其时序关系为:

$$t'_{fk} < t_{fk} < t_{zk} \quad (j < k < n) \quad (10)$$

对于 2 故障点之间的检测点 A_{i+1}, \dots, A_j , 根据 2 故障点的位置分为 3 种情况讨论,即故障发生位置处于同一分段中,故障发生在相邻的分段中,故障发生在不相邻的分段中。

(1) 当 $i=j$ 时,分布式故障测距检测系统示意图如图 7 所示。

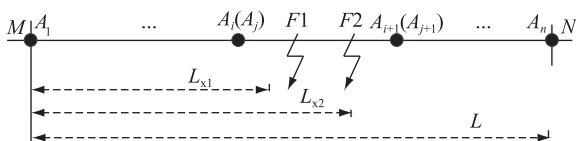


图 7 分布式故障测距检测系统示意图 ($i=j$)

Fig.7 Distributed traveling wave fault location system ($i=j$)

对于测量点有 $A_{i+1} = A_{j+1}$, 该测量点行波到达时间满足式(10)。构建行波波头传输特性曲线,如图 8 所示。

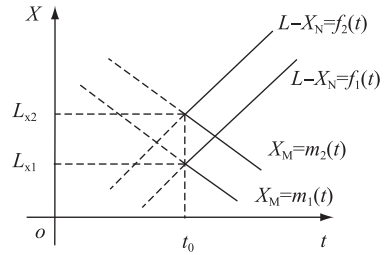


图 8 $i=j$ 时的行波波头传播特性曲线

Fig.8 Propagation characteristics of traveling wave head while $i=j$

图 8 中直线 l_1 为 $L-X_N=f_2(t)$, 该曲线由 $t'_{f(i+1)}, t'_{f(i+2)}, \dots, t'_n$ 与对应检测点安装位置距离 M 端的距离拟合得到; 直线 l_2 为 $L-X_N=f_1(t)$, 与 l_1 具有相同的斜率; 直线 l_3 为 $X_M=m_2(t)$; 直线 l_4 为 $X_M=m_1(t)$, 且 l_3 与 l_4 也具有相同的斜率。点 L_{x1}, L_{x2} 分别为故障点 $F1, F2$ 距 M 端距离。

(2) 当 $i+1=j$ 时,分布式故障测距检测系统示意图如图 9 所示。

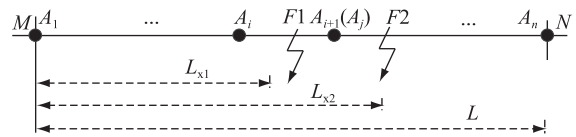


图 9 分布式故障测距检测系统示意图 ($i=j-1$)

Fig.9 Distributed traveling wave fault location system ($i=j-1$)

此时,对于测量点 A_{i+1} 有 $A_{i+1} = A_j$, 且点 A_{i+1} 初始行波到达时间顺序为:

当 $L_{i+1} - L_{x1} > L_{x2} - L_{i+1}$, 即 $t_{zi} < t'_{f(i+1)}$ 时, $t'_{z(i+1)} < t_{f(i+1)}$; 当 $L_{i+1} - L_{x1} > L_{x2} - L_{i+1}$, 即 $t_{zi} > t'_{f(i+1)}$ 时, $t'_{z(i+1)} > t_{f(i+1)}$ 。

由此可以根据测量点 A_i, A_{j+1} 检测到的第一个行波的时间判断测量点 A_{i+1} 的行波时序。确定行波波头传输特性曲线,如图 10 所示。

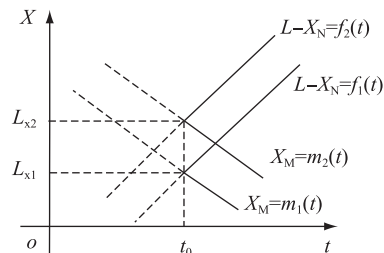


图 10 $i+1=j$ 时的行波波头传播特性曲线

Fig.10 Propagation characteristics of traveling wave head while $i+1=j$

图 10 中直线 l_1 为 $L-X_N=f_2(t)$; 直线 l_2 为 $L-X_N=f_1(t)$; 直线 l_3 为 $X_M=m_2(t)$, 直线 l_4 为 $X_M=m_1(t)$ 。点 L_{x1}, L_{x2} 分别为故障点 $F1, F2$ 距 M 端距离。

