# 基于零模行波波速量化的高压输电线路双端故障定位方法

王 炜<sup>1</sup>, 王全金<sup>2</sup>, 尹 力<sup>1</sup>, 孙海霞<sup>1</sup>, 王 华<sup>1</sup>, 侯添钰<sup>2</sup>, 梁 睿<sup>2</sup>
 (1. 国网江苏电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222004;
 2. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:结合行波零模分量传播的依频特性和衰减特性,提出基于零模行波波速量化的高压输电线路双端故障 定位方法。利用最小二乘法拟合零模行波波速与故障零模行波到达首末端的传输时间差之间的关系。基于 故障发生后实际测量行波信号的传输时间差,获取对应首末端的零模行波实际波速代入改进的双端行波测 距方程实现故障定位。在PSCAD / EMTDC 中搭建500 kV 高压输电线路依频特性模型对所提方法进行仿真 验证,结果表明该方法基本不受故障位置和故障电阻的影响,具有较高的故障定位精度。 关键词:高压输电线路;波速量化;双端故障定位;传输时间差;零模行波

中图分类号:TM 75 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205027

#### 0 引言

高压输电线路故障会严重影响电力系统的安全 稳定运行,其中80%以上的故障为单相、两相接地 故障。为了保证及时、准确地定位和清除故障,实际 高压输电线路故障定位一般以双端法为主、单端法 为辅<sup>[1]</sup>。双端行波故障定位需要精确的波速,尤其 在传输距离长的高压输电线路,行波波头的衰减较 配电网线路更加显著,且微小的波速误差就可能导 致较大的故障定位误差<sup>[2]</sup>。

实际线路中,行波波速会随着传播过程衰减,这 一过程与线路参数以及行波的频率成分有关<sup>[3]</sup>。目 前大部分行波故障定位方法(例如文献[4]所提方 法)通常假设波速是接近光速的恒定数值,这一假设 所带来的误差在短距离线路的场景下是可以忽略 的,但是在高压输电线路场景下,由于高压输电线路 的传输距离较长,波速在传输过程中会发生衰减,这 使得行波的初始波速和到达首末端量测装置时的波 速出现了明显的差异,此时继续将波速视为恒定值 会导致较大的故障定位误差,给故障定位和清除工 作带来巨大的困扰。部分学者针对如何消除行波波 速的影响开展了研究,并提出了解决方法,但这些方 法大多是从定位公式出发,通过公式变换从数学计 算层面上消除波速变量(例如文献[5-7]所提方法), 没有从根本上考虑波速衰减特性的影响,虽然考虑 到了波速不恒定因素,但是依然以波速在传输路径 上恒定为前提条件进行计算。进而有学者对行波波

收稿日期:2021-07-10;修回日期:2022-03-25

在线出版日期:2022-04-08

基金项目:国家电网有限公司科技项目(J2021032);江苏省自 然科学基金面上项目(BK20201348)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(J2021032) and the General Program of the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20201348)

速在传输过程中的衰减特性进行了研究,并提出了 考虑波速衰减的方法,但是这些方法大多有一定的 局限性,例如:文献[8]研究了零模行波波速随故障 距离的变化规律,给出了零模行波波速与故障距离 的关系式,并以此进行故障定位,但是该方法在求解 波速时,因为故障距离不可知,需要进行迭代运算; 文献[9]利用故障距离与行波频率的关系以及行波 频率与零模波速度的关系构造迭代公式提取零模 波速,虽然可以得到较为精确的故障测距结果,但该 方法依然需要迭代运算来求解波速,计算量较大。

为了消除行波波速对高压输电线路单相、两相接地故障定位的影响,本文对500kV高压输电线路的解耦和行波传播特性进行讨论,研究行波波速衰减规律,量化零模行波传输时间差与零模行波波速的关系;考虑故障点两侧波速差异,提出基于零模行波波速量化的高压输电线路故障精确定位方法。利用PSCAD/EMTDC对所提方法进行仿真验证,结果表明该方法能够有效提升行波故障定位精度,且不易受过渡电阻的影响。

