# 

徐铭铭 1,2,3 . 肖立业 1,2 . 林良真 1,2

(1. 中国科学院应用超导重点实验室 北京 100190 ; 2. 中国科学院电工研究所 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 零模行波在传播过程中发生衰减,且高频分量衰减快,低频分量衰减慢。随着故障距离的增加,零模行波波头中高频分量幅值与低频分量幅值的比值单调减小。本文提出利用测量点处零模行波首波头中不同频率分量的幅值比来判断故障点距离。由于暂态信号中特定频率的幅值难以直接求得,本文提出采用连续小波变换获得两个特定尺度下行波首波头信号小波系数的模极大值,求取其模极大值比。利用人工神经网络以确定该模极大值比和两个尺度对应的中心频率分量幅值比的对应关系,从而通过该网络求取任意故障距离时的频率分量幅值比。最终利用频率分量幅值比与故障距离之间的对应关系确定故障点位置。在电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 软件中搭建模型,仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 零模行波 衰减特性 连续小波变换 人工神经网络 故障测距中图分类号: TM315

# A Fault Location Method for the Single-phase-to-earth Fault in Distribution System Based on the Attenuation Characteristic of Zeromode Traveling Wave

Xu Mingming<sup>123</sup> , Xiao Liye<sup>12</sup> , Lin Liangzhen<sup>12</sup>

- (1. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190 China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190 China; 3. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China)
  - Abstract The zero-mode traveling wave attenuates when propagating along the cable or overhead line and the high-frequency components attenuate faster than the low-frequency components. Therefore, the ratio between the amplitudes of high-frequency component and low-frequency component decreases monotonously as the fault distance increases. A method of locating fault based on the calculation of the ratio of amplitudes of components at different frequencies is proposed in this paper. By calculating the wavelet modulus maxima of the travelling wave head at two different scales, the ratio of the wavelet modulus maxima at the two corresponding central frequencies can be obtained. After that, the ANN (Artifical Neural Networks) algorithm can be applied to establish the mapping relation between the ratio of wavelet modulus maxima at two frequencies and the ratio of amplitudes at the two frequencies. Then the ratio of amplitudes in any fault distances can be obtained. Finally, the fault distance can be calculated based on the ratio of the amplitudes of the components at the two different frequencies. Simulations based on EMTP-ATP verify the correctness of the algorithm.

**Keywords:** Zero-mode traveling wave, Attenuation Characteristic, continuous wavelet transformation, Artifical Neural Networks, fault location

# 1 引言

我国中低压配电网普遍采用中性点非有效接地的运行方式,这种系统发生单相接地故障后可以继续运行一段时间。但是为避免绝缘损坏导致事故扩大,应当尽快查找并排除故障 [1]。快速准确的查找并排除故障,对建设坚强、可靠的智能电网,保证整个系统的安全运行和经济运行有重要意义。

然而, 目前小电流接地系统的单相接地故障测 距问题仍然没有得到很好的解决。阻抗分析法[2]、 注入信号法[3-4]和行波法[5-10]是目前用于配电网单相 接地故障测距的主要方法。阻抗分析法是指通过测 量点测得的电压电流信息计算出故障回路阻抗参数, 进而确定故障点到测量点的距离。但是由于故障点 的过渡电阻不确定, 弧光接地时的电弧电阻更是剧 烈变化, 且配电网分支较多, 所以阻抗法效果并不 理想。注入信号法是由人工向故障回路注入特定信 号,通过检测该信号的消失点来找到故障点[3-4]。 该方法投入设备较多,需要高压电源对故障点重新 击穿; 另外还需要用手持的检测设备沿线检测信号, 自动化程度较低。行波法是利用线路故障时产生的 行波进行故障测距[5-10]。该方法不受负荷变化、接 地点过渡电阻和间歇性弧光接地的影响。行波法分 为单端法和双端法。单端法有三种原理: (a)利 用行波首波头及其在故障点处的反射波到达测量点 的时间差来实现测距[5-6]; (b) 利用行波特征频率 实现测距[7-8]; (c) 利用线模行波与零模行波速度 差的单端故障测距算法 [9]。其中原理 (a) 和原理 (c),依赖于对波头到达时间和波速的准确标定。 原理(b)依赖于对反射波头的准确识别,但由于配 电网分支点众多, 使波头的识别变的非常困难。双 端法利用故障点行波波头到达两端的时间差来实现 测距,该方法需要双端测量装置的精确同步[10]。 上述(a)(c)类单端法以及双端法均依赖于对行 波速度和行波波头到达时间的准确标定。然而,由 于故障点产生的暂态行波近似为具有连续频谱的阶 跃信号,其中的高频分量速度快,低频分量速度慢, 从而高频分量先达到测量点, 低频分量后达到测量 点,给波头到达时间的精确标定带来了困难[11-12]。 同时,由于行波各频率分量以不同的速度衰减,高 频分量衰减快, 低频分量衰减慢, 随着故障距离的 变化,行波波头中含有的频率成分不同,而不同的

