

应用于含有线-缆混合线路配电网的行波故障测距新方法

侯丽钢, 汤向华, 江辉, 刘辉, 范乐松

(国网海门市供电公司, 江苏 海门 226100)

摘要:故障行波波头的准确辨识是提高配电网行波故障测距精度的关键因素之一,文中提出基于改进希尔伯特-黄变换(HHT)的行波波头标定方法,首先利用自适应噪声的完全集合经验模态分解(CEEMDAN)方法对故障信号进行分解,再利用希尔伯特变换求取高频固有模态函数分量的瞬时幅值,根据瞬时幅值的突变点确定行波波头的到达时刻。针对配电网的单一线路,利用该方法标定行波波头后,采用D型测距原理实现测距;针对线-缆混合线路,提出了基于接点时差的双端测距原理实现故障测距。对不同故障时间、故障位置、接地电阻等情况的故障进行仿真实验,结果表明,该方法可精确标定行波波头,且具有较高的测距精度。

关键词:故障测距;CEEMDAN;行波;线-缆混合;波头辨识

中图分类号:TM755

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)02-0111-06

0 引言

电缆线路因其占用地上空间小、输送容量大、故障率低等优点,越来越多的用于配电网中,配电网出现了线-缆混合线路。配电网短路故障时有发生,特别是单相接地故障占总故障的80%左右,当线-缆混合线路发生短路故障时,故障点位置不易查找,且当今智能电网的发展对配网故障测距技术提出了更高的要求,因此准确快速的定位出故障点的位置,将故障切除,可大大节省人力物力,保证供电的可靠性。

因故障暂态行波受接地点电阻、CT饱和、故障类型及中性点接地方式的影响小,配网行波故障测距技术已经成为研究的热点。对行波测距而言,行波波头的准确识别和行波波速的确定是提高测距精度的关键。文献[1]采用具有一阶消失矩的三阶中心B样条小波通过二进小波变换分解故障信号,为了使检测的零模波速度更加稳定,采用大尺度下模板大值标定行波波头。文献[2—3]采用较高能量集中的Db6小波对故障信号进行分解,利用小尺度d1层的模板大值标定波头的到达信息,提高了波头的标识精度。但是对小波分解而言,在选择小波基函数时只能依靠经验,不能根据信号的特征进行选取,当确定了小波基函数和分解层数后,只能得到与采样率有关的某一固定带宽的信号,因而小波分析不能自适应分解信号。为此,文献[4—5]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)法分解故障信号后,利用希尔伯特变换(hilbert transform, HT)求出最高频固有模态函数(intrinsic

mode function, IMF)分量的瞬时频率,再将第一个频率突变点辨识为初始波头的到达时刻。在文献[6]中,对故障信号进行EMD分解后,对最高频IMF分量求差分,通过奇异点检测来辨识行波波头。EMD能够根据故障信号特征对信号进行自适应分解,但是EMD存在严重的模态混叠,使得得到的高频暂态行波信号中存在其他频率的信号,信号存在噪声时,利用高频IMF的瞬时频率不能有效地识别行波波头。

采用完全集合经验模态分解(complete ensemble EMD with adaptive noise, CEEMDAN)可以有效地解决EMD存在的模态混叠问题^[7-9],还可避免经验模态分解(ensemble EMD, EEMD)和互补经验模态分解(complementary EEMD, CEEMD)中每次EMD可能产生的IMF个数不相等的问题^[10-12],文中把CEEMD的消噪原理用于CEEMDAN中,使得IMF中的噪声幅值大大减弱。首先利用CEEMDAN分解故障线路两端测量装置获取的故障信号,分别提取高频IMF分量,再利用希尔伯特变换求取高频IMF分量的瞬时幅值^[13],由瞬时幅值进行初始行波波头的准确标定。标定波头时刻后,针对线-缆混合线路采用基于接点时差的双端行波测距原理进行故障测距。MATLAB/SIMULINK仿真结果表明,所提方法能够精确标定行波波头,得到了更高的故障测距精度。

