

实验研究

文章编号: 1671- 251X(2011)01- 0023- 05

DOI: CNKI: 32- 1627/ TP. 20101230. 0843. 004

# 井下电缆在线故障选线及定位方法研究

孙全才, 金林

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 针对煤矿井下供电系统发生单相接地故障时故障点位置难以确定、现有离线测距方法测距精度低的问题, 分析了井下电缆供电系统单相接地故障特征, 提出了一种煤矿井下电缆在线故障选线及定位方法。该方法利用供电系统单相接地故障时暂态零序无功功率在选线频带内的极性选出故障线路, 利用有些频带的暂态高频信号与故障距离成一定映射关系的特点, 将不同条件下发生故障时得到的系统母线零序电压和线路零序电流作为输入样本对小波神经网络进行故障测距训练, 从而实现故障定位。Simulink 仿真结果验证了该方法的有效性和精确性。

**关键词:** 矿井; 供电网络; 电缆; 单相接地; 故障选线; 故障定位; 小波神经网络

**中图分类号:** TD602      **文献标识码:**A      **网络出版时间:** 2010- 12- 30 8:43

**网络出版地址:**<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20101230.0843.004.html>

Research of Method of On-line Fault Line Selection and Location of Underground Cable

SUN Quan- cai, JIN Lin

(School of Electrical and Information Engineering of Anhui University of Science and Technology,  
Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to solve problems that it is hard to confirm fault position when single-phase grounding fault happens in underground power supply system and existing off-line distance measured methods are poor in precision, the paper analyzed characteristics of single-phase grounding fault of underground power supply system with cable and proposed a method of on-line fault line selection and location of underground cable. The method uses polarity of transient zero-sequence reactive power in frequency band of line selection to select fault line when single-phase grounding fault happens in power supply system, and takes zero-sequence voltage of system's bus and zero-sequence current of lines at faulting time as input samples to train wavelet neural network based on characteristics that transient signals with high frequency of some frequency bands map fault distance, so as to realize fault location. The Simulink simulation result verified validity and accuracy of the methods.

**Key words:** mine, power supply network, cable, single-phase grounding, fault line selection, fault location, wavelet neural network

## 0 引言

由于煤矿井下空间狭小, 空气潮湿, 且常有落顶

收稿日期: 2010- 09- 30

基金项目: 安徽省高等学校优秀青年人才基金项目(11731)

作者简介: 孙全才(1978- ), 男, 安徽淮南人, 讲师, 硕士, 现主要从事电气自动化方面的教学与研究工作。E-mail: qcsun05@  
hotmail.com

和岩石塌陷事故发生, 因而供电电缆易受砸、压、碰损害以及有害物质的腐蚀而发生漏电、短路、断线等故障。电缆故障从形式上可分为串联故障与并联故障。串联故障是指电缆一根芯线或多根芯线断开; 并联故障是指电缆芯线对外皮或芯线之间的绝缘下降, 不能承受正常运行电压。最常见的故障形式是单芯线接地<sup>[1]</sup>, 该种漏电故障容易引起瓦斯和煤尘爆炸<sup>[2]</sup>。其它故障一般也是由单相接地故障引起

的。因此, 及时准确地排除电缆故障对煤矿的安全运行十分重要。

煤矿井下供电系统采用单端供电方式, 系统中性点非有效接地, 属于小接地电流系统<sup>[3]</sup>。供电系统一旦发生单相接地故障, 由于接地电流较小, 故很难确定故障点的位置。目前国内井下电力电缆的故障测距实际使用的大多是离线测距方式, 主要分为阻抗法和行波法两类。电力电缆离线故障测距技术已基本成熟, 但测距精度不高。因电缆故障引起的停电事件时有发生, 在一定程度上影响了原煤的生产效率。所以, 如何提高井下电缆故障测距的精度以及实现在线故障定位已成为井下供电系统迫切需要解决的问题之一。

由于故障线路零序特征量的暂态信号中含有丰富的故障特征信息, 利用暂态零序无功功率在选线频带内的极性可选出故障线路, 从而克服利用稳态分量及其它暂态选线方法的局限性。本文在采用暂态选线方法的基础上, 利用有些频带的暂态高频信号与故障距离成一定映射关系的特点, 运用小波分析与神经网络的紧密结合(即小波神经网络)来实现故障定位。仿真结果表明, 该方法可以快速准确地实现井下电缆的在线故障选线和定位功能。

