基于对称注入法反射波特征提取的配电网故障测距算法

任 琴[1]，舒 勤[1]，刘 勇[2]

(1.四川大学电气信息学院，四川 成都 610065；2.国网四川省电力公司阿坝供电公司，四川 阿坝州 623200)

摘要：针对架空线配电网单相接地故障测距问题，分析了故障点反射波信号和线路行波传输特性，提出了一种向故障线路三相对称注入高压脉冲获取故障特征波的方法。采用母线端首次检测到故障点零模反射波的时间和波前特征参数，作为 BP 神经网络的输入变量，建立故障测距模型。在提取零模反射波到达时间和波前特征参数时，对行波数据进行小数定标规范化和极值归一化处理，以消除故障距离以外因素对神经网络输入变量的影响。最后采用 PSCAD 仿真和 Matlab 编程运行，结果表明该方法不受故障分支、接地电阻影响，可有效测定故障距离。

关键词：配电网；对称注入法；零模反射波；神经网络；故障测距

A fault location algorithm for distribution network based on extracting features from the reflected wave of symmetrical injection method

REN Qin[1], SHU Qin[1], LIU Yong[2]

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Aba Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Aba 623200, China)

Abstract: According to the analysis on the reflected wave at the single-phase-to-ground fault point and traveling-wave transmission characteristics of lines in overhead-line distribution network, the method that symmetrical high-voltage pulse is injected into three phases is proposed to acquire the zero-mode waves. Then the time of zero-mode reflected waves reaching the bus bar and the characteristic parameters of wavefront are used as input variables of BP neural network location model of single-phase ground fault. Before extracting the arrival time of the fault zero-mode reflected waves and the waves' characteristic parameters, this paper respectively adopts the fractional scaling standardization and normalization of extremum to eliminate the influence of the factors except fault distance on the neural network input vector. PSCAD simulation and Matlab programming operation is used, the results show that the method is not affected by branch lines and grounding resistance, which can effectively measure the fault distance.

Key words: distribution network; symmetrical injection method; zero-mode reflected waves; ANN; fault location

中图分类号： TM711 文章编号： 1674-3415(2015)24-0019-07

0 引言

单相接地故障是配电网的主要故障类型，占线路总故障的比例很高，对配电网的安全可靠运行具有重要影响[1-6]。我国中低压配电网普遍采用小电流接地、闭环设计、开环运行的树形辐射状结构，运行环境复杂，接地电阻范围大，因此对测距方法适用性要求较高[7]。注入法是在故障发生后通过向线路注入某种信号来定位故障点的方法，依据注入信号的不同又可分为多种方法[8]。其中，C 型注入法是在故障发生后由装置发射高压高频或直流脉冲信号，根据高频脉冲从装置至故障点往返时间进行定位，具有信号强度高和可行性好的优点。配电网由于带有分支，分支点、负荷端的反射波与故障点的反射波叠加，单相注入法难以甄别故障点反射波。在故障发生前后分别向故障相注入相同信号求两次检测信号差与在故障发生后同时向故障相和非故障相注入相同信号再求两相检测信号差两种获取故障特征波的方法都无法消除线路耦合。本文提出在故障发生后从母线端三相对称(即三相之和为零，亦即零模为零)注入高压脉冲并采集零模电压作为故障特征波的方法，母线端检测到的首个零模脉冲即故

基金项目：四川省科技支撑计划项目(2014GZ0083，20140010)

障点反射波，该方法不受分支和耦合的影响。

由于线路存在分布参数，而线路的行波传输特性与分布参数和行波频率密切相关，行波在传输过程中波形特征发生改变，零模波速度随频率变化而变化，仅依靠传输时间与速度相乘获得故障距离的方法误差较大。因此，结合故障行波的特征参数进行测距能增强测距的准确性和可靠性。文献[9]通过提取零模与线模行波的传输时间差以及零模波头的Lipschitz指数进行测距。文献[10]通过傅里叶变换提取故障后四分之一工频周期时窗内暂态零序电压的自然频率作为ANN模型的输入样本，进行故障测距。接地电阻对暂态行波的频率影响很大，因此该方法的局限性在于测距适用的接地电阻范围有限。本文提出的方法充分考虑了接地电阻对特征参数的影响，在提取参数时采用了小数定标规范化和极值归一化处理，很好地消除了接地电阻、故障相注入信号强度、行波传输过程折射衰减次数不同对测距结果造成的影响。