频率分量对应着不同的波速,因此难以统一刻画波 头的波速<sup>[6][11-12]</sup>。以上称为行波的色散特性。

为解决上述问题,本文提出一种基于零模行波 波头衰减特性的交流配电网故障测距算法。故障点 处的初始行波波头可以被认为是一个阶跃信号,其 各频率分量的幅值比可由阶跃信号频谱图确定 [11]。如果行波传输中没有发生衰减,则检测点测量 得到的各频率分量的幅值比应和故障点处的幅值比 一致。当传输过程中发生衰减时,由于各频率分量 衰减速度不同,各频率分量的幅值比随传输距离发 生改变。该幅值比和故障距离形成对应关系,因此 可以通过计算测量点处各频率分量的幅值比来实现 故障测距。本文采用连续小波变换来实现各频率分 量的分解,并用小波模极大值来表征各频率分量的 强度。由于小波模极大值与该频率下的信号幅值存 在对应关系, 可以通过人工神经网络算法对两者的 关系进行训练, 并采用外推法由小波系数在特定尺 度对应频率下的模极大值比求得各频率分量下的幅 值比,利用测量点各频率分量的幅值比与故障距离 之间的对应关系来确定故障点位置。

# 2 测距原理

为实现三相线路参数的解耦,本文采用 Karenbuaer 变换实现相模变换,将三相系统分解为相互独立的 0 模、1 模及 2 模系统。相模电压变换过程为:

$$\begin{bmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}$$
 (1)

其它线路参数和变量有相同的变换形式。

其中零模系统由于反映大地集肤效应,其参数 随频率变化较明显,因此零模高频分量衰减明显, 衰减特征易于提取。零模分量方便检测,同时可以 避免负荷波动的影响,因此本文采用零模行波波头 实现故障测距。

在电力系统正常运行时,系统零模电压为零。 当发生单相接地故障时,在故障点处的零模电压将 发生突变,即相当于在故障点处注入了一个阶跃信 号[11],如图 1 中 0 km 处的波头波形。

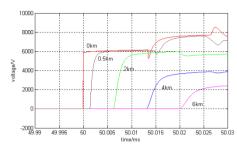


图 1 不同故障距离下零模行波波头形状

Fig.1 The zero-mode traveling wave head at different fault distance

单位阶跃信号的频谱为

$$A(\omega) = 2\pi\delta(\omega) + \frac{1}{i\omega}$$
 (2)

其中  $\delta(\omega)$  为冲击函数,只在零点处有值,当频率大于零时,幅频特性为:

$$|A(\omega)| = \frac{1}{\omega} \tag{3}$$

该阶跃信号沿输电线路向两侧传输,沿途发生衰减,其中高频分量衰减较快,低频分量衰减慢。传输距离越远,衰减越大,含有的高频分量越少;同时,由于高频分量速度快,低频分量速度慢,因此,高频分量先于低频分量到达测量点。上述特征在图 1 中表现为随着故障距离的增加,行波波头逐渐变的圆滑。

在检测点测量得到的波头即为各频率分量的叠加。文献[9]给出了测量点行波波头的表达式:

$$A = \sum_{i} e^{-x\gamma_i} f_i(t) \tag{4}$$

其中x为故障距离, $f_i(t)$ 为各频率分量在故障

点的初始幅值。  $\gamma_i$  为各频率分量的特征算子,表征 行波各频率分量的衰减速度和相位速度 [9]。

$$\gamma_i = \sqrt{(R_0 + j\omega_i L_0)(G_0 + j\omega_i C_0)} = \alpha_i + j\beta_i \qquad (5)$$