#### 1 故障行波的传播特性分析

对于传统单回线路,采用卡伦鲍厄相模变换即 可提取线路的零模信号,然而随着电力系统的飞速 发展,同杆双回输电线路以其走廊资源占用少、传输 效率高等优势,已广泛应用于我国500 kV及以上电 压等级高压电力系统中。高压输电线路在双回输 电线路情况下的电磁耦合作用更为明显,单回输电 线路的解耦方法不再适用<sup>[10-11]</sup>。为了对双回输电线 路进行故障分析,需要对双回输电线路进行解耦。

并列运行的同杆双回输电线路结构如图1所示,在分析过程中假设线路参数对称<sup>[12-13]</sup>,每回线的 自阻抗为 $Z_s$ 。图中: $Z_m$ 为相间互阻抗; $Z'_m$ 为线间互 阻抗; $U_N$ 、 $U_N$ 分别为线路首、末端电源电压。



166

Fig.1 Model of double circuit transmission line on same tower

对双回输电线路间的电气量进行解耦后,使用 卡伦鲍厄相模变换矩阵进行相模变换,从而得到解 耦电气时域量进行故障分析。将线间、相间解耦结 合得到的类卡伦鲍厄相模变换矩阵为<sup>[14]</sup>:

$$\boldsymbol{T}_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$
(1)

利用矩阵**T**<sub>1</sub>对同杆双回输电线路的电气量进行相模变换,从而得到解耦的模量进行故障分析。

线路发生故障后,故障行波在线路上以暂态过 程的形式传播。根据导线的电感、电阻、对地电容和 电导沿线的分布,可将线路看作是若干个π形链组 成的电路。在某一特定频率下,模量行波波速的表 达式为<sup>[15]</sup>:

$$v_{m}(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2} \left( \omega^{2} L_{m}(\omega) C_{m} - R_{m}(\omega) G_{m} + Z(\omega) \right)}} \quad (2)$$

式中:m=0表示零模行波,m=1和m=2表示线模行 波; $R_m(\omega)$ 与 $L_m(\omega)$ 分别为当角频率为 $\omega$ 时的线路电 阻与电感; $G_m$ 和 $C_m$ 分别为线路对地电导和线路对地 电容,频率对这2个参数的影响可以忽略不计,因此 将其视为常数。由式(2)可以看出,行波波速与频率 及线路参数有着紧密的联系,不同频率对应的零模 和线模行波的波速也不相同<sup>[16-17]</sup>,即零模和线模行 波的波速都会受到频率的影响而非恒定值。

故障行波信号中含有不同频率的信号,行波波 头的幅值可以看作各频率分量波头幅值的叠加求 和<sup>[17]</sup>,即:

$$A_{tw} = \sum_{i} e^{-\gamma(\omega_i)x} f_{\omega_i}(t)$$
(3)

$$f_{\omega_i}(t) = \frac{D}{\omega_i} \tag{4}$$

$$\gamma(\boldsymbol{\omega}_i) = \alpha(\boldsymbol{\omega}_i) + j\beta(\boldsymbol{\omega}_i) \tag{5}$$

式中:x为行波的传输距离; $\omega_i$ 为行波波头频率分量i对应的角频率; $A_{tw}$ 为行波波头幅值; $\gamma(\omega_i)$ 为频率分量i对应的特征算子;D为阶跃信号的幅值,由故障 点过渡电阻、系统电压和线路参数决定; $\alpha(\omega_i)$ 、  $\beta(\omega_i)$ 分别为衰减系数和相位系数,表征零模行波 在频率分量*i*下的衰减速度和相位速度,两者均随 着频率的升高而增大。由式(3)—(5)可知,随着传 播距离的增加,行波信号中各频率分量幅值的衰减 程度不同,频率越高的分量,幅值衰减得越严重。由 于零模行波和线模行波有着不同的传输路径,两者 的信号衰减情况不一:零模行波经大地传播形成回 路,线模行波经相与相之间传播形成回路,且大地阻 抗大于线路阻抗,所以零模行波的衰减更为明显。