分析行波的传输规律，发现故障点零模反射脉冲的传输时间及波前特征参数与故障距离之间存在复杂非线性映射关系，这种关系难以用公式解析表达。神经网络的输入与输出之间是一种高度非线性映射关系，可用于任何复杂非线性函数逼近[11]。本文将母线端采集到的零模电压进行预处理后，提取故障点的零模反射脉冲传输时间及波前特征参数，利用神经网络强大的非线性映射能力进行故障距离预测。

1 故障点行波分析

配电网中，各相线路之间存在电磁耦合，采用凯伦鲍尔(Karrenbauer)相模变换可将三相解耦为独立的零模和线模分量[12]。本文采用离线方式从母线端向单相接地故障线路三相对称注入高压脉冲信号，线路正常时，三相平衡零模为零，母线端采集不到零模信号。单相接地故障为非对称故障，当线路发生非对称接地故障时，相模变换矩阵只能将线路部分解耦，而不能同时将故障点解耦，即各个模量行波在线路上是独立的，在故障点不同模量行波将会发生交叉透射[13-14]。交叉透射使得故障点折反射波零模不为零，零模反射波传向母线端，零模折射波沿原方向传播遇到波阻抗不连续点反射后再传回母线端，因此在母线端检测到的首个零模脉冲为故障点反射信号。以下是单相接地故障首个反射脉冲模量的计算。

凯伦鲍尔正反变换矩阵分别为

$$\boldsymbol{P}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -1 & 0\\ 1 & 0 & -1\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{P}^{-1}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -2 & 0\\ 1 & 0 & -2\end{bmatrix} \tag{1}$$

设线路特征阻抗矩阵为

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}Z_s & Z_m & Z_m\\ Z_m & Z_s & Z_m\\ Z_m & Z_m & Z_s\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，Z_s、Z_m分别为自波阻抗和互波阻抗。用相模变换矩阵对$\boldsymbol{Z}$进行相模变换可使其对角化得到模波阻抗。令Z_0、Z_1、Z_2分别表示线路 0、1、2 模波阻抗，则有

$$\boldsymbol{PZP}^{-1}=\operatorname{diag}\begin{bmatrix}Z_0 & Z_1 & Z_2\end{bmatrix} \tag{3}$$

解矩阵方程(3)可得

$$\begin{cases}Z_s=\left(Z_0+Z_1+Z_2\right)/3\\ Z_m=\left(Z_0-Z_1\right)/3\end{cases} \tag{4}$$

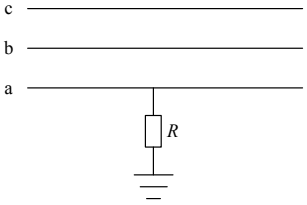


图 1 单相接地故障示意图

Fig. 1 Schematic of single-phase-to-ground fault

图 1 为 a 相过渡电阻为 R 的单相接地故障示意图，用字母 i、o 和 r 分别表示入射、折射和反射量，令故障点入射波电压为$\boldsymbol{U}_{\mathrm{i}}=\begin{bmatrix}u_{\mathrm{ia}} & u_{\mathrm{ib}} & u_{\mathrm{ic}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，入射电流为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{i}}=\begin{bmatrix}i_{\mathrm{ia}} & i_{\mathrm{ib}} & i_{\mathrm{ic}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$；折射电压为$\boldsymbol{U}_{\mathrm{o}}=\begin{bmatrix}u_{\mathrm{oa}} & u_{\mathrm{ob}} & u_{\mathrm{oc}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，折射电流为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{o}}=\begin{bmatrix}i_{\mathrm{oa}} & i_{\mathrm{ob}} & i_{\mathrm{oc}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$；反射电压为$\boldsymbol{U}_{\mathrm{r}}=\begin{bmatrix}u_{\mathrm{ra}} & u_{\mathrm{rb}} & u_{\mathrm{rc}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，反射电流为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}=\begin{bmatrix}i_{\mathrm{ra}} & i_{\mathrm{rb}} & i_{\mathrm{rc}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$；故障电流为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{f}}=\begin{bmatrix}i_{\mathrm{fa}} & 0 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，根据故障点只有一个电压电流的原则有：

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{i}}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{r}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{o}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{i}}+\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{o}}+\boldsymbol{I}_{\mathrm{f}} \tag{6}$$

根据行波正反向传播电压电流关系有[15]