 $R_0$ ,  $L_0$ ,  $G_0$ ,  $C_0$  为频率  $\omega_i$  下的线路单位长度参数, $\alpha_i$  为其实部,决定幅值衰减速度。 $\beta_i$  为其虚部,决定行波的相位速度。 $\alpha_i$  的表达式如式(6)所示。

$$\alpha_{i} = \sqrt{\frac{1}{2} [R_{0}G_{0} - \omega_{i}^{2}L_{0}C_{0} + \sqrt{(L_{0}^{2} + \omega_{i}^{2}L_{0}^{2})(G_{0}^{2} + \omega_{i}^{2}C_{0}^{2})}]}$$
 (6)

由阶跃信号的频谱得到当频率大于零时,

$$f_i(t) = \frac{D}{\omega_i} \tag{7}$$

其中 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。

为方便表述,本文定义行波波头中任意两个频率分量幅值的比值为频率分量幅值比 R。则对于故障点处的阶跃形行波波头,其频率为  $\omega_p$ 的分量和频率为 $\omega_q$ 的分量的幅值比 R 为

$$R = \frac{|f_{p}(t)|}{|f_{q}(t)|} = \frac{\frac{D}{\omega_{p}}}{\frac{D}{\omega_{p}}} = \frac{\omega_{q}}{\omega_{p}}$$
(8)

对于检测点测量的零模行波波头,其频率  $\omega_{\rm p}$  和频率  $\omega_{\rm q}$  分量的幅值比  $R_{\rm pq}$  为

$$R_{pq} = \left| \frac{f_p(t) e^{-xr_p}}{f_q(t) e^{-xr_q}} \right| = \left( \frac{\omega_q}{\omega_p} \right) \left( \frac{e^{-\alpha_p}}{e^{-\alpha_q}} \right)^x \tag{9}$$

式中, $\gamma_p$ 和 $\gamma_q$ 分别为频率 $\omega_p$ 和频率 $\omega_q$ 下的特征算子, $\alpha_p$ 和 $\alpha_q$ 为其实部,可以由线路参数计算得到,也可以通过实验测得。由于幅值变化只和 $\gamma$ 中的实部 $\alpha$ 有关,因此消去了虚部。

由上式可得到测距公式为

$$x = \frac{\ln R_{pq} - \ln(\frac{\omega_q}{\omega_p})}{\alpha_p - \alpha_p}$$
 (10)

对于含有分支点的馈线,如图 2 所示,需要考虑波头传播过程中在分支点的折射现象。

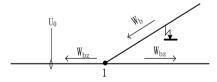


图 2 分支点处故障行波的折射

Fig.2 The refraction of traveling wave at branch point 故障行波  $W_b$  在分支点 1 处发生折射,设馈线 零模波阻抗为  $Z_0$ ,则折射系数为:

$$k = \frac{2 \times \frac{Z_0}{2}}{\frac{Z_0}{2} + Z_0} = \frac{2}{3}$$
 (11)

因此式(4)变为

$$A = \sum_{i} \frac{2}{3} e^{-x\gamma_i} f_i(t)$$
 (12)

式 (9) 变为

$$R_{pq} = \frac{\frac{2}{3} f_{p}(t) e^{-xa_{p}}}{\frac{2}{3} f_{q}(t) e^{-xa_{q}}} = (\frac{w_{q}}{w_{p}}) (\frac{e^{-a_{p}}}{e^{-a_{q}}})^{x}$$
(13)

折射系数  $\frac{2}{3}$  被消掉,因此,测距公式 (10) 不变。可以证明,如果分支处有 N 个分支,则折射系数为  $\frac{2}{N}$  ,该系数在式 (13) 中均会被消除。

之所以这样,本质上是因为各频率分量的衰减 速度只和线路单位长度参数有关,而分支点两侧的 线路参数一致,因此各分量的衰减情况和单一线路 上的情况一样。

因此,不管馈线中有无分支点,测距公式 (10)均成立。计算出距离后,还需要确定故障分 支。文献[14]给出了两种比较方便的行波选线方法, 可以直接应用,配合本算法测得的故障距离,即可 确定故障点。