1 配电线路行波的传播特征

图1为含有2条出线的辐射型配电网,当线路1的电缆段发生故障时,相当于在故障点加入一电压源,其大小与故障前电压大小相等,方向相反,

此电压源为故障行波波源,其将产生分别向线路1两端传播的正、反向行波。行波在传播的过程中,将在线-缆连接点、故障点、线路的首末段发生复杂的折反射过程,并且会有一部分行波透射到线路2中,从而在母线处也会有线路2的反射波出现。采用单端测距方法时,很难辨别故障点反射波和线路1末端母线的反射波,因此文中采用双端测距法,即通过识别线路1两端初始行波波头,就可实现故障测距,无需考虑复杂的行波折反射过程。

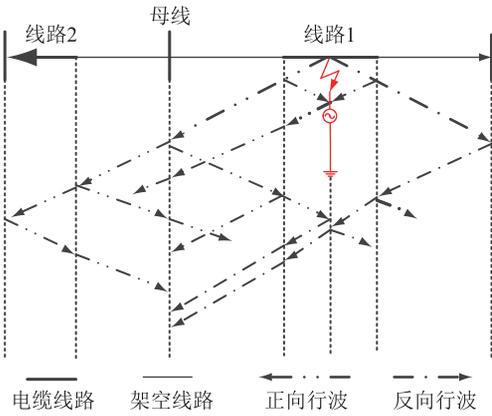


图1 行波传播

Fig.1 Traveling wave propagation

采用 Karrenbauer 变换得到三相线路的模域波动方程为^[5,14]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} \gamma_0^2(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1^2(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_2^2(\omega) \end{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} \gamma_0^2(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1^2(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_2^2(\omega) \end{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\gamma_k(\omega) = \sqrt{[R_k(\omega) + j\omega L_k(\omega)][G_k + j\omega C_k]} = \alpha_k(\omega) + j\beta_k(\omega) \quad (3)$$

式中: $\gamma_k(\omega)$ 为传播系数; $R_k(\omega)$, $L_k(\omega)$, G_k , C_k 分别为模域中单位电阻、电感、电导、电容; $\alpha_k(\omega)$ 为幅度衰减系数; $\beta_k(\omega)$ 为相位滞后系数。

行波的传播速度在模域中可以表示为:

$$v_k(\omega) = \frac{\omega}{\beta_k(\omega)} = \sqrt{2} \omega \{ \omega^2 L_k(\omega) C_k - R_k(\omega) G_k + \sqrt{[R_k^2(\omega) + \omega^2 L_k^2(\omega)][G_k^2 + \omega^2 C_k^2]} \}^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

由于 $R_k(\omega)$ 随 ω 的增大而增大, $L_k(\omega)$ 随 ω 的增大而减小,其中零模分量受频率的变化更为严重,而线模分量的变化量很小。结合式(3)、(4)可知, $\alpha_0(\omega)$ 和 $n_0(\omega)$ 随 ω 的增大而急剧增大, $\alpha_{1,2}(\omega)$ 和 $n_{1,2}(\omega)$ 受 ω 的影响小,其值相对稳定。可见,若

采用零模分量实现测距,必须对零模波速进行在线测量才能保证测距的准确性,因此,采用线模分量更利于实现故障测距。

2 行波波头的标定及仿真验证

2.1 自适应噪声的完全集合经验模态分解

为了解决 EEMD 可能存在每次 EMD 产生 IMF 的个数不同,导致最后求平均时误差很大的问题,M.E.TORRES 等人在 2011 年提出了 CEEMDAN 方法,并在 2014 年进行改进^[15-16],其算法步骤如下:

(1) 对加噪信号 x_i 进行 N 次 EMD 分解,取每次分解得到的第 1 个 IMF 分量 $F_{IMF1,i}$,求均值得到分解后的 F_{IMF1} :

$$F_{IMF1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{IMF1,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_1(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_1[x_0 + \beta_0 E_1(\omega_i)] \quad (5)$$