当行波波头到达首末端检测装置时,由于频率 越高的分量速度越快,衰减也越快,波头中高频频段 信号首先到达,幅值衰减严重,行波最前端的最高频 信号由于幅值低于波头检测装置的阈值,无法触发 波头检测装置,所以触发首末端波头检测装置的频 率成分为传输速度稍慢的次高频行波分量的叠加。 不同故障位置产生的行波有不同的传输时间,由于 衰减特性,首末端检测到的频谱也不同,对应的波速 便不同,这就导致首末端实际采集得到的行波波速 是呈现衰减趋势的。

# 2 高压输电线路零模行波波速量化

零模行波由于在传输过程中首波头幅值衰减较快,波速随频率的变化也更明显,因此量化零模行波 波速的变化,进而应用到行波故障定位方法中,可以 有效提高故障定位的精确度。

为获取高压输电线路中故障零模电压行波的传播特性,基于实际高压架空输电线路参数,在仿真平台 PSCAD/EMTDC中搭建500kV同杆双回输电线路依频特性模型,如图2所示。线路型号为LGJ-300/40, 线路长度为300km。在距离线路首端150km处设 置单相接地故障,采样频率为1MHz,故障发生时刻 为0.08s,过渡电阻为50 $\Omega$ ,在故障点后每隔15km 设置1个行波信号测量点采集六相电压,共设置10 个测量点 $M_1 - M_{100}$ 



故障发生后,对不同位置的测量点采集的电压 信号进行解耦得到零模电压初始行波波形,见附录 A图A1。可以发现,由于行波高频分量衰减较快, 初始行波波形越来越光滑,符合前文的分析。

双端行波故障定位方法主要是利用行波首波头

到达线路首末端的时刻进行故障测距,线路的故障 位置不同,行波首波头到达线路两端的时间也不同。 以图2为例,设M为首端,N为末端,首、末端A、B处 配备量测设备,假设波头到达首端时刻为 $t_1$ ,到达线 路末端时刻为 $t_2$ ,定义首末端传输时间差 $\Delta t = t_1 - t_2$ 。

当故障发生在测量点 $M_1$ 时,其距离线路首端更 近,则故障行波将更快到达首端,此时有 $t_1 < t_2, \Delta t < 0$ ; 当故障发生在测量点 $M_0$ 时,其距离线路末端更近, 则故障行波将更快到达末端,此时有 $t_1 > t_2, \Delta t > 0$ 。 以上分析表明,故障位置距离首端越远, $\Delta t$ 越大。可 见,对于同一条线路而言,不同的 $\Delta t$ 对应不同的故 障位置。此外,故障位置与波速具有一定关系,可以 通过拟合的方法提取该关系用于故障定位<sup>[10]</sup>。则利 用传输时间差、故障位置、行波波速这三者之间的一 一对应关系,使用可以直接测量获得的 $\Delta t$ 代替未知 的故障位置,建立 $\Delta t$ 与行波波速的关系进行波速提 取,可以避免因故障距离未知而引入迭代运算。

基于图2所示的仿真模型,以5km为间隔依次设置故障点,采样频率设置为1MHz。采用db6小 波变换提取第1层小波细节系数,即行波中频段为 250~500kHz的波形信息,在此频段上零模行波波速 变化较大,变化趋势更明显<sup>[8]</sup>。利用小波模极大值 方法识别首末端行波波头计算波速。在PSCAD中 通过仿真分析零模行波波速 $v_0$ 与首末端传输时间差  $\Delta t$ 的变化关系,结果如图3所示。



由图3可见,故障发生后,v<sub>0</sub>随Δt的增加呈单调 减小的趋势。为精确刻画v<sub>0</sub>随Δt变化的函数关系, 在MATLAB中使用最小二乘法对仿真得到的散点 图进行拟合,为保证拟合效果,选取指数函数、一次 函数、二次函数以及三次函数进行拟合,拟合曲线见 附录A图A2,对应的拟合结果见附录A表A1。

考虑到计算的复杂度以及拟合结果的可靠性, 选用式(6)所示的三次函数拟合来描述 $v_0$ 随 $\Delta t$ 变化 的量化函数关系。

$$v_0 = -1.256 \times 10^7 (\Delta t)^3 + 3.501 \times 10^4 (\Delta t)^2 - 84.93 \Delta t + 2.832$$
(6)