测距公式(10)中, $R_{pq}$ 可以通过测量行波首波头两个特定频率分量的幅值计算得到。因此,理论上,可以通过式(10)计算得到故障距离。

然而, 测量暂态信号中不同频率分量的幅值并 不容易。目前的时频分析方法尚无法精确提取出短 时非平稳信号中各频率点的幅值。由小波分析理论 可知,不同尺度下的连续小波变换可以将信号分解 到若干个频率段上,这些频率段以其尺度对应的频 率为中心频率, 当变换的尺度较大时, 这些频率段 的宽度就变窄,逼近中心频率,该尺度下的模极大 值就可以近似的表征该频率段中心频率的信号强度, 因此可以间接反应信号在该频率点上的幅值, 两者 之间存在对应关系。因此可以采用数值拟合或者人 工神经网络算法来寻找这种对应关系。本文采用 3层 BP 神经网络。通过 ATP-EMTP 仿真软件搭建 配电网仿真模型,采用 JMarti 频率相关模型,设置 不同故障距离进行仿真。将仿真得到的电压波形进 行相模变换, 截取故障发生后首个行波波头进行较 大尺度的连续小波分析,提取以频率  $\omega_n$ 和频率  $\omega_{q}$ 为中心频率的尺度下小波分解系数模极大值,分 别记为  $M_p$ 和  $M_q$ 。模极大值比  $NR_{pq}=M_p/M_q$  。不妨 设频率  $\omega_p$  大于频率  $\omega_q$ ,则由于频率为  $\omega_p$  的分量的 衰减速度大于频率为 $\omega_q$ 的分量,可以判断模极大值 比 NRpq 和频率分量幅值比 Rpq 均随故障距离增加而 单调下降。因此  $NR_{pq}$ 与式(10)中  $R_{pq}$ 存在对应关 系。将不同故障距离下的 NRpq 作为神经网络的输 入,由式(10)计算得到的  $R_{pq}$  作为输出,对人工

神经网络进行训练,从而得到  $NR_{pq}$ 与  $R_{pq}$ 的对应关系。故障发生后,将实际测量得到的  $NR_{pq}$ 送入该人工神经网络得到对应的  $R_{pq}$ ,并由式(10)计算故障距离。整个算法的流程图如图 3 所示。

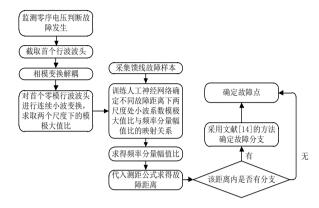


图 3 测距算法流程图

Fig.3 The flow chart of fault location

# 3 算法实现

#### 3.1 零模行波首波头的测量

式(4)表达的是行波波头的频率分量及波头幅值的关系,该行波波头是由故障点向母线传播的反向行波,而在线路始端处测量得到的零序电压为该反向行波及其在母线处反射的正向行波的叠加。

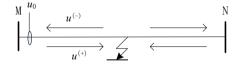


图 4 行波传播示意图

Fig.4 The propagation of traveling wave

即:

$$u_0 = u^{(-)} + u^{(+)} \tag{14}$$

按照反向行波公式计算公式 (15),需要由零模电压电流和线路波阻抗求得初始的反向行波电压。

$$u^{(-)} = \frac{1}{2} (u_0 - Z_c i_0)$$
 (15)

式中, $u_0$ , $i_0$ 为 M 端零序电压和零序电流, $Z_c$ 为线路零模波阻抗。但是由于零模波阻抗  $Z_c$ 随频率发生改变,而行波波头中含有连续频谱的分量,因此式中  $Z_c$ 难以确定,式(15)无法应用。为解决这个问题,可以将测量点设置在线路中点。如图 5 所

示,由于测量点两侧波阻抗连续,由故障点传来的首个反向行波不会发生反射,因此在测量点测得的零序电压即为故障点向母线 M 传播的首个反向行波,可以通过零序电压互感器直接测量得到。相关文献证明了基于电光效应的光电传感器能有效传变高频暂态电压信号的波形 [13]。通过行波方向可以判断故障点是在左半边还是在右半边,进而在半个线路长度上测距。对于采样得到的波头可以就地处理,得到故障距离后可将结果通过 GPRS 无线通信系统上报。