式中: F_{IMF1} 为 CEEMDAN 求得的第 1 个 IMF 分量;符号 $E_j(\cdot)$ 表示取 EMD 分解结果的第 j 个分量,此处 $E_1(\cdot)$ 表示取第 1 个 IMF 分量; x_0 为原始信号; ω_i 为第 i 次 EMD 加入的白噪声; b_0 为 $E_1(\omega_i)$ 的幅值。

(2) 求得 F_{IMF1} 后,计算剩余分量 $r_1 = x - F_{IMF1}$ 。

(3) 对 $r_1 + b_1 E_2(\omega_i)$,按 $i = 1, 2, \dots, N$ 进行 N 次 EMD 分解,取出每 1 次分解的第 1 个模态,进而得到第 2 个 IMF 分量:

$$F_{IMF2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_1[\gamma_1 + \beta_1 E_2(\omega_i)] \quad (6)$$

(4) 对于第 k 次分解, $k = 2, 3, \dots, n$,计算第 k 个剩余分量 $r_k = r_{k-1} - F_{IMFk}$ 。

(5) 对 $r_k + b_k E_{k+1}(\omega_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 进行 N 次 EMD 分解,取出每一次分解的第 1 个模态,进而求得第 $(k+1)$ 个 IMF 分量:

$$F_{IMF(k+1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_1[\gamma_k + \beta_k E_{k+1}(\omega_i)] \quad (7)$$

(6) 返回第(4)步,进行下一次分解。重复第(4)到第(6)步,直到剩余分量 r_k 的极值点个数小于 2,最后得到 n 个 IMF 分量,CEEMDAN 得到的剩余分量为 $R = x - \sum F_{IMFi}$ 。则原始信号 x_0 可以表示为:

$$x_0 = \sum_{i=1}^n F_{IMFi} + R \quad (8)$$

在分解过程中, $b_0 = \varepsilon_0 \text{std}(x) / \text{std}(E_1(x_i))$, $b_k = \varepsilon_0 \text{std}(r_k)$, $k \geq 1$,其中 ε_0 为所要设定的白噪声幅值比值系数,符号 $\text{std}(\cdot)$ 表示求数列的标准差。

通过上述 CEEMDAN 分解配网故障信号,所得的 IMF 中有残余噪声存在,为了减弱噪声的影响,

把 CEEMD 引入 CEEMDAN 中,即在每次分解中加入正、负成对的白噪声信号:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(i)} \\ y_2^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ \beta_l E_{(l+1)}(w^{(i)}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$l = 0, 1, \dots, n$$

式中; $y_1^{(i)}, y_2^{(i)}$ 为加入正负成对白噪声后的信号; s 为原始信号 x_0 或剩余分量 r_k 。

2.2 波头标定方法

首先,利用 CEEMDAN 分解故障信号,取出高频 IMF 分量;

其次,利用 HT 求取高频 IMF 分量的瞬时幅值:

$$\hat{g}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(t) - \tau}{\tau} d\tau \quad (10)$$