需要注意的是,当线路发生故障时,Δt越大意味 着故障位置距离线路首端越远,相应地在图A2中对 应的v<sub>0</sub>越小,因此首、末端分别检测到的行波波头由于具有不同的传输路径和传输距离,其波速衰减程度并不一致,需要各自进行波速的确定。

当故障发生时,定义 $\Delta t_{AB}$ 、 $\Delta t_{BA}$ 分别表示以首、末端为基准的故障零模初始行波波头到达线路两端测量点所需的时间差,且 $\Delta t_{AB}$ =- $\Delta t_{BA}$ 。图4为 $v_0$ 随传输时间差变化的关系曲线,图中 $v_A$ 、 $v_B$ 分别为传输时间差 $\Delta t_{AB}$ 、 $\Delta t_{BA}$ 对应的首、末端零模行波波速,具体如式(7)所示。

$$\begin{cases} v_{A} = -1.256 \times 10^{7} (\Delta t_{AB})^{3} + 3.501 \times 10^{4} (\Delta t_{AB})^{2} - \\ 84.93\Delta t_{AB} + 2.832 \\ v_{B} = -1.256 \times 10^{7} (\Delta t_{BA})^{3} + 3.501 \times 10^{4} (\Delta t_{BA})^{2} - \\ 84.93\Delta t_{BA} + 2.832 \end{cases}$$
(7)



图 4 零模行波波速随传输时间差的变化关系曲线 Fig.4 Curve of zero-mode traveling wave velocity vs. transmission time difference

# 3 基于零模行波波速量化的双端故障定位 方法

依据上述零模行波波速量化关系和故障点两侧 波速选取方法,本文提出基于零模行波波速量化的 双端故障定位方法,即在输电线路首、末端的点A、B 处装设行波测量装置,当输电线路上发生故障(如附 录A图A3所示)时,故障行波沿输电线路传播,提取 线路原始电压信号,然后通过相模变换获得零模电 压行波信号,进一步通过小波变换提取零模行波首 波头到达首、末两端的时刻t<sub>A</sub>、t<sub>B</sub>。

传统双端行波故障定位方法的故障距离计算公 式为:

$$\begin{cases} \frac{l_A}{v} - \frac{l_B}{v} = t_A - t_B \\ l_A + l_B = L \end{cases}$$
(8)

式中:L为输电线路的长度;l<sub>A</sub>、l<sub>B</sub>分别为故障点到首、 末端测量点A、B的距离;v为选取的行波波速。可以 看出,波速是影响双端行波故障定位方法精度的重 要因素之一。为了提高输电线路故障定位的精度, 基于式(8)所示的故障定位公式,采用通过量化关系 获取的波头到两端测量点的不同波速进行故障位置 的求解。因此,将式(8)改写为:

$$\begin{cases} \frac{l_A}{v_A} - \frac{l_B}{v_B} = t_A - t_B \\ l_A + l_B = L \end{cases}$$
(9)

若令零模行波传输时间差 $\Delta t_{AB} = t_A - t_B$ ,则可将式

(9)改写为:

168

$$l_A = \frac{v_B \Delta t_{AB} + L}{v_A + v_B} v_A \tag{10}$$

故障发生后,计算得到相应传输时间差,根据拟 合得到的零模行波波速与传输时间差之间的函数曲 线,求取对应的首、末端零模行波波速,然后将其代 入式(10)即可进行故障定位。

综上所述,基于零模行波波速量化的双端故障 定位的具体步骤如下:

1)根据实际线路参数搭建输电线路模型,离线 拟合零模行波波速与传输时间差的函数曲线;

2)故障发生后,分别提取线路首端测量点A、末端测量点B的原始电压信号,然后依据线路的架设 方式采用不同方式对其进行解耦,获得零模电压行 波信号;

3)利用小波变换提取零模行波首波头到达首、 末两端的时刻t<sub>4</sub>、t<sub>B</sub>;

4)计算传输时间差 $\Delta t_{AB}$ 、 $\Delta t_{BA}$ ;