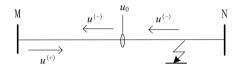


图 5 行波传播示意图

Fig.5 The propagation of traveling wave

如果馈线上含有分支点,利用文献 [14]的选线方法,需要在每个分支点处都增加测量装置,但该方法是对行波信号就地进行比较,不需要远程通信,易于实现。

# 3.2 $\omega_{\rm p}$ 与 $\omega_{\rm q}$ 的选择

该算法需要计算行波波头信号两个特定频率分量 $\omega_p$ 与 $\omega_q$ 的幅值比。由测距公式(10)可知,为提高幅值  $R_{pq}$ 比对故障距离 x 变化的灵敏度,需要这两个频率点处的衰减系数  $\alpha_p$ 和 $\alpha_q$ 相差尽量大,理论上两个频率点相差越大,二者的衰减系数相差越大。同时,如果两个频率相差过大,即小波变换的尺度相差过大,会造成对应的两个尺度下信号的频宽相差较大,不利于对两个频段中心频率 $\omega_p$ 与 $\omega_q$ 的模值做比较。相关文献给出了行波衰减系数 $\alpha$ 与频率 $\omega$ 的关系,如图 6 所示[15]。

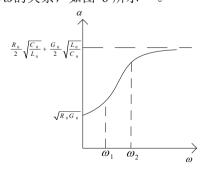


图 6 行波衰减系数的频率特性图

Fig.6 The relationship between the decay coefficient and frequency

因此, $\omega_p$ 与 $\omega_q$ 应该选在图 6 中曲线较陡的部分,例如 $\omega_1$ 与 $\omega_2$ 之间。

#### 3.3 人工神经网络算法

本文采用三层 BP 人工神经网络算法,学习速度为 0.01,最大训练次数为  $5\,000$ ,目标函数误差为  $0.000\,01$ 。通过 ATP-EMTP 仿真软件搭建配电网仿真模型,设置不同故障点得到样本送入人工神经网络训练。对于参数和结构不同的线路,  $NR_{pq}$ 与  $R_{pq}$ 之间的对应关系也不一样。因此对于参数不同的线路,需要对神经网络进行单独训练。由于实践中无法完全用现场数据来进行训练,所以可以采用 ATP-EMTP 仿真软件对目标线路进行仿真,得到训练样本,然后在现场实测少量样本,用于对训练样本进行修正,将修正后的样本送入神经网络进行训练。

# 3.4 算法实现时间

该方法的前期准备工作主要是利用样本数据建立线路的 NR<sub>pq</sub>与 R<sub>pq</sub>之间的对应关系。这一过程是离线完成的,所以不影响故障发生后的定位速度。发生故障后,需要截取故障录波装置记录的首个波头,求取行波波头在特定的两个尺度下的模极大值比,由上述对应关系得到频率分量幅值比,进而求得故障距离。这一过程中只有小波分解计算过程较为复杂,其计算时间主要取决于小波分解的数据长度。由于行波波头时间短,故需要的数据长度也较短,小波分解计算耗时甚少。在笔者的计算机(CPU 主频 3.2GHz,内存 3GB)上进行仿真时,上述定位计算过程能够瞬时完成。

# 4 仿真算例

在 ATP-EMTP 仿真软件中搭建如图 7 所示的配电网 10kV 馈线系统,假设各馈线长度均为10km,变压器中点不接地,馈线结构为水平布置的三相架空线路,在 ATP 中设置杆塔处距离地面10 米,两杆塔中点处线路下垂至距离地面8 米。线路直流电阻为 0.069Ω/km,大地电阻率为100Ω•m。

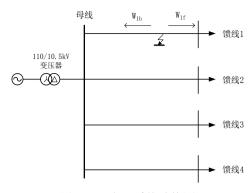


图 7 配电网系统结构图

Fig.7 Structural diagram of distribution system

由于故障选线方法较为成熟,本文不再赘述, 直接假定已经确定故障发生在馈线 1上,继而采用 本文的算法实现故障测距。在线路中点处设置零序 电压互感器,采样频率为 1MHz,则波头信号频谱 的最高频率为 0.5MHz。采用 db3 小波对首个波头 做多个尺度下的连续小波变换, 取中心频率点分别 为  $f_p$ =62500Hz,  $f_q$ =31250Hz 的两个尺度下的小波系 数模极大值。 由 ATP 中的 line constant 模块计算 得到线路在这两个频率下的零模参数  $R_0,L_0,C_0,G_0$ , 进而由式(6)计算得到这两个频率下行波的衰减 系数  $\alpha_p$ =0.012 3 和  $\alpha_q$ =0.006 6。随机选择 10 个故障 点,分别测量得到其 NRpg,作为输入;分别通过式 (10) 计算得到其  $R_{pq}$ , 作为输出; 由此形成 10组 样本,其中7个作为训练样本,3个作为测试样本, 利用 matlab 中的神经网络工具箱实现目标网络的训 练。