## 1 井下电缆单相接地故障特征分析

利用 Simulink 软件<sup>[4]</sup>可建立井下电缆供电系统的仿真模型, 并得到各种故障情况下的零序电压、零序电流波形, 从而分析总结它们的波形特征。系统仿真模型如图 1 所示, 简化模拟矿井供电系统中井下中央变电所对 2 个采区和 1 个一般负荷供电。其中进线电缆 (InLine) 用 YJV42, 其正序电阻为  $0.08 \Omega/km$ ; 500 m 配电电缆 (Line) 为 YJV32, 其正序电阻为  $0.08 \Omega/km$ , 采区电缆 (Mine Line) 用 UPQ, 其正序电抗为  $0.732 \Omega/km$ , 正序电阻为  $0.07 \Omega/km$ , 长为 100~150 m。采区电压为 660~1140 V, 变压器 (Ground Transformer) 型号为 KSJ2-100/6 6/0.69 kV 9.6/84 A Y/Y-12, 其短路电压为 4.5 V, 短路电压有功分量为 2.4 V, 短路电压无功分量为 3.82 V, 空载损耗为 600 W, 短路损耗为 2400 W, 电阻为 0.113, 电抗为 0.182。隔爆移动变电站 (Mine T) 选用 KSGZY-500/6 6/1.2 kV, 其空载损耗为 1900 W, 短路损耗为 3000 W, 其短路电压百分比为 4, 空载电流百分比为 2。Continuous 为用户界面分析模块; Multimeter 为万用表模块; Fault Scope 为示波器模块。

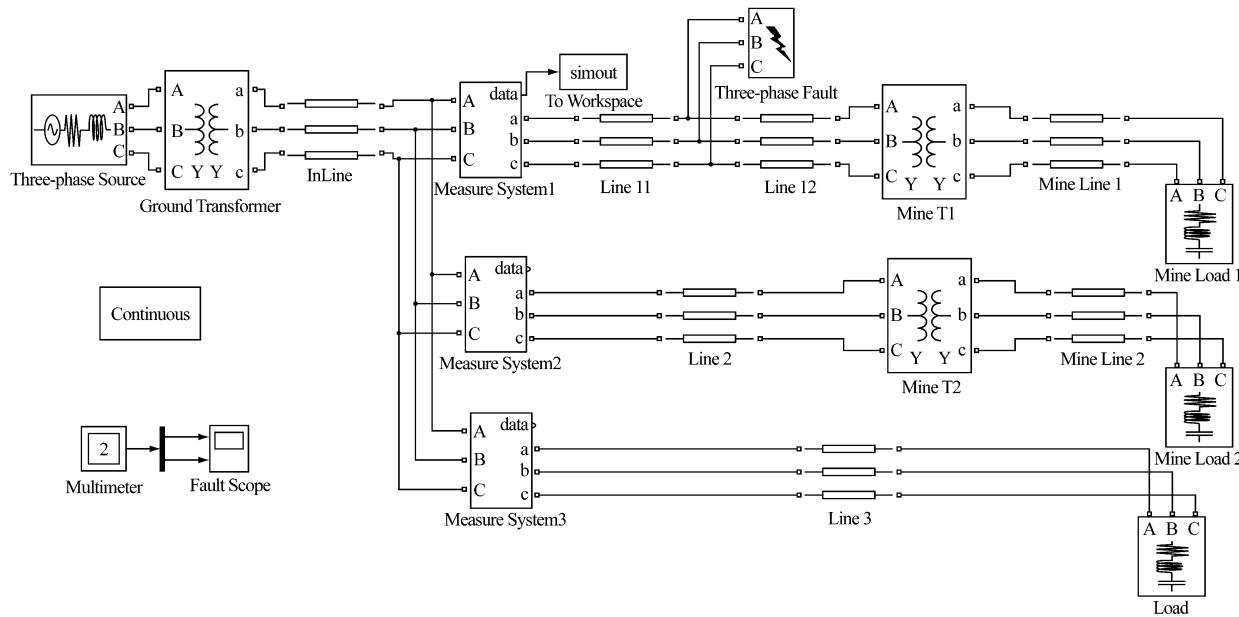


图 1 井下电缆供电系统仿真模型

仿真得到单相接地故障时的零序电压和零序电流波形如图 2 所示。从图 2 可看出, 在发生单相接地故障的暂态过程中, 零序电压和零序电流的变化很明显, 富含了故障特征量。