5)根据拟合曲线求取由故障点到达首、末两端 测量点的波速 v<sub>A</sub>、v<sub>B</sub>,将 v<sub>A</sub>、v<sub>B</sub>代入式(10)求解故障 位置。

需要注意的是,考虑到仿真与实际现场的差距, 在实际应用时步骤1)可以利用现场试验数据代替仿 真数据,以获取更为真实的数据,降低误差,具体实现 为:现场试验时,获取两侧波头到达时间差Δt,并计 算两侧波速v<sub>A</sub>、v<sub>B</sub>,将仿真获得的数据替换为现场试 验数据进行拟合,从而获得更真实的零模行波波速 随传输时间差变化的关系曲线,其他步骤保持不变。

#### 4 仿真验证

为了验证本文所提基于零模行波波速量化的双端 故障定位方法,以某市电网 500 kV RS 5237 / 5238 线(同杆双回输电线路)为例,在PSCAD / EMTDC 中搭 建输电线路分布参数模型,线路长度为105.4354 km。 设置距离线路首端 37 km 处发生单相接地故障,故 障发生时刻为 80 ms,过渡电阻为 50 Ω,仿真得到的 首末端电压信号经过小波变换后提取的零模电压波 形见附录A图 A4。

分别利用小波模极大值的方法获取首、末端波 头到达时间,计算得到相应的首末端传输时间差,将 数据代入零模行波波速随传输时间差的变化关系曲 线,得到*v<sub>A</sub>、v<sub>B</sub>*,将*v<sub>A</sub>、v<sub>B</sub>*代入式(10)求得故障发生在 距离首端 37.0336 km处,采用式(11)计算得到相对 定位误差为0.03%。

$$e_{\rm f} = \frac{\left|x_{\rm r} - x_{\rm f}\right|}{L} \times 100 \% \tag{11}$$

式中:*e*<sub>f</sub>为相对定位误差;*x*<sub>r</sub>为实际故障位置与首端的距离;*x*<sub>f</sub>为故障定位结果。

在线路不同位置处设置常见的单相接地故障、

两相接地故障进行仿真,过渡电阻设置为50Ω,仿 真结果如表1所示。由表可见,在线路不同位置发 生单相、两相接地故障时,本文所提方法都有较高的 故障定位精度。

#### 表1 不同故障位置下所提方法的故障定位结果

 
 Table 1
 Fault location results of proposed method under different fault locations

|      |             |             | ₽位:Km   |
|------|-------------|-------------|---------|
| 故障类型 | $x_{\rm r}$ | $x_{\rm f}$ | 定位误差绝对值 |
| 单相接地 | 5           | 4.9014      | 0.0986  |
| 单相接地 | 17          | 17.1298     | 0.1298  |
| 单相接地 | 45          | 45.0217     | 0.0217  |
| 单相接地 | 57          | 57.1984     | 0.1984  |
| 单相接地 | 65          | 65.1497     | 0.1497  |
| 单相接地 | 77          | 77.0884     | 0.0884  |
| 单相接地 | 85          | 84.8137     | 0.1863  |
| 两相接地 | 5           | 4.9155      | 0.0845  |
| 两相接地 | 17          | 16.8492     | 0.1508  |
| 两相接地 | 45          | 45.2365     | 0.2365  |
| 两相接地 | 57          | 57.2568     | 0.2568  |
| 两相接地 | 65          | 65.0403     | 0.0403  |
| 两相接地 | 77          | 76.8081     | 0.1919  |
| 两相接地 | 85          | 84.9392     | 0.0608  |

为了验证本文所提方法在故障定位精确度方面 的优势,将传统双端行波故障定位方法<sup>[18]</sup>(记为方法 1)与本文方法进行对比,其中方法1的线模行波波 速取为经验值2.96×10<sup>8</sup> m/s。在线路不同位置处 设置过渡电阻为50Ω的单相接地故障,故障发生时 刻为0.08 s,仿真时间为0.12 s,故障持续到仿真结 束,方法1和本文方法的故障定位结果如表2所示。