对于任意故障点处的故障,通过检测计算其  $NR_{pq}$ ,利用上述神经网络对  $R_{pq}$ 进行估算,并由式 (10)完成测距。设测量点位置为坐标原点,左侧 距离为负,右侧距离为正,接地点过渡电阻为零,故障时相位角为  $90^{\circ}$ 。测距结果如表 1 所示。

表 1 故障测距结果

Tab.1 The results of fault location

| 故障距离/km | 计算距离/km | 误差/km  |
|---------|---------|--------|
| -3.7    | -3.554  | -0.146 |
| -1.8    | -1.883  | +0.083 |
| 3.8     | 3.897   | +0.097 |
| 2.6     | 2.410   | -0.19  |

结果表明该算法能较准确地给出故障点位置。 由于接地点的过渡电阻只影响行波初始波头的 幅值,不影响各频率行波分量的衰减速度,因此理 论上过渡电阻不影响测距结果。表 2 给出了 2.6km 处过渡电阻分别为 10Ω,50Ω 和 100Ω 时的 测距结果。

#### 表 2 不同过渡电阻时的故障定位结果

Tab.2 The results of fault location with different fault resistance

|  | 过渡电阻/Ω | 计算距离/km | 误差/km  | _ |
|--|--------|---------|--------|---|
|  | 10     | 2.474   | -0.126 |   |
|  | 50     | 2.446   | -0.154 |   |
|  | 100    | 2.723   | +0.123 |   |

表 2 表明,过渡电阻值的变化并没有明显改变定位精度。

同理,故障初相角只影响故障初始电压的幅值,即行波初始波头的幅值,但是不影响行波各频率分量的衰减速度。由式 (7) 可知在计算幅值比时,初始波头幅值 D已被消除。只有在故障初相角为零时,行波波头幅值为零,会导致算法失效,但是故障一般都发生在初相角较大时,初相角为零的情况可以忽略。

由于该方法只用到了零模暂态行波首波头的衰减特性,即只和线路本身的参数有关,其他因素,例如故障初相角、中性点接地方式、电弧接地故障等,均不对定位精度造成影响。

# 5 误差分析

上述仿真算例表明定位方法有效,但是定位精度有待提高。本节分析误差来源并提出相应对策。

#### 5.1 采样率的影响

采样率越高,波头特征越完整,对高频分量的 刻画越准确,可以提高定位精度。

#### 5.2 频率点选择的影响

连续小波变换系数的模极大值表征的是以某频率为中心频率,以该频率对应尺度下的小波频宽为频宽的特定频率段内的信号能量。如果该算法中选择的两个频率相差较大,即其对应尺度和对应小波频宽相差较大,则两个频率对应尺度下的小波模极大值表征了两个频宽相差较大的频率段的信号强度,导致选定频率点处的幅值比与小波模极大值的比之间的对应关系减弱。同时,较大的尺度对应的频宽较窄。因此,尽可能的使两个频率点的尺度相近,且尽可能地选择较大尺度对应的中心频率,有利于提高定位精度。

#### 5.3 神经网络样本容量的影响

在人工神经网络算法中,样本越大,对网络的 训练越有效,但同时会增大计算量。在计算量允许

的情况下,尽可能的增大样本容量,可以提高定位 精度。

## 5.4 改进后的定位结果

根据上述分析,将采样频率提高至 10MHz,两个频率点选为两个相近尺度对应的中心频率,神经网络训练样本容量增大至 20个,其中训练样本16个,测试样本4个,在不同点设置故障,测距结果如表3所示,定位精度明显提高,最大误差在50米左右。

表 3 改进后的定位结果

Tab.3 The results of fault location after improvement

| 故障距离/km | 计算距离/km | 误差/km  |
|---------|---------|--------|
| -3.9    | -3.879  | -0.021 |
| -1.8    | -1.749  | -0.051 |
| 3.6     | 3.633   | -0.033 |
| 2.9     | 2.846   | 0.054  |