## 2 暂态量小波分析选线

对于中性点不接地系统和经消弧线圈接地的配电网, 均能得到一个特征频带。在该频带上, 故障线

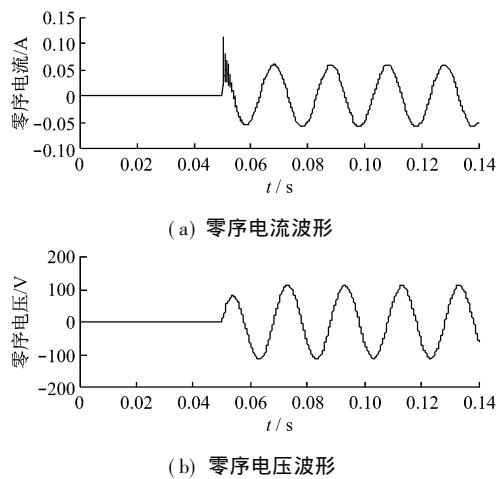


图2 单相接地故障时的零序电流和零序电压仿真波形  
路的零序电流与非故障线路的零序电流方向相反。  
假设第一条馈电线路发生单相接地故障,这时系统  
模型的零序网络如图3所示。

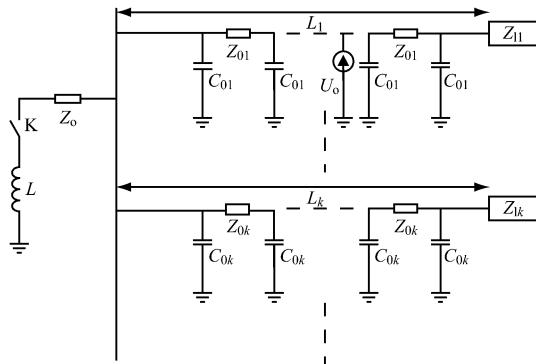


图3 单相接地故障时电缆供电系统的  
零序网络等效电路

下面分别针对中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统进行分析。

### (1) 中性点不接地系统

从线路  $k$  的测量端看进去, 输入零序等效阻抗为

$$Z_{0k} = Z_\lambda \left[ \frac{\coth(\gamma L_k) + \frac{Z_\lambda}{Z_{lk}}}{\coth(\gamma L_k) \frac{Z_\lambda}{Z_{lk}} + 1} \right] \quad (1)$$

式中:  $Z_\lambda$  为零序特征阻抗,  $Z_\lambda = \sqrt{\frac{Z_{0k}}{Y_{0k}}} = \sqrt{\frac{r_{0k} + j\omega L_{0k}}{-j\omega C_{0k}}}$ , 其中  $Y_{0k}$ 、 $Z_{0k}$ 、 $y_{0k}$ 、 $L_{0k}$ 、 $C_{0k}$  分别为单位长度的电阻、阻抗、导纳、电感、电容;  $\gamma$  为线路的零序传播常数,  $\gamma = \sqrt{y_{0k} Z_{0k}} = \sqrt{j\omega r_{0k} C_{0k} - \omega^2 L_{0k} C_{0k}}$ ;  $L_k$  为线路长度;  $Z_{lk}$  为末端负荷的零序等值阻抗。

若  $Z_{lk} = \infty$ , 则有

$$Z_{0k} = Z_\lambda \coth(\gamma L_k) = -j \frac{L_{0k}}{C_{0k}} \operatorname{ctan}(\alpha L_k - \sqrt{L_{0k} C_{0k}}) \quad (2)$$

由式(2)可导出  $Z_{0k}$  的相频特性:

$$\varphi = \arctan \left[ -\frac{L_{0k}}{C_{0k}} \operatorname{ctan}(\alpha L_k - \sqrt{L_{0k} C_{0k}}) \right] \quad (3)$$

则线路  $k$  将交替发生串联谐振和并联谐振, 阻抗在串联谐振时呈容性, 在并联谐振时呈感性, 且随着频率的升高交替呈现容性和感性。

非故障线路首次发生串联谐振( $Z_{0k}$  的相频特性  $\Phi = 0$ )的临界频率为

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2L_k \sqrt{L_{0k} C_{0k}}} \quad (4)$$