$$a_i(t) = \sqrt{g_i(t)^2 + \hat{g}_i(t)^2} \quad (11)$$

式中; $\hat{g}(t)$ 为高频 IMF 分量 $g(t)$ 的 HT 变换; $a_i(t)$ 为高频分量 $g(t)$ 的瞬时幅值。

最后,由于高频行波最先到达测量端,并引起测量点高频分量的幅值突变,因此可把高频 IMF 分量的第 1 个幅值突变点的时间确定为初始行波的到达时刻。

2.3 波头标定方法的仿真验证

利用 MATLAB/SIMULINK 建立如图 2 所示的 10 kV 辐射型配电网,其中线路参数如表 1 所示。

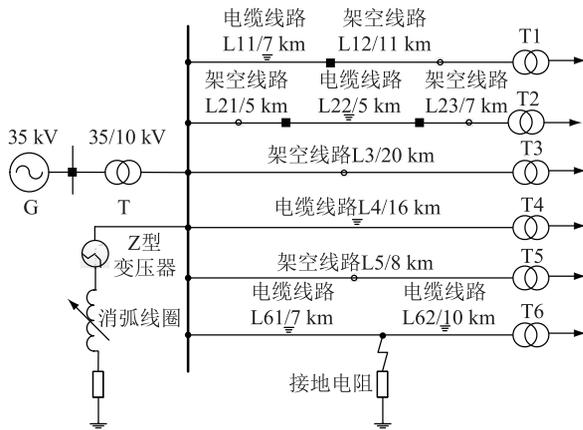


图 2 辐射型配电网结构

Fig.2 Structure diagram of radiated distribution network

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

线路类型	相序	电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空线路	正序	0.170 0	1.210 0	0.009 7
	零序	0.230 0	5.480 0	0.006 0
电缆线路	正序	0.265 0	0.255 0	0.170 0
	零序	2.540 0	1.019 0	0.153 0

在仿真过程中,采样频率为 1 MHz,白噪声幅值比值系数 $\varepsilon_0 = 0.006$, EMD 分解次数 $N = 30$ 。当相电压过峰值($t = 0.065$ s)时,线路 3 距母线 8 km 的位置处发生单相接地故障,接地电阻为 200 Ω ,在母线端测得线路 3 的三相电流如图 3 所示,通过 Karrenbauer 变换对三相电流解耦^[17-18],得到模 1 分量如图 4 所示。对此模 1 分量进行 CEEMDAN 分解,取最高频的 IMF 分量,即 F_{IMF1} ,其波形如图 5 所示,采用 HT 变换得到 F_{IMF1} 的瞬时幅值如图 6 所示。

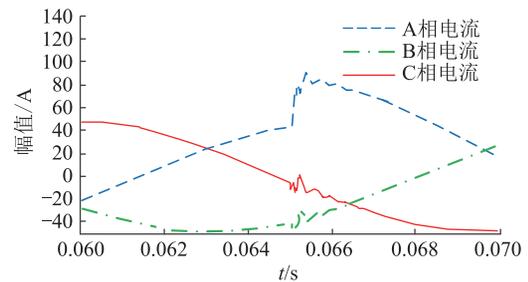


图 3 线路 3 首端的三相电流

Fig.3 The three-phase current at the head end of the line 3

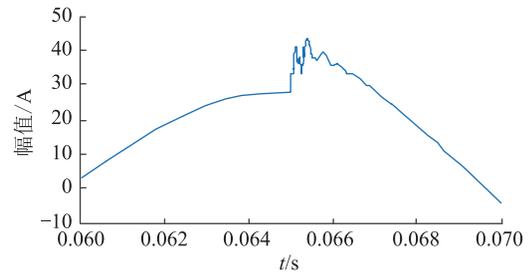


图 4 线路 3 首端的模 1 电流

Fig.4 The mode 1 current at the head end of the line 3

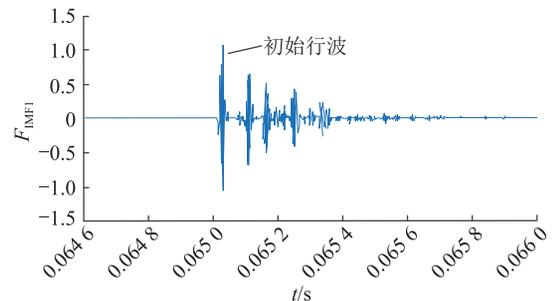


图 5 线路 3 首端模 1 电流的 F_{IMF1} 分量

Fig.5 The F_{IMF1} component of mode 1 current at the head end of the line 3

线路 3 末端故障电压的模 1 分量如图 7 所示,图 8 为电压的模 1 分量经 CEEMDAN 分解后得到的 F_{IMF1} 分量,而对其 HT 变换得到的瞬时幅值如图 9 所示。