(3) 当 $|i-j| > 1$, 即 $F1$ 和 $F2$ 发生在不相邻的两段, 该情况下分布式故障测距检测系统示意图见图 8。对于测量点 $A_k (k=i+1, i+2, \dots, j)$, 当 $L_k - L_{x1} > L_{x2} - L_k$ 时, $t'_{zk} < t_{f(k)}$; 当 $L_k - L_{x1} < L_{x2} - L_k$ 时, $t'_{zk} > t_{f(k)}$ 。结合式(9)、式(10)确定行波波头传输特性曲线, 与图 10 类似。

此外, 在构建行波波头传播特性曲线前, 需要首先确定 2 个故障点的故障区间。关于故障区间判断, 研究学者提出了较多的方法^[17,18]。文中采用了文献[19]所提出的利用工频故障电流之间的偏离度和波头到达时间来判断故障区间的方法, 以确定故障区间。

该方法利用行波到达时刻来初步判断故障可能出现的区段, 同时利用输电线路各点电流之间偏离度来确定线路故障的具体区段。在得到故障区间 2 故障点的位置关系后, 利用前述的结论, 拟合出各自的行波波头传播特性曲线, 就可以实现各故障点的精确定位。

4 仿真实验

4.1 仿真条件

在 PSCAD 中搭建 500 kV 双端供电系统, 仿真模型如图 11 所示。其中, 左侧电源系统阻抗为 $9.19 + j52.1 \Omega$, 右侧电源的系统阻抗为 $8.19 + j42.11 \Omega$, 线路 MN 全长为 300 km, 且对输电线路采用分布参数的仿真模型。仿真时间 0.3 s, 故障起始时刻 0.2 s, 故障持续时间 0.1 s。小波变换采用 db 小波对分解过的信号进行模极大值变换以获得行波信号的突变信息^[20]。

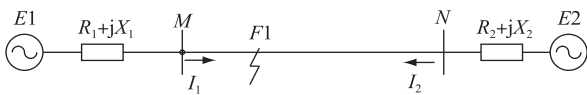


图 11 分布式行波测距系统仿真模型图

Fig.11 Simulation model of the distributed traveling wave fault location system

在仿真过程中, 模拟不同故障类型包括模拟单相接地、相间短路、两相接地短路和三相短路等的故障, 同时在不同过渡电阻、不同故障距离对故障测距的影响, 具体测距流程如下:

(1) 设置故障类型、故障距离等参数, 利用 PSCAD 进行高压输电线路故障情况仿真, 获取测量点故障信息。

(2) 取故障前后一段时间的数据, 利用 matlab

对采样数据利用小波变换进行处理, 并对得到的故障高频分量提取模极大值, 得到各检测点故障行波信号。

(3) 根据分布式行波测距原理, 利用获取的故障信号拟合行波波头传输特性曲线, 从而求出故障的距离。

(4) 分析利用基于分布式行波测距算法测得的故障距离, 分析该方法测距的故障距离与实际故障距离, 并将其同常规测距算法测得的结果进行比较。

4.2 单处故障仿真分析

以距离 M 端 70 km 处发生 A 相接地故障为例, PSCAD 仿真系统中故障发生在 0.2 s 时刻。

图 12 为 M 端测量点 A1 的电流仿真波形, 对该电流 I_1 进行相模变换后, 然后取变换后的线模分量进行小波变换取模极大值, 模极大值图如图 13 所示。

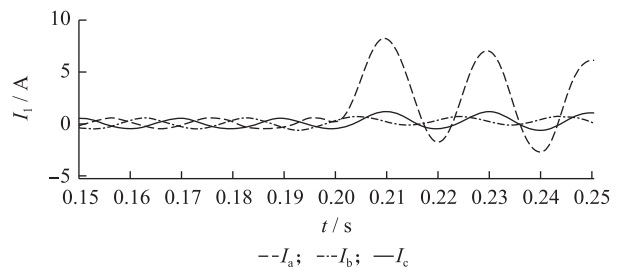


图 12 测量点 A1 的电流波形

Fig.12 Current wave at measuring point A1

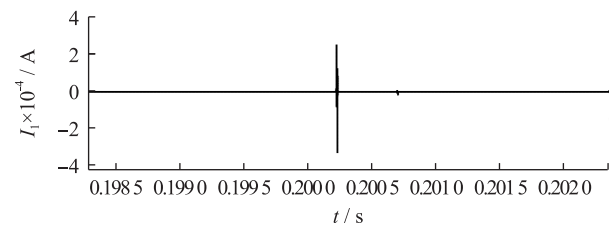


图 13 测量点 A1 的电流波形取模极大值结果

Fig.13 Modulus maxima of current wave at measuring point A1

对于检测点 A1, 其第一个模极大值对应的时刻为 0.200 232 s。同理可得到检测点 A2, A3, A4 的电流仿真波形及其模极大值图, 从而可以得到各个检测点第一个极大值对应的时间分别为 0.200 098 s, 0.200 433 s, 0.200 768 s。计算故障的行波波头特性曲线为:

$$\begin{cases} X_m = -\frac{100}{0.000335}t + 59770.7463 \\ L - X_n = \frac{100}{0.000335}t - 59630.7463 \end{cases} \quad (11)$$