在  $0 < \omega < \omega_0$  频带内, 零序等效阻抗呈容性。设  $\omega_{\min}$  为所有非故障线路自身首次发生串联谐振频率的最小值, 则在  $0 < \omega < \omega_{\min}$  配电线路的特征频带内, 所有线路零序等效阻抗均呈容性。健全线路可等效成一个集中电容参数, 而故障线路的零序等效阻抗为所有健全线路零序等效阻抗的总和。所以在选定的特征频带内, 零序容性电流可理解为由故障点虚拟电源  $U_0$  放电产生, 经故障线路分配给其余非故障线路, 即故障线路的容性电流幅值大于任何一条非故障线路, 且故障线路的容性电流从线路流向母线, 而非故障线路的电流从母线流向线路, 二者的零序容性电流方向相反。

### (2) 中性点经消弧线圈接地系统

设消弧线圈在频率  $\omega_t$  下可以完全补偿系统的电容电流, 则有

$$L = \frac{1}{\omega_t^2 C_0} \quad (5)$$

式中:  $C_0$  为整个中性点不接地系统的零序网络对地等效零序电容。

那么在任意频率  $\omega$  下, 故障线路  $i$  检测的容性电流  $\dot{I}_{ci}(\omega)$  为

$$\dot{I}_i(\omega) = - \sum_{k=1, k \neq i}^n \dot{I}_k(\omega) - \dot{I}_L(\omega) = - \left[ \frac{C_{0h}(\omega)}{C_0(\omega)} - \frac{C_0(\omega) \omega_t^2}{C(\omega) \omega^2} \right] \dot{I}_c(\omega) \quad (6)$$

式中:  $\dot{I}_c(\omega) = j\omega C_0(\omega) U_0$ 、 $\dot{I}_k(\omega)$ 、 $\dot{I}_L(\omega)$  分别为整个网络、出线  $k$ 、消弧线圈的零序电流;  $U_0$  为零序电压;  $C_{0h}$  为故障线路等效参数电容;  $C_0(\omega)$ 、 $C(\omega)$  分别为任意频率  $\omega$  下、临界频率  $\omega_t$  下的电容值。

若  $\left[ \frac{C_{0h}(\omega)}{C_0(\omega)} - \frac{C_0(\omega) \omega_t^2}{C(\omega) \omega^2} \right] > 0$ , 则故障线路中仍有容性电流且其方向从线路流向母线, 与非故障线路的容性电流流向相反。故障线路含有电容电流的

临界条件为

$$\left[ \frac{C_{0h}(\omega)}{C_0(\omega)} - \frac{C_0(\omega_r) \omega_r^2}{C(\omega) \omega^2} \right] = 0 \Rightarrow \omega_r^2 C_{0h}(\omega_r) = \omega_r C_0(\omega_r) \quad (7)$$

式中:  $\omega_r$  为故障线路容性电流为零时的频率。

则在  $\omega_r < \omega_{min}$  频带内, 故障线路的零序电流与非故障线路的零序电流方向相反, 消除了消弧线圈的影响。

所以对于中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统的配电网, 均有一个特定的频带, 在该频带内故障线路的零序电流与非故障线路的流向相反。这样在选定的特征频带内, 根据零序无功功率的传输方向就可以判断出故障线路, 即零序无功功率为正时, 线路为非故障线路, 相反则为故障线路。暂态零序无功功率的计算流程如图 4 所示。

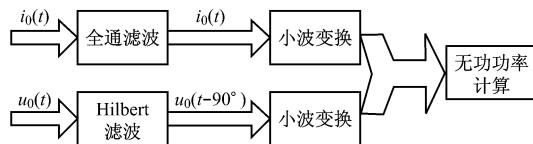


图 4 暂态零序无功功率的计算流程

零序无功功率计算公式为

$$Q_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_0(t) u_0(t - 90^\circ) dt = \\ \frac{1}{T} \left( \sum_k C_{j_0, k} C'_{j_0, k} + \sum_{j \neq j_0} \sum_k d_{j, k} d'_{j, k} \right) \xrightarrow{\text{离散化}} \\ 2^{\frac{1}{N}} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} C_{j_0, k} C'_{j_0, k} + \sum_{j=j_0}^{N-1} \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j, k} d'_{j, k} \quad (8)$$

式中:  $C_{j_0, k}$  和  $C'_{j_0, k}$  分别为  $i_0(t)$ 、 $u_0(t - 90^\circ)$  在小波  $j_0$  和定位  $k$  上的尺度系数;  $d_{j, k}$  和  $d'_{j, k}$  分别为  $i_0(t)$ 、 $u_0(t - 90^\circ)$  在小波  $j$  和定位  $k$  上的尺度系数。