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}_{\mathrm{i}}=\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}_{\mathrm{i}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{r}}=-\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{o}}=\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}_{\mathrm{o}}\end{cases} \tag{7}$$

可知式(6)等号左右同时乘以$\boldsymbol{Z}$可化为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{i}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{r}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{o}}+\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}_{\mathrm{f}} \tag{8}$$

由式(5)、式(8)可得

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{r}}=-\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}_{\mathrm{f}}/2 \tag{9}$$

故障相有：

$$u_{\mathrm{oa}} = i_{\mathrm{fa}} R \tag{10}$$

联立式(10)和矩阵式方程式(5)、式(9)解得：

$$\begin{cases} u_{\mathrm{ra}} = -Z_s u_{\mathrm{ia}} \big/ \left(Z_s + 2R\right) \\ u_{\mathrm{rb}} = -Z_m u_{\mathrm{ia}} \big/ \left(Z_s + 2R\right) \\ u_{\mathrm{rc}} = -Z_m u_{\mathrm{ia}} \big/ \left(Z_s + 2R\right) \end{cases} \tag{11}$$

由式(1)、式(5)、式(11)可得：

$$\begin{cases} u_{\mathrm{r0}} = -Z_0 u_{\mathrm{ia}} \big/ \left(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 6R\right) \\ u_{\mathrm{r1}} = -Z_1 u_{\mathrm{ia}} \big/ \left(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 6R\right) \\ u_{\mathrm{r2}} = -Z_2 u_{\mathrm{ia}} \big/ \left(Z_0 + Z_1 + Z_2 + 6R\right) \end{cases} \tag{12}$$

由此可见，三相对称注入信号只要故障相注入信号不为零，则故障点的首个零模反射脉冲信号不为零。故障相注入信号的强度及过渡电阻决定了零模反射脉冲的幅值大小。

2　行波特征参数与故障距离关系分析

2.1 线路行波传输特性分析

线路行波传输特性由分布参数决定。令线路分布电阻、电感、电导和电容分别为 R_0、L_0、G_0 和 C_0，图 2 为一小段线路分布参数等效示意图。

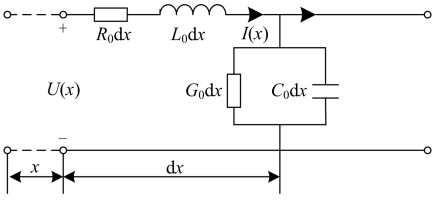


图 2 小段线路等效示意图

Fig. 2 Equivalent diagram of cantlet circuit

图 2 中，$U(x)$、$I(x)$分别为电压、电流向量，只与 x 有关。分析可得线路的频域传播方程为

$$\begin{cases} -\dfrac{\mathrm{d}U(x)}{\mathrm{d}x} = \left(R_0 + \mathrm{j}\omega L_0\right) I(x) \\ -\dfrac{\mathrm{d}I(x)}{\mathrm{d}x} = \left(G_0 + \mathrm{j}\omega C_0\right) U(x) \end{cases} \tag{13}$$

解式(13)得

$$U(x) = A_1 \mathrm{e}^{-\gamma x} + A_2 \mathrm{e}^{\gamma x} \tag{14}$$

其中：

$$\gamma = \sqrt{\left(R_0 + \mathrm{j}\omega L_0\right)\left(G_0 + \mathrm{j}\omega C_0\right)} = \beta + \mathrm{j}\alpha \tag{15}$$

A_1、A_2 是由边值条件确定的积分常数；γ 为线路的传播系数；实部 β 为衰减系数；虚部 α 为相位系数。由式(15)可以看出传播系数与频率、分布参数有关。由于 G_0 非常小，传播系数主要由 R_0、L_0 和 C_0 决定。衰减系数 β 随频率的增高而在有限范围内非线性增加，达到一定频率后趋于稳定[16]。因此，行波在传播过程中各频率分量不断衰减，传输距离越远幅度越小，高频分量也越少[17]。相位系数 α 单调地随频率增高而增加，ω/α 为波速度，行波传输速度是频率的函数，而非一个固定值。