由图 6、图 9 可以得到初始行波达到线路 3 首、

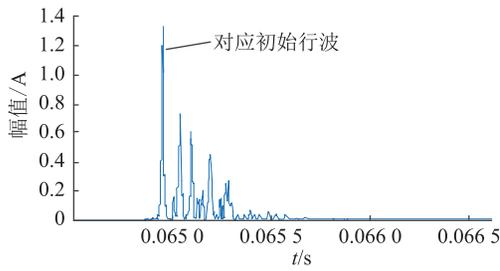


图6 线路3 电流 F_{IMF1} 的瞬时幅值
Fig.6 Instantaneous amplitude of line 3 current F_{IMF1}

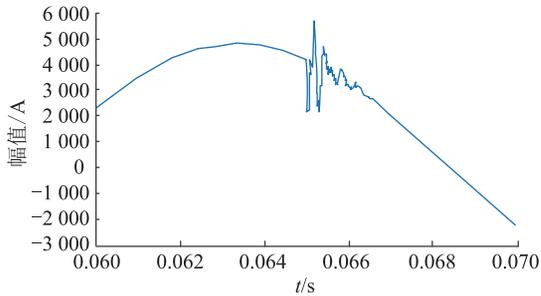


图7 线路3 末端的模1 电压
Fig.7 The mode 1 current at the end of the line 3

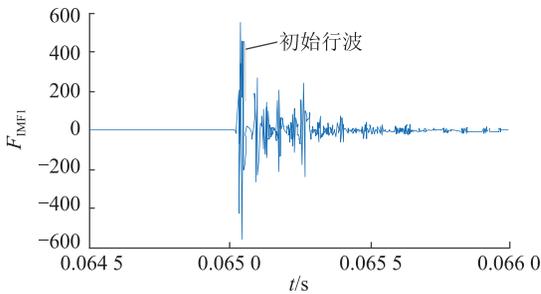


图8 线路3 末端模1 电压的 F_{IMF1} 分量
Fig.8 The F_{IMF1} component of mode 1 voltage at the end of the line 3

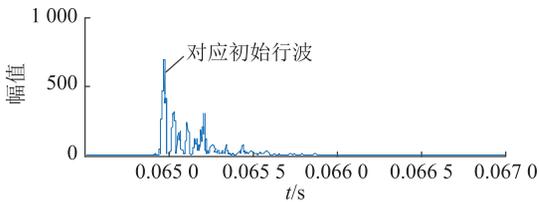


图9 线路3 电压 F_{IMF1} 的瞬时幅值
Fig.9 Instantaneous amplitude of line 3 voltage F_{IMF1}

末端的时刻分别为 65.029 0 ms, 65.043 0 ms, 其差值为 Δt 为 0.014 0 ms。

各线路行波的传播速度采用公式 $n = 1 / L_1 C_1$ 进行计算, 其中 L_1, C_1 分别为线路的单位正序电感、正序电容, 经计算得架空线路的波速为 $2.918 9 \times 10^8$

m/s, 电缆线路的波速为 $1.518 8 \times 10^8$ m/s。

故障初始行波到线路 3 首、末端测量点时间的理论计算值分别为: $\hat{t}_M = 0.027 4$ ms, $\hat{t}_N = 0.041 1$ ms, 理论时间差为 $\Delta \hat{t} = 0.013 7$ ms。可见, 采用改进的 HHT 标定行波波头具有较高的准确度。

3 行波故障测距方法及仿真分析

3.1 基于接点时差的行波故障测距算法

由第 1 节分析可知, 配网行波故障测距采用双端测距原理较优, 而行波 D 型双端测距原理为:

$$\begin{cases} l_{MF} = [(t_M - t_N)v + L]/2 \\ l_{NF} = [(t_N - t_M)v + L]/2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: l_{MF}, l_{NF} 分别为故障点距故障线路首端测量点 M、末端测量点 N 的距离; t_M, t_N 分别为故障初始行波到达 M、N 点的时刻; v 为行波波速; L 故障线路的总长度。