#### 表2 不同方法的故障定位结果比较

Table 2 Comparison of fault location results

|                | between | different metho  | ds<br>单位:km |
|----------------|---------|------------------|-------------|
| x <sub>r</sub> | 方法      | $x_{\mathrm{f}}$ | 定位误差绝对值     |
| 5              | 方法1     | 5.3577           | 0.3577      |
|                | 本文方法    | 4.9014           | 0.0986      |
| 25             | 方法1     | 25.5495          | 0.5495      |
|                | 本文方法    | 25.1897          | 0.1897      |
| 45             | 方法1     | 45.5177          | 0.5177      |
|                | 本文方法    | 45.0217          | 0.0217      |
| 65             | 方法1     | 64.4225          | 0.5775      |
|                | 本文方法    | 65.1497          | 0.1497      |
| 85             | 方法1     | 85.5737          | 0.5737      |
|                | 本文方法    | 84.8137          | 0.1863      |
| 95             | 方法1     | 95.8931          | 0.8931      |
|                | 本文方法    | 94.7907          | 0.2093      |

由表2可知,当输电线路的不同位置发生单相 接地故障后,本文所提方法的故障定位误差绝对值 均在0.3 km以内,精度高于传统双端行波故障定位 方法。

发生单相接地故障时,过渡电阻的大小也会影 响故障定位的准确度。为了验证过渡电阻对本文所 提方法的影响,在靠近线路首端和靠近线路末端处 分别设置过渡电阻为100、200、500Ω的A相接地故 障,对应的仿真结果如表3所示。

#### 表3 不同过渡电阻下所提方法的故障定位结果

 
 Table 3 Fault location results of proposed method under different transition resistances

| 过渡电阻/Ω | $x_{\rm r}$ / km | $x_{\rm f}$ / km | 定位误差绝对值 / km |
|--------|------------------|------------------|--------------|
| 100    | 10               | 10.2568          | 0.2568       |
| 100    | 90               | 89.7177          | 0.2823       |
| 200    | 10               | 10.2126          | 0.2126       |
|        | 90               | 89.6523          | 0.3477       |
| 500    | 10               | 9.8316           | 0.1684       |
|        | 90               | 89.7086          | 0.2914       |

由表3所示的仿真结果可知,当输电线路不同 位置发生单相接地故障后,在过渡电阻为100、200、 500 Ω的情况下,本文所提方法的故障定位精度都 较高,定位误差绝对值控制在了500 m以内。因此 本文所提方法对高压输电线路上不同过渡电阻的单 相接地故障均有一定的定位精度。

为验证本文所提方法在不同线路长度下的有效 性,分别将线路长度设置为100、150、200 km,在线 路不同位置设置过渡电阻为100Ω的单相接地故 障,得到仿真结果如表4所示。

表4 不同线路长度下所提方法的故障定位结果

|      |                |             | ₽1型:km  |
|------|----------------|-------------|---------|
| 线路长度 | x <sub>r</sub> | $x_{\rm f}$ | 定位误差绝对值 |
|      | 20             | 20.1247     | 0.1247  |
| 100  | 50             | 49.8763     | 0.1237  |
|      | 80             | 79.9062     | 0.0938  |
|      | 25             | 25.0868     | 0.0868  |
| 150  | 75             | 74.8612     | 0.1388  |
|      | 125            | 124.8992    | 0.1008  |
| 200  | 50             | 50.1268     | 0.1268  |
|      | 100            | 100.1121    | 0.1121  |
|      | 150            | 149.9117    | 0.0883  |

由表4可见,在不同线路长度下,本文所提方法 都适用且能保证一定的故障定位精度。

## 5 结论

本文分析了行波不同频率分量之间传输速度以 及幅值衰减的差异,得到输电线路行波波速变化趋势,并提出了基于零模行波波速量化的高压输电线 路双端故障定位方法,主要结论如下:

1)行波波速会随着传输过程衰减,当故障发生 时,由于故障点两侧故障距离以及行波传输路径的 不同会导致两侧的平均波速存在差异;

2)通过三次函数拟合的方法量化了传输时间差 与零模行波波速的关系,得到传输时间差与波速的 函数曲线,并提出了故障点两侧的波速选取方法;