2.2 故障点反射波特征参数与故障距离关系分析

本文方法采用三相对称注入脉冲，当行波首次到达故障点时，线路发生模量透射才会产生零模行波。母线端检测到的来自故障点的零模反射波分为两个传输阶段：一是母线注入点到故障点的线模传输阶段；二是故障点到母线检测点的零模传输阶段。频率对线模行波影响较小，而对零模行波影响很大。当频率变化时，线路零序电阻、电感及电抗均是频率的函数[18-19]。零模高频分量在向测量点传输过程中不停衰减，故障距离越远高频分量越少，波速度随频率降低而减小，故障距离越远检测到的零模波速度越小[17]。因此，母线端检测到来自故障点的零模反射脉冲波的时间非线性增加。由式(12)零模反射脉冲波的表达式可以看出故障点零模反射波波形是与故障相入射波有关。脉冲波各频率成分经线路衰减，波形发生展宽和拖尾畸变。

采用 PSCAD 软件搭建如图 3 所示的 10 kV 架空线依频特性(相)模型，中性点不接地。A 为母线端，B 为负载端。在 A 处向线路三相对称注入高压脉冲，a、b、c 三相注入脉冲幅值分别为 10 kV、−5 kV、−5 kV，脉冲宽度 4 μs，经 PT 放大 100 倍采集行波电压信号，录波器采样频率为 10 MHz，录波器时窗长度依据主干线路的长度而定，大于最远端故障时返回首个脉冲的峰值点的时间，在此确定为 200 μs。

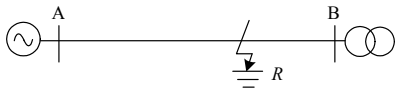
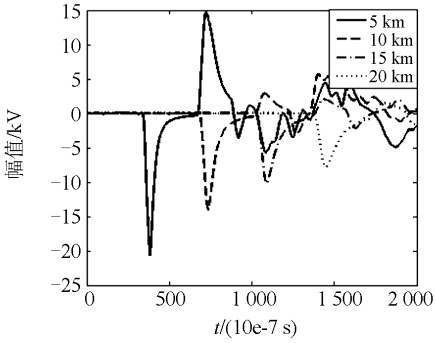


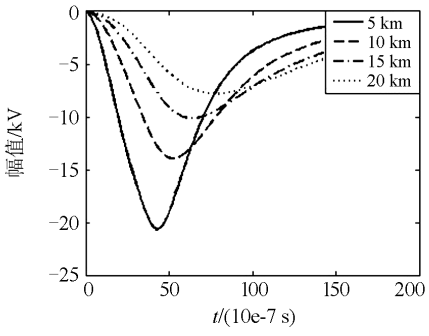
图 3 无分支配电线路

Fig. 3 No branch distribution lines

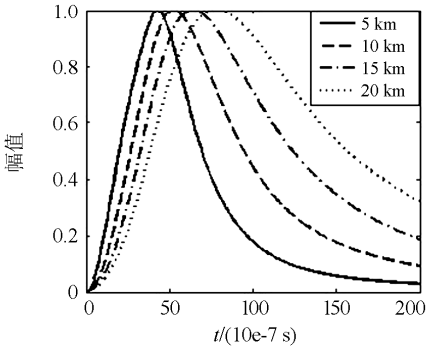
在线路 AB 上 5 km、10 km、15 km 和 20 km 四个故障位置处，a 相 0.01 Ω接地采集零模信号如图 4(a)。从图 4(a)可以看出故障距离越远，故障点的零模反射脉冲到达母线端的时间越长，且脉冲的形状也随距离的变化呈现出较大差异。图 4(a)数据从故障点的零模反射脉冲到达时间开始截取 200 个数据点得到脉冲波形如图 4(b)。从图 4(b)可见脉冲的宽度、幅度、能量、波前陡度、波前时间等均随着故障距离的变化而变化。



(a) 母线端采集的零模波形图



(b) 首波脉冲波形



(c) 极值归一化的首波脉冲波形图

图 4 不同故障距离波形图

Fig. 4 Waveforms of different fault distance

由式(12)可知故障相注入信号幅度、接地电阻通过影响零模反射脉冲的幅度进而影响脉冲的能量、波前陡度。分支点处的折射只影响零模反射脉冲的幅度，每经过一个分支点幅度衰减为原幅度的 2/3，进而影响脉冲的能量、波前陡度。为消除故障距离以外因素对波形的影响，本文对脉冲波进行极值归一化处理使极值点幅值为 1。对图4(b)进行极值归一化处理后得到图 4(c)所示波形，从图4(c)可以看出脉冲的能量、波前时间随故障距离的增加而增加。波前陡度随故障距离的增加而趋于平缓。波前陡度与波前时间成反比例关系，因此取其一作为波形特征参数。当故障发生在靠近线路末端时，故障反射脉冲拖尾部分易与线路末端的反射波叠加而使母线端难以检测到完整的零模反射脉冲，所以利用脉冲波前能量来代表脉冲能量水平更为合理。