### 3 基于小波神经网络的井下电缆故障定位

小波神经网络是小波分析理论与人工神经网络结合的产物, 具有小波变换良好的时频局部化特性和神经网络强大的学习能力<sup>[5]</sup>。其结合途径大致可分为松散型结合与紧密型结合, 这里采用紧密型结合。

小波神经网络的结构如图 5 所示, 其中学习样本经输入层投影压缩后作用于小波神经网络<sup>[6]</sup>。图 5 中, 输入端有  $2M$  个节点, 隐层有  $k$  个节点, 给定  $P$  组输入输出样本。隐层选取的小波为 Morlet 小波, 对网络的输出也并不是进行简单的加权求和, 而是先对网络隐层小波节点的输出加权求和, 经

Sigmoid 函数变换后得到最终的网络输出。这样有利于处理分类问题, 同时减少训练过程中发散的可能性<sup>[7-8]</sup>。

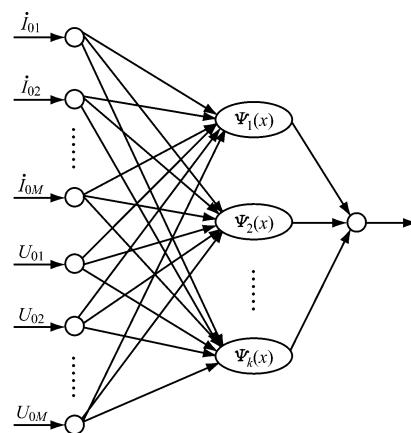


图 5 小波神经网络结构

训练样本时, 在权值和阈值的修正算法中加入动量项, 引进前一步的修正值来平滑学习路径, 避免引入局部极小, 加速学习速率。为了避免在逐个样本训练时对权值和阈值修正可能出现的振荡, 采用成批训练方法, 将一批样本所产生的修正值累计后统一进行一次处理。

选取的代价函数为

$$E = \sum_{p=1}^P E_p = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P (Y_p - y_p)^2 \quad (9)$$

式中:  $Y_p$  为输出层的期望输出;  $y_p$  为网络输出。

隐层输出和输出层输出分别为

$$\begin{cases} O_k^p = \Phi\left(\frac{I_k^p - b_k}{a_k}\right) \\ I_k^p = \sum_{m=1}^M w_{km} i_m^p + \sum_{m=M+1}^{2M} w_{km} U_m^p \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} y_p = f(I_p) \\ I_p = \sum_{i=1}^k w_i O_i^p \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\Phi$  为小波变换函数;  $w_{km}$  为连接权值;  $i_m^p$ 、 $U_m^p$  分别为神经网络输入的电流值和电压值。

小波神经网络训练算法逐步更新神经元间的连接权值  $w_{km}$ 、 $w_k$  及小波的伸缩因子  $a_k$  和平移因子  $b_k$ , 其表达式为

$$\begin{cases} w_k^{\text{new}} = w_k^{\text{old}} + \eta \sum_{m=1}^p \delta_{km} + \lambda \Delta w_k^{\text{old}} \\ w_{km}^{\text{new}} = w_{km}^{\text{old}} + \eta \sum_{m=1}^p \delta_{km} + \lambda \Delta w_{km}^{\text{old}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} a_k^{\text{new}} = a_k^{\text{old}} + \eta \sum_{m=1}^p \delta a_k + \lambda \Delta a_k^{\text{old}} \\ b_k^{\text{new}} = b_k^{\text{old}} + \eta \sum_{m=1}^p \delta b_k + \lambda \Delta b_k^{\text{old}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $w_k^{\text{new}}$ 、 $w_{km}^{\text{new}}$ 、 $a_k^{\text{new}}$ 、 $b_k^{\text{new}}$  为更新值;  $w_k^{\text{old}}$ 、 $w_{km}^{\text{old}}$ 、 $a_k^{\text{old}}$ 、 $b_k^{\text{old}}$  为更新前的值;  $\Delta w_k^{\text{old}}$ 、 $\Delta w_{km}^{\text{old}}$ 、 $\Delta a_k^{\text{old}}$ 、 $\Delta b_k^{\text{old}}$  为更新值与原值的差值;  $\delta_k$ 、 $\delta_{km}$ 、 $\delta_a$ 、 $\delta_b$  分别为  $E_p$  对  $w_k$ 、 $w_{km}$ 、 $a_k$ 、 $b_k$  的梯度,  $\delta_k = \frac{\partial E_p}{\partial w_k} = y_p (Y_p - y_p) (1 - y_p)$ ,  $\delta_{km} = \frac{\partial E_p}{\partial w_{km}} = \delta_k w_k \frac{\partial O_k^p}{\partial I_k^p} x_m^p$ ,  $\delta_a = \frac{\partial E_p}{\partial a_k} = \delta_k w_k \frac{\partial O_k^p}{\partial a_k}$ ,  $\delta_b = \frac{\partial E_p}{\partial b_k} = \delta_k w_k \frac{\partial O_k^p}{\partial b_k}$ ;  $x_m^p$  为输入样本。

