

# 基于小波神经网络单相断线故障选线和定位

朱玲玲<sup>1</sup>, 张华中<sup>1</sup>, 王正刚<sup>1</sup>, 张洪涛<sup>1</sup>, 李长凯<sup>2</sup>, 朱水强<sup>3</sup>, 白杨<sup>1</sup>

(1. 周口市供电公司, 河南 周口 466000; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;  
3. 河南省悉诺信息技术有限责任公司, 河南 郑州 450008)

**摘要:** 根据发生单相断线不接地故障、单相断线电源侧接地故障或单相断线负荷侧接地故障时, 正序电流暂态分量的变化特性, 提出了一种配电网单相断线故障选线和定位保护新方法。该方法应用小波奇异性检测功能, 获取故障引起的正序电流暂态分量模极大值的极性和大小, 进行故障选线; 并和小波神经网络相结合实现模极大值与故障点位置之间的映射关系, 进行故障定位。仿真结果表明, 该故障选线和定位方法准确可靠。

**关键词:** 配电网; 单相断线故障; 故障选线和定位; 小波神经网络

## Single-phase open-line fault selection and location based on wavelet neural networks

ZHU Ling-ling<sup>1</sup>, ZHANG Hua-zhong<sup>1</sup>, WANG Zheng-gang<sup>1</sup>, ZHANG Hong-tao<sup>1</sup>, LI Chang-kai<sup>2</sup>, ZHU Shui-qiang<sup>3</sup>, BAI Yang<sup>1</sup>  
(1. Zhoukou Electric Power Corporation, Zhoukou 466000, China; 2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 3. Henan Province Xinuo Information Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** According to the change characteristic of the transient component of positive-sequence current when single-phase open-line fault with non-grounding or power-side-grounding or load-side-grounding happens, a novel selection and location method for single-phase-open-line fault of distribution network is presented. In this method, singularity detection of wavelet is employed to obtain the polarities and magnitudes of modulus maximum of the transient component of positive-sequence current caused by the fault. Comparing them, the fault line can be determined. The polarities and magnitudes are combined with wavelet neural networks to realize the mapping relationship between modulus maximum and fault point position, and then the fault location can be realized. Simulation results show that the proposed method is of precision and reliability.

**Key words:** distribution network; single-phase open-line fault; fault selection and location; wavelet neural network

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0012-06

## 0 引言

配电网中性点采用小电流接地方式可提高供电可靠性, 所以被很多国家配电系统采用<sup>[1]</sup>。10 kV 配电网架空线路易发生断线故障, 断线后兼有接地故障较为常见, 此类故障识别有很多方法。文献[2]提出了树形分支电网中发生单相断线兼有接地短路故障时, 任意两个确定频率下真故障点处故障位置诊断值的变化量是电源端相位测试偏差的故障定位方法。文献[3]针对树形配电线路特点, 提出了将始端相量逐分支向后传递, 故障点逐分支搜索的故障测距方法。文献[4]利用梯形模糊数模拟配变负荷变化范围, 进行单相断线非接地故障判别和定位。本文把单相断线故障分为单相断线不接地故障、单相断线电源侧接地故障、单相断线负荷侧接地故障<sup>[5]</sup>。然后利用单相断线故障引起正序电流暂态分量突变(奇异)特征, 用小波奇异性检测原理分析故障奇异状况, 并用小波神经网络实现模极大值与故障点位置之间的映射关系, 进行故障选线和定位。

## 1 故障特性分析

在正常工作状态下, 线路上的电压、电流基本是正序分量<sup>[6]</sup>, 由对称分量法的基本原理可知, 只有正序故障分量在各种类型故障下都存在。正序故障分量的这一独特的性能为简化和完善继电保护开辟了新的途径。

图1中, 根据叠加定理, 10 kV小电流接地系统发生A相断线不接地故障时, 故障点的正序、负序、零序电流  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_0$  分别为<sup>[7-9]</sup>:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_{a|0} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_1} + \dot{I}_{a|0} \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_{a|0} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

$$\dot{I}_0 = -\dot{I}_{a|0} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_0} \quad (3)$$