3)基于故障点两侧行波波速差异和零模行波波 速量化关系提出改进的故障定位算法,和现有方法 相比,所提方法能够有效减小波速对单相、两相接地 故障定位的影响,显著提升了故障定位精度。

### 附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- 朱柏寒,陈羽,马金杰.基于波前陡度的输电线路单端行波故 障测距[J].电力系统自动化,2021,45(9):130-135.
   ZHU Baihan, CHEN Yu, MA Jinjie. Wavefront steepness based single-ended traveling wave fault location for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 130-135.
- [2]彭楠,王政,梁睿,等. 基于广域行波波头频率分量幅值比信息的输电网非同步故障定位[J]. 电力自动化设备,2019,39(4): 56-62.
   PENG Nan, WANG Zheng, LIANG Rui, et al. Asynchronous

fault location of transmission system based on wide area amplitude ratio information of frequency components in traveling wave fronts [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):56-62.

 [3]张韵琦,丛伟,张玉玺.基于初始电压行波频域衰减速率的 MMC-HVDC线路保护方案[J].电力自动化设备,2020,40(12): 143-152.
 ZHANG Yunqi, CONG Wei, ZHANG Yuxi. MMC-HVDC line protection scheme based on frequency-domain attenuation rate of initial voltage traveling wave[I] Electric Power Automa-

of initial voltage traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 143-152.
[4] 范新桥,朱永利,卢伟甫. 基于多点电流测量的输电线路行波

- 故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):39-45. FAN Xinqiao, ZHU Yongli, LU Weifu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11):39-45.
- [5]张峰,梁军,车仁飞,等.基于行波理论的先进故障测距系统实现算法[J].电力自动化设备,2012,32(8):54-59.
   ZHANG Feng,LIANG Jun,CHE Renfei,et al. Advanced algorithm of fault location system based on traveling wave theory
   [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):54-59.
- [6] 谢李为,李勇,罗隆福,等. 基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(21):7326-7338.
   XIE Liwei,LI Yong,LUO Longfu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(21):7326-7338.
- [7] 邓丰,祖亚瑞,黄懿非,等.基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2156-2168.
   DENG Feng, ZU Yarui, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform[J].
   Proceedings of the CSEE,2021,41(6):2156-2168.
- [8] 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,2015,43(8):88-93.
   LIU Zhenzhi,SHU Qin,HAN Xiaoyan, et al. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave[J]. Power System Protection and Control,2015, 43(8):88-93.
- [9] 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 Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):202-211.

- [10] GIL M,ABDOOS A A,SANAYE-PASAND M. A precise analytical method for fault location in double-circuit transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106568.
- [11] 高厚磊,刘益青,王兴国,等. 基于站域信息的同杆双回线接地 距离保护优化方案[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):49-56.
  GAO Houlei, LIU Yiqing, WANG Xingguo, et al. Optmization scheme of grounding distance protection based on substationarea information for double-circuit transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(3): 49-56.
- [12] 陈旭,朱永利,郭小红,等.同杆并架双回线双端非同步故障测 距算法[J].电力自动化设备,2016,36(5):87-90,101.
  CHEN Xu, ZHU Yongli, GUO Xiaohong, et al. Dual-terminal asynchronous fault location algorithm for two parallel overhead lines on same pole[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):87-90,101.
- [13] 王艳,郝良霞,徐玉琴. 特高压同塔双回线路故障测距算法
  [J]. 电力自动化设备,2016,36(4):7-13.
  WANG Yan, HAO Liangxia, XU Yuqin. Fault location algorithm for double-circuit UHV transmission lines on same tower
  [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):7-13.
- [14] 何奔腾,胡为进.同杆并架双回线路模变换分析[J]. 电网技术,1998,22(1):25-27,30.
  HE Benteng, HU Weijin. Mode transformation of double circuit line tower[J]. Power System Technology,1998,22(1):25-27,30.
- [15] 刘永浩,蔡泽祥,徐敏,等.基于波速优化与模量传输时间差的 直流线路单端行波测距新算法[J].电力自动化设备,2012,32 (10):72-76.