由式(12)可以看出 D 型测距原理只适用于波速度恒定的均一线路。对线-缆混合线路而言, 不能直接用 D 型原理实现测距, 必须对双端测距算法进行改进, 文中采用基于接点时差的双端测距算法实现线-缆混合线路的测距。

基于接点时差的双端测距算法为:

(1) 确定每条线路的结构, 假设在电缆与架空线路的接点处发生故障, 如图 10 所示, 分别计算接点处产生的行波到线路首、末端测量点的时间 $\Delta t_{Q_1MN} = t_{Q_1M} - t_{Q_1N}$, $\Delta t_{Q_2MN} = t_{Q_2M} - t_{Q_2N}$ 。

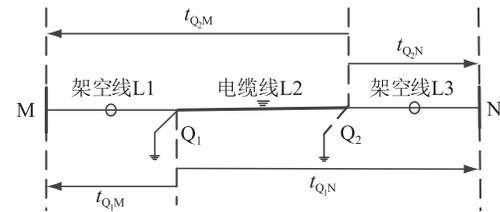


图 10 接点故障时差

Fig.10 Time difference diagram of contact fault

(2) 当线路发生故障时, 利用 2.2 节介绍的波头标定方法, 辨识初始行波到达测量点 M、N 的时间 t_{FM}, t_{FN} , 进而得到时间差 $\Delta t_{FMN} = t_{FM} - t_{FN}$ 。

(3) 比较 Δt_{FMN} 与 Δt_{Q_1MN} 、 Δt_{Q_2MN} 之间的大小, 判断故障区段。若 $\Delta t_{FMN} < \Delta t_{Q_1MN}$, 那么故障发生在 MQ_1 段; 若 $\Delta t_{Q_1MN} < \Delta t_{FMN} < \Delta t_{Q_2MN}$, 那么故障发生在 Q_1Q_2 段; 若 $\Delta t_{FMN} > \Delta t_{Q_2MN}$, 那么故障发生在 Q_2N 段; 若 Δt_{FMN} 与 Δt_{Q_1MN} 或 Δt_{Q_2MN} 近似相等, 那么接点处发生了故障。当含有多段线-缆混合线路时, 利用同样的方法获取故障区段。

(4) 故障测距。如图 10 中的电缆段发生故障,

分别计算初始行波到达接点 Q_1 、 Q_2 的时间 $\Delta t_{FQ_1} = t_{FM} - t_{Q_1M}$, $\Delta t_{FQ_2} = t_{FN} - t_{Q_2N}$ 。结合式(10)可以得到:

$$\begin{cases} l_{MF} = L_{MQ_1} + [(t_{FQ_1} - t_{FQ_2})v' + L_{Q_1Q_2}]/2 \\ l_{NF} = L_{Q_2N} + [(t_{FQ_2} - t_{FQ_1})v' + L_{Q_1Q_2}]/2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: L_{MQ_1} , L_{Q_2N} , $L_{Q_1Q_2}$ 分别为架空线 L1、L3、电缆线 L2 的长度; v' 为电缆线的行波波速。

当其他区段发生故障时,方法同式(13)类似。测距误差为 $\delta = |l_c - l_s| / l \times 100\%$, 其中 l_c 为故障距离测量值, l_s 为实际值, l 为故障线路全长。

3.2 测距方法的仿真分析

采用 2.3 节建立的仿真模型对测距方法的正确性及准确度进行分析。

算例 1: 相电压过峰值时, 单相接地故障发生在线路 3 距母线 8 km 的位置处, 接地电阻为 200 Ω 。首先由选线装置选出故障线路, 再启动测距装置进行故障测距, 因线路 3 为波阻抗一致的架空线路, 可以直接用 D 型测距原理进行测距。由 2.3 节仿真可知, 故障初始行波到达线路 3 首、末端的时间分别为 65.029 0 ms, 65.043 0 ms, 由公式(12)得故障点距线路首端的距离为 7.956 8 km, 则测距误差 δ 为 0.22%。