学习算法的具体实现步骤<sup>[9]</sup>:

(1) 网络参数的初始化: 将小波的伸缩因子  $a_k$ 、平移因子  $b_k$ 、网络连接权值  $w_{km}$  和  $w_k$ 、学习率  $\eta$  ( $> 0$ ) 以及动量因子  $\lambda$  ( $0 < \lambda < 1$ ) 赋予初始值, 并令其输入样本计数器  $m = 1$ 。

(2) 输入学习样本及相应的期望输出  $Y_p$ 。  
 (3) 计算隐层及输出层的输出。  
 (4) 计算误差和梯度向量。  
 (5) 进行递增运算, 即  $m = m + 1$ , 如果  $m < p$ , 转到步骤(4); 否则计算代价函数  $E$ , 并修改小波神经网络的参数。

(6) 当  $E < \epsilon$  即代价函数  $E$  小于预先设定的某个值  $\epsilon$  ( $> 0$ ) 时, 停止网络的学习, 否则将  $m$  重置为 1, 并转步骤(2)。

假设线路  $L_1$  的 A 相发生故障, 将不同条件下发生故障时得到的系统母线零序电压和线路零序电流作为输入样本对小波神经网络进行故障测距训练, 然后通过训练好的网络来验证小波神经网络的实际测距能力。取表 1 中的故障情况, 训练结果如图 6 所示。

表 1 测试小波神经网络的部分故障情况

故障距离/km	接地电阻/Ω	故障相位/(°)	负荷功率因数
1.5	15	50	70
2.5	15	50	70
3.0	30	70	70
4.0	30	70	70
4.5	60	60	80
5.0	60	60	80
6.5	80	90	70
7.0	80	0	70

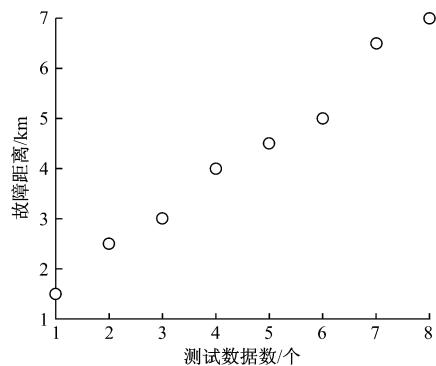


图 6 测试小波神经网

从图 6 可看出, 所选故障情况在测试中能够达到预期的结果, 前提是该网络有足够的训练样本。

#### 4 结语

提出的基于小波变换的井下电缆单相接地故障在线选线和定位方法具有精度高、抗干扰能力强、实时性好的特点。利用该方法, 仅需测量井下变电站出口单端信息就能实现供电线路的选线和电缆故障定位功能, 对井下供电电缆的快速、准确故障定位以及矿井的快速恢复生产和安全可靠供电具有重大意义。

#### 参考文献:

- [1] 于金霞, 李长青, 贾宗璞, 等. 专家系统在煤矿井下供电电缆实时故障诊断中的应用[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2002(1): 50-53.
- [2] 董爱华, 王福忠. 煤矿井下动力电缆故障点检测的研究[J]. 煤炭科学技术, 2001(8): 31-33.
- [3] 赖昌干. 矿山电工学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [4] 黄永安, 马路, 刘慧敏. MATLAB 7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] ZHANG Q, BENVENISTE A. Wavelet Network[J]. IEEE Transactions on Neural Network, 1992, 3(6): 889-898.
- [6] 肖胜中. 小波神经网络理论与应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2006.
- [7] 王凯, 张永祥, 李军. 小波神经网络在齿轮故障诊断中的应用[J]. 煤矿机械, 2004(7): 128-130.
- [8] 成礼智, 王红霞, 罗永. 小波的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 黄明辉, 李子萌. 小波神经网络在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 中南工业大学学报, 1998(5): 85-88.