## 2 小波检测突变量的选线方法

### 2.1 正序电流暂态分量的定义

$$\Delta \dot{I}_{1(t)} = \dot{I}_{1(t-T)} + \dot{I}_{1(t)}$$

式中： $\Delta \dot{I}_{1(t)}$ 为故障时刻正序电流暂态分量； $\dot{I}_{1(t)}$ 为故障时刻正序电流； $\dot{I}_{1(t-T)}$ 为故障时刻前 $T/2$ 周期的正序电流。

### 2.2 小波神经网络模型

文中输入层到隐含层到输出层之间的系数调整采用学习速率可变的动量BP算法<sup>[11-18]</sup>；隐含层神经元的传递函数均采用正切函数。本文所用的小波神经网络模型如图2所示。图2中， $\Delta \dot{I}_1$ 表示故障线路正序电流暂态分量时间序列。

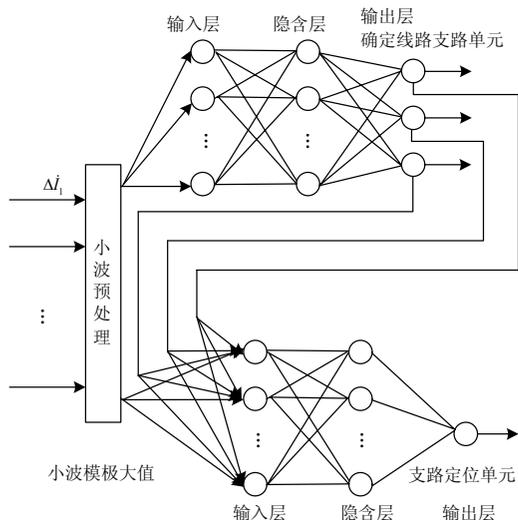


图2 对输电线路单相断线故障定位的小波神经网络模型  
Fig.2 Model of wavelet neural networks for line location of single-line-open fault

### 2.3 故障选线和定位方案

新型保护方案如图3。

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真模型介绍

采用 ATP-EMTP 和 Matlab 仿真软件对 10 kV 配电网进行仿真分析，如图4所示，分支①为线路二的主干线，从 10 kV 母线到其负荷末端总长为 17.5 km；分支②为线路二第一个分支，距 A 点全长为 9 km；分支③为线路二第二个分支，距 B 点全长为 4.5 km。采样频率为 5 kHz。根据中性点接地方式的不同、故障点的不同等几十种情况，取得了大量的数据，由于篇幅有限，仅选取部分数据与波形列于图5、6、7和表1、2、3中。