算例 2: 故障发生在线路 2 上。因线路 2 为线-缆混合线路, 所以选用基于接点时差的双端测距原理进行测距。首先确定线路 2 的结构为架空线-电缆-架空线, 经理论计算得架空线-电缆接点 Q_1 处产生的初始行波到达线路 2 首、末端的时间分别为 $t_{Q_1M} = 0.017 1$ ms, $t_{Q_1N} = 0.056 9$ ms, 其差值为 $\Delta t_{Q_1MN} = -0.039 8$ ms, 而电缆-架空线接点 Q_2 处产生的初始行波到达线路 2 首末端的时间为 $t_{Q_2M} = 0.050 1$ ms, $t_{Q_2N} = 0.024 0$ ms, 其差值为 $\Delta t_{Q_2MN} = 0.026 1$ ms。

当相电压相角为 60° ($t = 0.063 3$ s) 时, 单相接地故障发生在距母线 7 km 的位置处, 接地电阻为 1 000 Ω , 利用 2.2 节的方法可以辨识故障初始行波到达线路 2 首末端的时间分别为 63.331 0 ms, 63.343 0 ms, 两者的差值为 $\Delta t_{FMN} = -0.012$ ms, 因为 $\Delta t_{Q_1MN} < \Delta t_{FMN} < \Delta t_{Q_2MN}$, 则故障发生在电缆区段。由公式(13)可得故障点距线路 2 首端的距离 l_{MF} 为 7.1127 km, 距离误差 δ 为 0.66%。

对不同故障情况进行仿真, 测距结果如表 2 所示, 表 2 中测距结果为距故障线路首端的距离。可知, 利用改进的 HHT 标定初始行波时刻后可准确实现故障测距, 并且基于接点时差的双端测距算法的测距精度较高。

表 2 不同故障情况仿真结果

Table 12 Simulation results of different fault conditions

故障线路	故障距离/km	故障时间/ms	首末端时差			测距结果	
			理论值/ms	实测值/ms	误差/ms	实测值/km	误差/%
1	10	65.0	0.029 0	0.029 0	0.000 0	10.004	0.04
2	3	65.0	-0.053 5	-0.052 0	0.001 5	2.880	0.71
4	12	62.5	0.052 7	0.054 0	0.001 3	12.100	0.63
5	6	64.0	0.013 7	0.014 0	0.000 3	6.043	0.54

4 结语

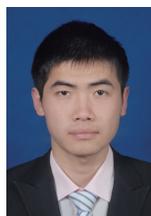
文中提出了利用改进 HHT 标定故障行波波头的算法, 即利用 HT 求故障信号经 CEEMDAN 分解后的第 1 个 IMF 的瞬时幅值, 把瞬时幅值的第 1 个突变点标定为初始行波到达测量点的时刻。仿真结果表明, 在高阻接地故障、不同故障初相角等情况下, 所提方法均能够精确的辨识出波头到达测量点的时刻, 且该算法自适应能力强, 分辨率高, 具有一定的抗噪性。针对线-缆混合线路, 利用基于接点时差的双端测距算法可准确判断出故障区段, 测距精度高, 具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
TANG Jinrui, YIN Xiang gen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of zero mode detection wave velocity and its application to single phase grounding fault location in distribution network [J]. Transaction of China Electrotechnical, 2013, 28(4): 202-211.
- [2] LIANG Rui, FU Guoqing, ZHU Xueyuan, et al. Fault location based on single terminal travelling wave analysis in radial distribution network [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 66: 160-165.
- [3] 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 on fault location of distribution network based on traveling wave time-frequency complex analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136.
- [4] 张小丽, 曾祥君, 马洪江. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 64-67.
ZHANG Xiaoli, CENG Xiangjun, MA Hongjiang. Fault location method for power network fault based on Hilbert-Huang transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-67.
- [5] 徐岩, 裘实. 采用点散式测量的配电网电缆线路行波故障定位[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1038-1045.
XU Yan, QIN Shi. Solid point traveling wave fault location of