相比于其它方法,该方法有以下几个优点:

- (1) 利用行波波头中不同频率分量衰减速度不同的特性,无需测量行波速度和波头到达时间。
- (2) 只从故障行波的首波头提取故障特征,采样数据短,且无需在后续波头中辨识反射波波头。
- (3)该方法不受过渡电阻、中性点接地方式、 间歇性故障、故障初相角、网络拓扑等因素的影响, 适用范围广。

## 6 结论

本文的创新点在于避开传统行波测距方法对行波速度和波头到达时间的依赖,利用行波波头中各频率分量幅值比与故障距离的对应关系来实现故障测距。为实现该思路,提出了频率分量幅值比的概念,推导得出频率分量幅值比与故障距离的关系式。为确定频率分量幅值比,本文采用人工神经网络算法得到各频率下测得的小波模极大值比和频率分量幅值比的对应关系,然后用该网络来得出任意故障距离处的频率分量幅值比。通过 ATP-EMTP 仿真,验证了上述方法的有效性。但是 ,该方法只适用于单独采用架空线或电缆的配电线路,今后将对架空线-电缆混合系统的故障定位方法做进一步研究。

#### 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 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.
- [2] Jia K, Thomas D, Sumner M. Impedance-based earth fault location for a non-directly grounded distribution systems[J]. IET Generation, transmission & distribution, 2012, 6(12): 1272-1280.
- [3] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和 "S"信号注入 法的配电网接地故障定位技术的研究 [J]. 电力系统 保护与控制, 2010, 38(12): 73-76. Du Gang, Liu Xun, Su Gaofeng. Research on technology of grounding fault location combining FTU and "S" signal injecting method in distributiom

grid[J]. Power System Protection and Control, 2010,

[4] 张慧芬,张帆,潘贞存.基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位算法 [J]. 电力自动化设备,2008,28(6): 39-43.

Zhang Huifen, Zhang Fan, Pan Zhencun. Automatic fault locating algorithm based on signal injection method for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 39-43.

38(12): 73-76.

- [5] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59. Ma Dandan, Wang Xiaoru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [6] 東洪春,田鑫萃,董俊,等.利用故障特征频带和 TT 变换的电缆单端行波测距 [J]. 中国电机工程学 报, 2013, 33(22): 103-112. Shu Hongchun, Tian Xincui, Dong Jun, et al. A single terminal cable fault location method based on fault characteristic frequency band and TT transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 103-112.
- [7] Borghetti A, Bosetti M, Nucci, C A, et al. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 25(4): 3139-3146
- [8] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波 测距新方法[J]. 电力系统保护与控制. 2013, 41(15):

7-13.

Liang Rui, Jin Zheng, Liu Jianhua. A new single-ended traveling waves fault location method based on characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 7-13.

- [9] 张帆,潘贞存,马琳林,等.基于模量行波传输时间 差的线路接地故障测距与保护 [J].中国电机工程学报,2009,29(10):78-83.
  - Zhang Fan, Pan Zhencun, Ma Linlin et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J] Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 78-83.
- [10] 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 traveling wave principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 88-91.
- [11] 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
- [12] 王珺、董新洲、施慎行、考虑参数依频变化特性的

辐射状架空配电线路行波传播研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 96-102.

Wang Jun, Dong Xinzhou, Shi Shenxing. Traveling wave transmission research for overhead lines of radial distribution power systems considering frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 96-102.

[13] 杨庆,董恒,陈少卿,等.基于一次电光效应的非接触式过电压监测传感器 [J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 140-145.

Yang Qing, Dong Heng, Chen Shaoqing et al. Non-contact overvoltage monitoring sensor based on electro-optic effect[J]. High voltage engineering, 2015, 41(1): 140-145

[14] 张帆,潘贞存,张慧芬,等.基于方向行波的小电流接地系统故障选线 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 70-75.

Zhang Fan, Pan Zhencun, Zhang Huifen et al. Fault line Selection in non-solidly earthed network based on direction traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE. 2007, 27(34): 70-75.

[15] 邱关源. 电路(第五版)[M]. 北京: 高等教育出版 社,2006.

作者简介: 徐铭铭 男, 1985 年生, 博士研究生, 研究方向为智能配电网故障定位。 肖立业 男, 1966 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为电工理论与新技术。