又由于 $X_m = L - X_n$, 则可得 $X_m = 69.99$ km, 从测距结果看, 距 M 端 69.99 km 处故障测得的故障距

离为 69.99 km, 结果具有很高的精度, 符合测距要求。

分别设置故障点在 10 km, 70 km, 130 km 和 270 km 处, 行波波速取 2.96×10^8 m/s。通过分布式行波测距的测距结果如表 1 所示。

表 1 单处故障时的分布式行波测距结果

Table 1 Results of distributed traveling wave fault location when single fault happens

故障类型	故障范围	故障位置/km	测距结果/km	误差/%
AG	0%~10%	10	10.12	0.04
	10%~90%	70	70.0	0
	10%~90%	130	130.03	0.01
	90%~100%	270	269.7	0.1
ABC	0%~10%	10	10	0
	10%~90%	70	69.97	0.01
	10%~90%	130	130.03	0.01
	90%~100%	270	269.7	0.1
AB	0%~10%	10	10.26	0.087
	10%~90%	70	70.14	0.05
	10%~90%	130	130.53	0.177
	90%~100%	270	269.7	0.1
ABC	0%~10%	10	10	0
	10%~90%	70	70.0	0
	10%~90%	130	130.24	0.08
	90%~100%	270	269.85	0.05

由表 1 可知, 运用基于小波变换的分布式行波测距对故障位置测量有着很高的测量精度, 同时对故障位置、故障类型和过渡电阻都有一定的适应性, 并且检测误差基本均在 0.1% 以内, 满足工程需要。其较常规行波测距方法而言, 由于消去了波速对故障测距的影响, 具有更高的测量精度。

4.3 2 处故障仿真分析

系统发生 2 处故障时的仿真模型如图 14 所示。依然设在输电线路距离 M 端 40 km 和 170 km 处发生了 A 相接地故障, PSCAD 仿真系统中故障发生在 0.2 s 时刻。

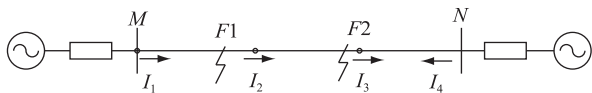


图 14 系统发生 2 处故障的仿真模型图

Fig.14 Simulation model of the system with two faults

图 15 为 M 端测量点 A1 的电流仿真波形。对该电流 I_1 进行相模变换后, 然后取变换后的线模分量进行小波变换取模极大值, 模极大值图如图 16 所示。

对于检测点 A1, 其第一个模极大值对应的时刻

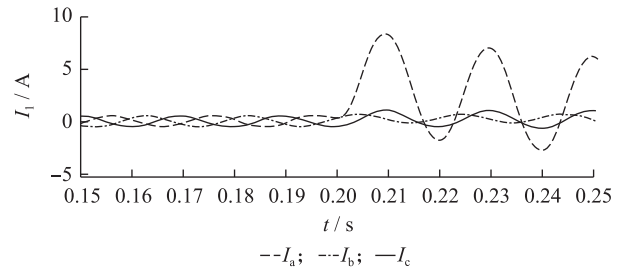


图 15 测量点 A1 的电流波形

Fig.15 Current wave at measuring point A1

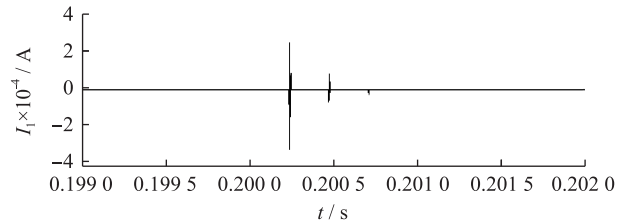


图 16 测量点 A1 的电流波形模极大值

Fig.16 Modulus maxima of current wave at measuring point A1

为 0.200 232 s。同理可得检测点 A2, A3, A4 的电流仿真波形及其模极大值图, 各个检测点第一个极大值对应的时刻分别为 0.200 100 s, 0.200 200 s, 0.200 534 s。其中检测点 A3 检测到的第二个模极大值对应的时间为 0.200 434 s, 结合故障区间的判别结果, 该模极大值点对应着故障 F1 的反向行波到达检测点 A3 的时间。则故障的行波波头特性曲线为:

$$\begin{cases} X_{m1} = -\frac{100}{0.000334}t + 59950.2994 \\ L - X_{n1} = \frac{100}{0.000334}t - 59810.1796 \\ X_{m2} = -\frac{100}{0.000334}t + 60020.35928 \\ L - X_{n2} = \frac{100}{0.000334}t - 59740.11976 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $X_{m1} = L - X_{n1}$, $X_{m2} = L - X_{n2}$, 且 X_{m1} , X_{m2} 分别为故障点 F1, F2 距 M 端的距离。