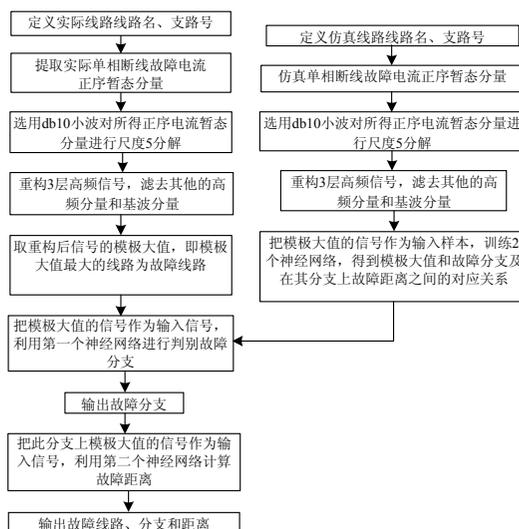


图3 故障选线和定位方法流程图  
Fig.3 Flowchart of fault line selection and location

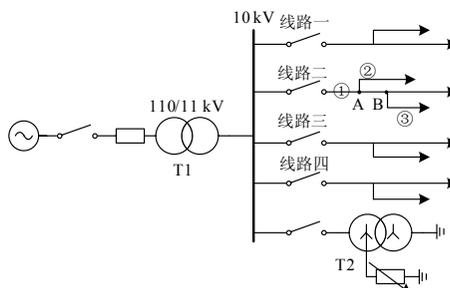


图4 小电流接地系统仿真实例  
Fig.4 Model of small current grounding system

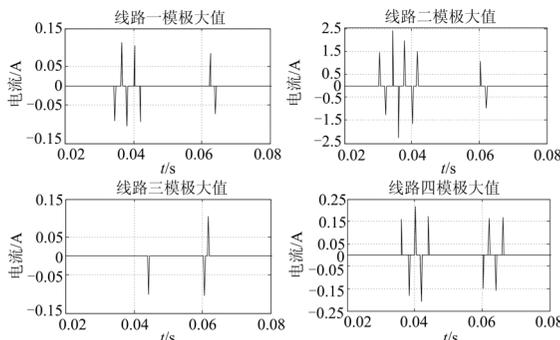


图5 线路二A相断线不接地故障时正序电流暂态分量模极大值的仿真波形

Fig.5 Simulation waveform maximal modulus with wavelet transform of positive sequence current transient component with non-grounding A-phase-line-open fault in line II

### 3.2 仿真结果

图5、6、7为小电流接地系统线路二发生A相断线不接地、电源侧接地、负荷侧接地故障时，四条线路正序电流暂态分量经db10小波5尺度分解，3尺度重构的高频分量模极大值波形。可见，线路

二的小波变换模极大值最大; 极性与其他三条线路相反。一、三、四条线路的极性相同, 且其模极大值的大小相近。据此判据, 三类单相断线故障易判断出故障线路为线路二。

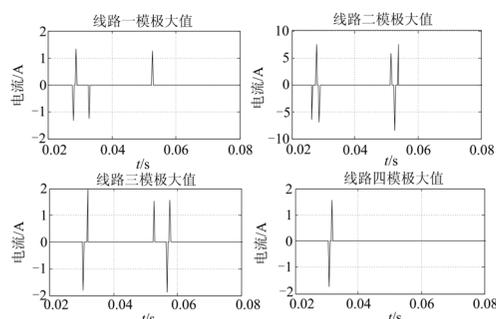


图6 线路二 A 相断线电源侧接地故障时正序电流暂态分量模极大值的仿真波形

Fig.6 Simulation waveform maximal modulus with wavelet transform of positive sequence current transient component with power-side-grounding A-phase-line-open fault in line II

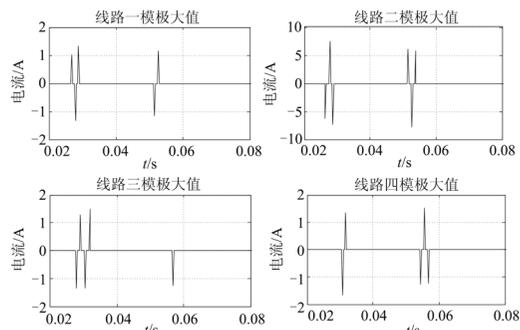


图7 线路二 A 相断线负荷侧接地故障时正序电流暂态分量模极大值的仿真波形

Fig.7 Simulation waveform maximal modulus with wavelet transform of positive sequence current transient component with load-side-grounding A-phase-line-open fault in line II

表1~3分别为在线路二上不同位置发生三类A相断线故障时, 神经网络的定位情况。由表1~3可见: 第一个神经元在不同线路分支上不同位置故障时, 均能正确地判定故障分支; 第二个神经元所

表1 利用小波神经网络进行A相断线不接地故障测距的仿真结果

Tab.1 Simulation results of non-grounding A-phase-line-open fault location using wavelet neural networks