提取故障点零模反射脉冲的波前时间 t_p、极值归一化后波前能量 Q 和到达时间 t_a，用故障距离的 2 倍除以到达时间 t_a 计算得到零模反射脉冲传输的平均速度 $\bar{v}$，如表 1。

表 1 到达时间、平均速度、波前时间和极值归一化后波前能量检测结果

Table 1 Detection result of arrival time, average speed, the wavefront time and wavefront energy after normalization of extremum

故障距离/km	t_p/μs	Q	t_a/μs	$\bar{v}$ /(km/μs)
5	4.3	17.14	34.1	0.293 3
10	5.2	19.36	68.4	0.292 4
15	6.4	24.67	103.0	0.291 3
20	7.8	31.11	137.8	0.290 3

从表1可见，随故障距离的增加，平均速度越来越小，如果按波速度3×10^5 km/s乘以传输时间除以2的方式计算故障距离误差较大，以表1中5 km、10 km、15 km、20 km处故障为例，误差分别为115 m、260 m、450 m、670 m，定位误差随故障距离的增加而增加。表1表明母线端检测的故障点零模反射脉冲的到达时间、波前时间和极值归一化后的波前能量与故障距离呈非线性关系，这种非线性关系难以用公式解析表达。因此，本文选取故障点零模反射脉冲到达母线的时间、波前时间和极值归一化后的波前能量作为神经网络的输入变量建立故障测距模型。

3　行波预处理与参数提取

3.1 到达时间检测

本文采用设定幅度阈值 δ 的方法来检测行波的到达时间。反射波的极性与故障相注入信号极性有关，所以取行波幅度绝对值第一次大于 δ 的时间为到达时间。受接地电阻、故障相注入信号强度、分支点折射衰减等因素影响，母线端检测到的故障点零模反射脉冲幅度数量级差异较大，直接采用设定幅度阈值的方法检测到达时间并不合理。本文先对采集到的零模数据进行小数定标规范化再确定到达时间。小数定标规范化是移动数据小数点的位置进行规范化[20]。数据小数点的移动位数依赖于最大绝对值。u_i 被规范为 u_i' 的计算公式为

$$u_i' = u_i / 10^j \tag{16}$$

其中，j 是使 $\max\left(\left|u_i'\right|\right)<1$ 的最小整数。取 $\left|u_i'\right|$ 首次大于 δ(本文取 δ=10^{-4})的时间为到达时间。

3.2 波前时间和能量计算

在检测出到达时间基础上对 t_a 时刻以后的序列求第一个极值点，得到波前时间 t_p。令 t_a 时刻以后的序列 $X_n=(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n)$，令求一阶梯度得到序列 $G_n=(g_1, g_2, g_3, \cdots, g_{n-1})$，$g_p$ 和 g_{p-1} 之积第一次小于 1 的时间即为波前时间 t_p，x_p 为 X_n 的幅度极值(p 是 1 到 n 的整数)。

归一化波前能量计算首先对序列进行极值归一化处理再计算波前能量。极值归一化函数为：

$$Y_n = X_n / x_p \tag{17}$$

其中，$Y_n=(y_1, y_2, y_3, \cdots, y_n)$为极值归一化后的序列。则求得波前能量 Q 为

$$Q = \sum_{n=1}^{p} y_n^2 \tag{18}$$

4　神经网络故障距离预测

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络，主要特点是信号前向传递，误差反向传播[21]。在前向传递中，输入信号从输入层经隐含层逐层处理，直至输出层。每层的神经元状态只影响下一层神经元状态。如果输出层得不到期望输出，则转入反向传播，根据预测误差调整网络权值和阈值，从而使 BP 神经网络的预测输出不断逼近期望输出。

图 5 为 BP 神经网络的三层拓扑图，X、Y 分别代表输入与输出，ω 代表权值。本文将母线端检测的故障点零模反射波的到达时间、波前时间、极值归一化后波前能量作为输入变量，故障与母线的距离作为输出变量，采用 3—5—1 的三层结构，即输入层 3 个节点，隐含层 5 个节点，输出层 1 个节点。用 Matlab 建立神经网络模型，其中节点传递函数选用正切 S 型传递函数 tansig，由于 L-M 优化算法收敛速度快，所以训练函数选用 trainlm 函数，性能分析函数采用均方差性能分析函数 mse。迭代次数为 100 次，学习率为 0.1，训练目标是使均方误差小于 0.000 001。