LIU Yonghao, CAI Zexiang, XU Min, et al. Single-end fault location algorithm based on traveling wave speed optimization and modal propagation time difference for DC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 72-76.

[16] 宁一,王大志,江雪晨,等.基于零模行波波速特性的配电网单 相接地故障测距方法[J].中国电机工程学报,2015,35(增刊 1):93-98.

NING Yi, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. A single phase-to-ground fault location scheme for distribution networks based on zero-mode traveling wave velocity property[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(Supplement 1):93-98.

- [17] PENG Nan, YE Kai, LIANG Rui, et al. Single-phase-to-earth faulty feeder detection in power distribution network based on amplitude ratio of zero-mode transients [J]. IEEE Access, 2019,7:117678-117691.
- [18] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等.现代行波故障测距原理及其在实测 故障分析中的应用:D型原理[J].继电器,2004,32(3):14-17,28.

CHEN Ping, GE Yaozhong, XU Bingyin, et al. Modern travelling wave-based fault location principle and its applications to actual fault analysis:type D principle[J]. Relay, 2004, 32 (3):14-17,28.

#### 作者简介:



王炜

王 炜(1977 —),男,高级工程师, 硕士,主要研究方向为电力系统自动化 (**E-mail**:15705130039@163.com);

王全金(1998—),男,硕士研究生,主 要研究方向为电力系统自动化(E-mail: wangquanjin@cumt.edu.cn);

*尹* 力(1988—),男,高级工程师, 硕士,主要研究方向为电力系统自动化 (**E-mail**:wyyl1988@126.com)。

(编辑 任思思)

# Two-terminal fault location method for high-voltage transmission line based on zero-mode traveling wave velocity quantization

WANG Wei<sup>1</sup>, WANG Quanjin<sup>2</sup>, YIN Li<sup>1</sup>, SUN Haixia<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>1</sup>, HOU Tianyu<sup>2</sup>, LIANG Rui<sup>2</sup>

(1. Lianyungang Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222004, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Combining with the frequency-dependent characteristics and attenuation characteristics of the zeromode component of the traveling wave, a two-terminal fault location method for high-voltage transmission line based on zero-mode traveling wave velocity quantization is proposed. The least squares method is used to fit the relationship between the zero-mode traveling wave velocity and the difference between the propagation time of faulty zero-mode traveling wave to reach the sending and receiving terminals. Based on the actual measurement of the transmission time difference of the traveling wave signal after the fault occurs, the actual wave velocity of the zero-mode traveling wave corresponding to the sending and receiving terminals is obtained, and it is substituted into the improved two-terminal traveling wave ranging equation to realize the fault location. A 500 kV high-voltage transmission line frequency-dependent characteristic model is built in PSCAD / EMTDC to verify the proposed method. The simulative results show that the proposed method is basically not affected by the fault location and fault resistance, and has high accuracy and reliability of fault location.

Key words: high voltage power transmission line; wave velocity quantization; two-terminal fault location; transmission time difference; zero-mode traveling wave



# 附录 A



Fig.A1 Initial traveling waveforms of zero-mode voltage at each measuring point



图 A2  $v_0$ 与 $\Delta t$ 的函数关系拟合曲线 Fig.A2 Fitting curve of function between  $v_0$  and  $\Delta t$ 表 A1  $v_0$ 与 $\Delta t$ 的函数关系拟合结果

Table A1 Fitting results of function between  $v_0$  and  $\Delta t$ 

| 函数类型  | 优度     | 标准差     |
|---|--------|---------|
| $v_0 = a e^{b\Delta t}$                               | 0.9490 | 0.01362 |
| $v_0 = a(\Delta t)^2 + b\Delta t + c$                 | 0.9856 | 0.00731 |
| $v_0 = a(\Delta t)^3 + b(\Delta t)^2 + c\Delta t + d$ | 0.9863 | 0.00699 |



图 A3 输电线路故障示意图

Fig.A3 Fault on transmission lines





Fig.A4 d<sub>1</sub> wavelet detail coefficients of zero-mode traveling waves at sending and receiving terminal