支路1			支路2			支路3		
故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %	故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %	故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %
0.5	0.503 9	0.778 0	0.5	0.521 0	4.200 0	0.5	0.529 7	5.940 0
1.5	1.500 1	0.006 7	1.0	1.021 6	2.160 0	1.0	0.955 1	-4.490 0
4.0	3.999 4	-0.015 0	3.0	3.021 9	0.730 0	1.5	1.540 1	2.673 3
7.0	7.000 2	0.002 9	6.5	6.497 3	-0.041 5	2.0	1.985 9	-0.705 0
9.0	8.999 2	-0.008 9	7.0	6.996 0	-0.057 1	2.5	2.493 6	-0.256 0
11.5	11.501 4	0.008 7	7.5	7.506 5	0.086 7	3.0	3.102 7	3.423 3
13.0	12.999 3	-0.007 7	8.0	8.007 1	0.088 7	3.5	3.514 4	0.411 4
16.0	16.023 9	0.150 0	8.5	8.497 6	-0.028 2	4.0	3.988 3	-0.292 5
17.0	16.999 2	-0.005 9	9.0	8.975 6	-0.271 1	4.5	4.501 1	0.024 4

表2 利用小波神经网络进行A相断线电源侧接地故障测距的仿真结果

Tab.2 Simulation results of power-side-grounding A-phase-line-open fault location using wavelet neural networks

支路1			支路2			支路3		
故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %	故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %	故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %
0.5	0.502 2	0.440 0	0.5	0.525 8	5.160 0	0.5	0.506 3	1.260 0
1.5	1.504 6	0.306 7	1.0	0.988 6	-1.140 0	1.0	0.996 9	-0.310 0
4.0	4.003 7	0.092 5	3.0	2.986 1	-0.463 3	1.5	1.501 0	0.066 7
7.0	7.001 4	0.020 0	6.5	6.500 2	0.003 1	2.0	2.003 8	0.190 0
9.0	9.002 4	0.026 7	7.0	6.999 8	-0.002 9	2.5	2.497 0	-0.120 0
11.5	11.502 4	0.020 9	7.5	7.500 5	0.006 7	3.0	3.000 9	0.030 0
13.0	13.002 3	0.017 7	8.0	7.999 7	-0.003 8	3.5	3.503 0	0.085 7
16.0	16.002 5	0.015 6	8.5	8.500 0	0	4.0	4.002 2	0.055 0
17.0	17.002 8	0.016 5	9.0	9.000 0	0	4.5	4.500 3	0.006 7

表3 利用小波神经网络进行A相断线负荷侧接地故障测距的仿真结果  
Tab.3 Simulation results of load-side-grounding A-phase-line-open fault location using wavelet neural networks

支路 1			支路 2			支路 3		
故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %	故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %	故障距离/ km	仿真值/ km	相对误差/ %
0.5	0.499 7	-0.060 0	0.5	0.501 0	0.200 0	0.5	0.500 5	0.100 0
1.5	1.499 1	-0.060 0	1.0	1.001 0	0.100 0	1.0	0.999 3	-0.070 0
4.0	4.000 1	0.002 5	3.0	3.001 0	0.033 3	1.5	1.500 0	0
7.0	6.999 4	-0.008 6	6.5	6.500 7	0.010 8	2.0	2.000 0	0
9.0	8.998 8	-0.013 3	7.0	7.000 9	0.012 9	2.5	2.500 6	0.024 0
11.5	11.502 5	0.021 7	7.5	7.500 8	0.010 7	3.0	2.996 2	-0.126 7
13.0	12.999 8	-0.009 2	8.0	8.000 8	0.010 0	3.5	3.504 5	0.128 6
16.0	16.027 5	0.171 9	8.5	8.500 8	0.009 4	4.0	4.004 1	0.102 5
17.0	16.974 2	-0.151 8	9.0	9.000 8	0.008 9	4.5	4.494 2	-0.128 9