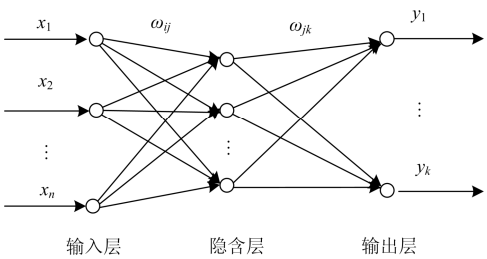


图 5 BP 神经网络结构图

Fig. 5 BP neural network structure

在图 6 所示线路(实验条件同图 3)上每 0.1 km 设置 300 Ω单相接地故障，提取训练数据。在线路上不同于取训练数据的位置，设置 0～10 kΩ的单相接地故障，取 100 组测试数据。运用本文行波特征提取算法获得神经网络的样本数据，进行最大最小值归一化[20]处理使得到的训练数据在 0 到 1 的范围内，然后对建立的神经网络模型进行训练使其满足训练目标。图 7 为神经网络的收敛曲线，由图 7 可知 9 次训练以后网络均方误差收敛至误差要求。网络训练完成后，用测试样本对神经网络测距模型的性能进行测试，鉴于篇幅限制，部分样本的测试结果见表 2。

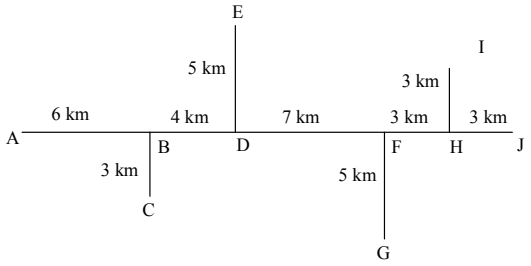


图 6 配电网线路拓扑图

Fig. 6 Topology of distribution network

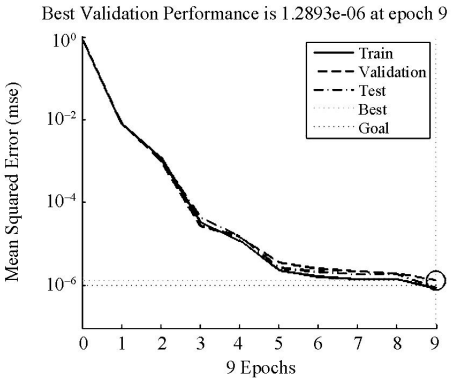


图 7 BP 神经网络收敛曲线

Fig. 7 BP neural network convergence curve

表 2 部分测距结果

Table 2 Partial result of fault location

故障序号	故障距离/km	故障区段	过渡电阻/Ω	测量距离/km	绝对误差/km	相对误差/%
1	0.25	AB	500	0.284	0.034	12.04
2	1.15	AB	500	1.194	0.044	3.68
3	7.45	BD	10	7.489	0.039	0.52
4	10.05	DF	1 000	10.035	0.015	0.15
5	15.85	DF	0.01	15.817	0.033	0.21
6	15.85	DF	10 000	15.790	0.033	0.38
7	18.45	FH	100	18.375	0.075	0.41
8	18.45	FG	100	18.496	0.046	0.25

表 2 中，序号 5 和 6 在相同点故障，接地电阻分别为 0.01 Ω、10 kΩ，测距结果与实际故障距离绝对误差均在 50 m 内。序号 7 和 8 在不同分支故障，测距绝对误差分别为 75 m、46 m，误差都较小。大量仿真测试结果表明该测距方法适用的接地电阻范围大，最大可达 10 kΩ，不受故障分支影响，95%以上区域的测距相对误差在 2%以内。母线附近 1 km 范围内故障时，相对误差较大，由于该段内绝对误差在 100 m 以内，因此对故障点的查找影响较小。分析训练和测试数据表明在母线附近 1 km 范围内波头的上升时间均为 4 μs，造成该段内相对误差较大。综上所述，该方法具有很好的准确性和可靠性，可用于单相接地故障的距离预测。

5 结论

本文提出的方法是在线路发生单相接地故障后，向线路中三相对称注入高压脉冲，同时在母线端采集零模波形，提取故障点的零模反射脉冲特征参数建立神经网络模型测定故障距离。对测距方法的理论和仿真结果进行分析，得出以下结论：