对式(12)的方程组进行求解, 可得 2 故障点距 M 端的距离分别为 70.06 km, 140.12 km。

分别设置故障点在 70 km, 140 km; 65 km, 240 km; 140 km, 260 km; 50 km, 80 km; 150 km, 170 km; 240 km, 275 km 处。通过双端行波测距法的测距结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 运用基于小波变换的双端行波测距对故障位置、故障类型和过渡电阻都有一定的适应性, 并且检测误差基本小于 0.3%, 满足工程测试的需求。

表2 2处故障时的分布式行波测距结果

Table 2 Results of distributed traveling wave fault location when two faults happen km

故障类型	故障距M 端位置	分布式行波 测距结果	传统行波 测距结果
AG	70,140	70.6,140.12	34.928,105.6
	65,240	64.27,239.820	64.824,152.7
	140,260	139.1,260.923	181.6,200.02
	50,80	50.75,80.18	14.63,66.676
	150,170	149.55,170.27	10.36,159.77
ABG	240,275	240.24,274.85	17.464,256.6
	70,140	69.46,140.12	34.52,105.3
	65,240	64.27,239.820	64.528,152.7
	140,260	139.1,260.923	181.6,200.02
	50,80	50.75,80.18	14.63,66.676
AB	150,170	149.55,170.27	10.36,159.77
	240,275	240.24,275.45	17.464,256.3
	70,140	69.46,140.12	35.52,105.3
	65,240	64.27,239.820	64.824,152.7
	140,260	139.1,260.923	181.6,200.02
ABC	50,80	50.75,80.18	14.8,66.676
	150,170	149.55,170.27	10.36,159.77
	240,275	240.24,275.45	17.464,256.6
	70,140	69.46,140.12	35.224,105.3
	65,240	64.27,239.82	64.824,152.7

5 结论

文中针对现有的常规故障测距方法在线路发生两处故障时准确度较低的问题,提出了一种基于分布式改进的行波测距方法。该方法避开对输电线路中行波波速值的依赖,具有更强的抗噪声干扰特性和更高的测量精度。仿真结果表明,该行波测距方法对输电线路不同位置的故障均能实现高精度的故障测距。

参考文献:

- [1] 黄震,江泰廷,张维锡,等.基于双端行波原理的高压架空线-电缆混合线路故障定位方法[J].电力系统自动化,2010 34(14):88-91.
HUANG Zhen,JIANG Taiting,ZHANG Weixi,et al. A fault location method for high-voltage overhead lines combined with underground power cables based on double-ended travelling wave principle[J]. Automation of Electric Power System, 2010 34(14):88-91.
- [2] 谭文展,关均康.基于北斗卫星定位系统的高压输电线路双端故障定位研究[J].电工技术,2008(5):27-29.
TAN Wenzhan,GUAN Junkang. Research on double end fault

location technology of high voltage transmission line base on beidou satellite positioning system.[J]. Electrician technology, 2008(5):27-29.

- [3] 季玉中.关于输电线路的故障测距方法的探讨[J].电子世界,2013,(20):44-45.
JI Yuzhong. Discussion on fault location method of power transmission line[J]. Electronic World, 2013,(20):44-45.
- [4] 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.
- [5] 于玉泽,覃剑,李功新,等.电缆-架空线混合线路故障测距方法综述[J].电网技术,2006,30(17):64-69.
YU Yuze,TAN Jian,LI Gongxin, et al. A survey on fault location methods for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(17):64-69.
- [6] 束洪春,程春和,赵文渊,等.形态学与HHT检测相结合的行波波头准确标定方法[J].电力自动化设备,2009,29(7):1-7.
SHU Hongchun,CHENG Chunhe,ZHAO Wenyuan,et al. Accurate traveling-wave front detection based on morphology and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7):1-7.
- [7] 陈学伟.500 kV输电线路精确故障定位技术研究[D].济南:山东大学,2013.
CHEN Xuewei. Research on accurate fault location technology for 500 kV transmission lines[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [8] 何军娜,陈剑云,艾颖梅,等.电力系统行波测距方法及其发展[J].电力系统保护与控制,2014,42(24):148-154.
HE Junna,CHEN Jianyun,AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24):148-154.
- [9] BRAHMA S M, GIRGIS A. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2004, 19(4):1619-1622.
- [10] DE MORAIS-PEREIRA C E, ZANETTA L C. Fault location in transmission lines using one-terminal postfault voltage data[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2004, 19(2):570-575.
- [11] 刘亚东,盛戈隼,孙岳,等.基于故障电流信息综合分析的分布式单相接地故障测距方法[J].电网技术,2012,36(8):87-94.
LIU Yadong,SHENG Geao,SUN Yue,et al. A distributed fault location algorithm for single-phase ground fault by comprehensive analysis on fault current information[J]. Power System Technology, 2012, 36(8):87-94.
- [12] 李勇.基于暂态电流行波的输电线路继电保护及故障定位系统研究[D].沈阳:东北大学,2012.