- distribution network cable using point scattered measurement [J]. *Power System Technology*, 2014, 38 (4): 1038-1045.
- [6] 李雪云,刘青,李丽英. 基于单端行波法的配电网混合线路波头组合式故障测距方法[J]. *华北电力大学学报*, 2014, 41 (5): 55-61.
LI Xueyun, LIU Qing, LI Liying. A combinatorial fault location method for mixed transmission lines based on single terminal traveling wave method in distribution network [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2014, 41 (5): 55-61.
- [7] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E, et al. Noise-assisted EMD methods in action [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2012, 4(4), 1-11.
- [8] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical-signal processing [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2014, 14: 19-29.
- [9] NAMDARI F, SALEHI M. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(1): 246-253.
- [10] LEI Y, LIN J, HE Z, et al. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 35 (1-2): 108-126.
- [11] CHAN J, MA H, SAHA T, et al. Self-adaptive partial discharge signal de-noising based on ensemble empirical mode decomposition and automatic morphological thresholding [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(1): 294-303.
- [12] YEH J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2010, 2(2), 135-156.
- [13] LIAO B Y, SHU Q. Two-terminal fault location of distribution network based on analysis of positive polarity traveling wave signal [J]. *Water Resources & Power*, 2018.
- [14] 王珺,董新洲,施慎行. 考虑参数依频变化特性的辐射状架空配电网行波传播研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(22): 96-102.
WANG Jun, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Study on traveling wave propagation of radiated overhead distribution lines considering parameters dependent on frequency variation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33 (22): 96-102.
- [15] YAN H, GAO Y, WANG J, et al. Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower [J]. *Power System Protection & Control*, 2018.
- [16] HAMIDI R J, LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32 (1): 135-144.
- [17] HASHEMINEJAD S, SEIFOSSADAT S G, JOORABIAN M. A new traveling-wave-based protection algorithm for parallel transmission lines during inter-circuit faults [J]. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(16).
- [18] YAZDI F, OTHMAN M A K, VEYSI M, et al. A new amplification regime for traveling wave tubes with third-order modal degeneracy [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(1): 43-56.

作者简介:



侯丽钢

侯丽钢(1991),男,硕士,助理工程师,从事电网检修工作(E-mail: 1534895328@qq.com);

汤向华(1979),男,学士,高级技师,从事输变电运行管理运维工作(E-mail: hmtxh@js.sgcc.com.cn);

江辉(1968),男,大专,高级技师,从事电网检修工作。

A novel traveling wave fault location method applied to distribution networks with hybrid line composed of overhead line and cable

HOU Ligang, TANG Xianghua, JIANG Hui, LIU Hui, FANG Yuesong
(State Grid Haimen Power Supply Company, Haimen 226100, China)

Abstract: Due to the accurate identification of wave front can improve accuracy of travelling wave fault location in distribution network, the paper used improved Hilbert-Huang transform to discern the travelling wave front, firstly, used the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise to decompose fault signal, then got instantaneous amplitude of high-frequency intrinsic mode function components by using Hilbert transform. The wave front could be recognized by the breakpoint of instantaneous amplitude. After using the above methods to discern the travelling wave front, for uniform line, used type D measuring distance technology to realize distance measurement, for hybrid line composed of overhead line and cable, fault location could be realized by utilized the two terminal method based on the difference of travelling wave propagation time at each connection point. Through simulations, the proposed method can be verified to locate the fault accurately and reliably in the case of different fault resistance, different fault location, different fault time and etc.

Keywords: fault location; CEEMDAN; travelling wave; hybrid line composed of overhead line and cable; wave front identification

(编辑 杨卫星)