1) 向故障线路三相对称注入高压脉冲，母线端检测到的首个零模脉冲信号为故障点反射波信号。

2) 注入三相对称高压脉冲后，母线端检测到的故障点零模反射脉冲的到达时间、波前时间和极值归一化后的波前能量只与故障距离有关。

3) 测距模型利用母线端检测到的故障点零模反射波的到达时间、波前时间和极值归一化后的波前能量三者作为神经网络输入变量，可有效预测故障距离，且不受接地电阻大小、故障分支影响。

参考文献

[1] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93.
CHEN Yueyun, QIN Jian, WANG Xin, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-93.

[2] 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.

[3] 冉伊, 周步祥, 杨植雅, 等. 一种估算对侧信息的配电网单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 25-31.
RAN Yi, ZHOU Buxiang, YANG Zhiya, et al. A method of single ended fault location for distribution network based on estimated contralateral information[J]. Power System Protection and Control, 2014, 44(18): 25-31.

[4] HIZAM H, CROSSLEY P A, GALE P F. Fault section identification and location on a distribution feeder using travelling waves[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 25, 2002, Chicago, IL, USA: 1107-1112.

[5] 焦彦军, 杜松广, 王琪, 等. 基于信息矛盾原理的畸变信息修正及配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 43-48.
JIAO Yanjun, DU Songguang, WANG Qi, et al. Information aberrance correction and fault-selection location for distribution networks based on the information contradiction theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 43-48.

[6] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.
LIANG Rui, YANG Xuejun, Xue Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. 2015, 30(12): 472-479.

[7] 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.

[8] 刘文轩, 严凤, 田霖, 等. 基于LVQ神经网络的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 90-95.
LIU Wenxuan, YAN Feng, TIAN Lin, et al. LVQ neural network approach for fault location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 90-95.

[9] 张帆, 潘贞存, 马姗姗, 等. 基于小波和神经网络的配电网故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 83-87.
ZHANG Fan, PAN Zhencun, MA Shanshan, et al. Fault location algorithm based on wavelet transform and neural network in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 83-87.

[10] 束洪春, 董俊, 段锐敏, 等. 基于自然频率的辐射状配电网分层分布式ANN故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 83-89.
SHU Hongchun, DONG Jun, DUAN Ruimin, et al. A fault location method for radial distribution networks with layered and distributed ANN based on natural frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 83-89.

[11] 李振然, 贾旭彩, 李滨. 基于小波变换与BP神经网络相结合的配电网单相接地故障定位方法[J]. 继电器, 2004, 32(9): 24-26, 34.
LI Zhenran, JIA Xucai, LI Bin. Fault location for single-phase-to-earth fault using the combination of wavelet transform and BP neural network[J]. Relay, 2004, 32(9): 24-26, 34.

[12] 季涛. 基于暂态行波的配电网线路故障测距研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.

[13] 孙向飞, 束洪春, 司大军. 输电线路不同期合闸操作的行波特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 31-36.
SUN Xiangfei, SHU Hongchun, SI Dajun. Characteristics of travelling wave caused by breakers asynchronous closing [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 31-36.

[14] 王超. 输电线路故障行波分析与测距[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.

[15] 杨炎龙. 配电网故障定位研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[16] 范承志. 电路原理[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 352-362.

[17] 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, 23.
LI Youjun, XU Lina. Relationship between earth mode surge and frequency on power system earth fault[J]. Relay, 2007, 35(15): 4-8, 23.

[18] 王珺, 董新洲, 施慎行. 考虑参数依频变化特性的辐射状架空线路行波传播研究[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 characters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 96-102.

[19] DOMMEL H. Electro-magnetic transients program (EMTP) theory book[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990: 64-115.

[20] WITTEN L H. Data mining: practical machine learning tools and techniques[M]. Third Edition. Singapore: Elsevier Pte Ltd, 2011.

[21] 王小川. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013: 1-17.

收稿日期：2015-03-02；　修回日期：2015-06-02

作者简介：

任 琴(1990-)，女，通信作者，硕士研究生，研究方向为配电网故障检测和现代信号处理；E-mail: screnqin@163.com

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

刘 勇(1969-)，男，高级工程师，研究方向为智能电网技术和电力系统继电保护。E-mail: liuyong11@163.com

(编辑 周金梅)