- LI Yong. Research of transmission line relay protection and fault location system based on transient current travelling waves [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [13] 刘洪正, 高厚磊, 韩志骏, 等. 输电线路加权数据融合故障测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 15-20.
- LIU Hongzheng, GAO Houlei, HAN Zhijun, et al. Transmission line fault location algorithm based on weighted data fusion[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 15-20.
- [14] 王利平, 王晓茹, 王伟, 等. 输电线路加障测距实用算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 24-30.
- WANG Liping, WANG Xiaoru, WANG Wei, et al. Study of faultslocation algorithm on power transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 24-30.
- [15] 周鑫, 吕飞鹏, 吴飞, 等. 基于小波变换的T型线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010 38(2): 8-11.
- ZHOU Xin, LYU Feipeng, WU Fei, et al. A new fault location method for T-connection transmission lines based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010 38(2): 8-11.
- [16] 刘亚东. 输电线路分布式故障测距理论与关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- LIU Yadong. Distributed fault location theory and the key technologies for transmission line [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [17] 朱翔, 解大, 高强, 等. Db8小波在电力系统谐波分析中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 67-71.
- ZHU Xiang, XIE Da, GAO Qiang, et al. On the application of analyzing power system harmonics using Db8 [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(2): 67-71.
- [18] 李小鹏, 何正友, 武 骁, 等. 计及故障测量装置失效的输电网固有频率故障定位方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1217-1222.
- LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao, et al. Natural frequencies based fault location method for transmission network considering measurement device invalidation [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1217-1222.
- [19] 逯怀东, 许 磊, 刘宗杰, 等. 电缆-架空线混合线路故障行波定位及自适应重合闸控制[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(4): 31-35.
- LU Huaidong, XU Lei, LIU Zongjie, et al. New method of traveling wave fault location and adaptive reclosing for cable-overhead mixed lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(4): 31-35.
- [20] 郑 州, 吕艳萍, 王 杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
- ZHENG Zhou, LYU Yanping, WANG Jie, et al. A new two-terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power system technology, 2010, 34(1): 203-207.

作者简介:



王 博

王 博(1981—),男,江苏南京人,高级工程师,从事智能化电器以及配网自动化的研究工作(E-mail:4832455@qq.com);

谷昌瑞(1985—),男,江苏扬州人,工程师,从事智能化电器以及配网自动化的研究工作(E-mail:278700738@qq.com);

吉筱筱(1991—),女,江苏盐城人,工程师,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:937818260@qq.com);

王 俊(1992—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为微电网保护(E-mail:535462103@qq.com)。

Research on Improved Distributed Fault Location Method based on Multi-point Fault's Traveling Wave Detection

WANG Bo¹, GU Changrui¹, JI Xiaoxiao², WANG Jun²

(1. Yangzhou Keyu Electric Power Co. Ltd., Yangzhou 225000, China;

2. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In traditional locating fault methods using on high voltage lines, the traveling wave method has drawn attention at home and abroad with better anti-interference and higher ranging accuracy. However, when multiple faults occur on the transmission line, its error will become large because of traveling wave's overlap. In order to solve this problem, this paper proposes the improved distributed traveling wave fault location method after analyzing the transmission characteristics of traveling wave on transmission line in fluctuation process and conventional method's limitations. Firstly, this improved method fits the characteristic curve of the traveling wave head using its arriving time which reaches the multiple measurement points. And then, it uses the curve above to solve the specific position of the fault occurs. Finally, the effectiveness of this method is verified by using PSCAD to construct and simulate the 500 kV transmission line model.

Key words: HV transmission lines; fault location; distributed traveling wave fault location; multiple faults; PSCAD

(编辑 徐林菊)