仿真的故障距离相对误差绝对值都在6%之内,其中相对误差绝对值小于1%的点有72个,占检测点总数的88.9%。仿真结果表明正序电流暂态分量小波变换模极大值与故障距离具有较强的规律性。因单相断线接地故障时大于单相断线不接地故障时正序电流暂态分量,所以可以看到单相断线接地故障的相对误差小于单相断线不接地故障的相对误差;又因支路3离母线较远,单相断线故障时正序电流暂态分量相对其他支路较小,则其定位的相对误差较大,尤其是单相断线不接地故障时。但都能满足工程测量要求。

#### 4 结论

本文首次提出利用正序电流暂态分量小波变换模极大值的大小进行断线故障选线,并构造小波神经网络模型,进行故障定位。该方法的特点是:

①单相断线故障时,正序暂态电流一直存在,且突变特征明显,理论和仿真均验证该选线方法有较高的灵敏度。

②利用故障瞬间信息,受干扰影响程度小,而且小波突变量检测算法从机理上能够抑制随机小干扰的影响。

③利用小波变换模极大值检测理论分析正序暂态电流,并用小波神经网络分别实现模极大值与故障分支和故障距离之间的映射,仿真结果表明该理论完全可行。

④本文仅给出A相发生断线故障的情况,可通过仿真验证,发生其他类型故障时,基于正序暂态电流模极大值和小波神经网络的故障选线和定位方法同样能够满足系统检测的要求。

该技术有待于进一步研究,以满足现场实际运

行要求。

#### 参考文献

- [1] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等.应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.  
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [2] 韩凤玲,王毅,许承斌,等.树形分支电网单相断线兼接地故障特征[J].哈尔滨工业大学学报,1998,30(2):16-20.  
HAN Feng-ling, WANG Yi, XU Cheng-bin, et al. Fault features of line break with short-circuit for tree-type distribution line[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(2): 16-20.
- [3] 贾文超,陈娟,许承斌,等.基于双频法的树形配电线路单相断线兼接地故障诊断[J].电力系统自动化,1999,11(2):20-24.  
JIA Wen-chao, CHEN Juan, XU Cheng-bin, et al. Fault diagnosis for line-open with line-to-ground on radial distribution network by method of double frequency diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 11(2): 20-24.
- [4] 屈刚,李长凯.配电网架空线路断线故障定位[J].电力自动化设备,2005,25(12):35-38.  
QU Gang, LI Chang-kai. Simulative study on steady-state performance of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 35-38.
- [5] 张慧芬,潘贞存,桑在中.小电流接地系统单相断线兼接地故障的分析[J].继电器,2004,32(18):6-9.

- ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, SANG Zai-zhong. Analysis of complex line breaking and grounding fault in the power system with neutral point indirectly grounded[J]. Relay, 2004, 32 (18): 6-9.
- [6] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1980: 1-64.
- HE Jia-li, SONG Cong-ju. Protective relaying theory in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1980: 1-64.
- [7] 李广琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 142-150.
- LI Guang-qi. Transient analysis in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 142-150.
- [8] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 35-38, 43.
- ZHU Ling-ling, LI Chang-kai, ZHANG Hua-zhong, et al. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38, 43.
- [9] 张华中, 王维庆, 朱玲玲, 等. 基于过渡电阻计算的距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 37-42.
- ZHANG Hua-zhong, WANG Wei-qing, ZHU Ling-ling, et al. Ground distance relay based on fault resistance calculation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 37-42.
- [10] 电力系统不对称状态下电气量的计算[M]. 贺家李, 译. 北京: 水利水电出版社, 1989: 85-200.
- Computus of electric value in power system with anisomerous estate[M]. HE Jia-li, trans. Beijing: Water and Electricity Press, 1989: 85-200.
- [11] 余得伟, 招海丹. 神经网络应用于继电保护的探讨[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(3): 24-26.
- YU De-wei, ZHAO Hai-dan. Application principle of artificial neural networks in relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(3): 24-26.
- [12] 王铭, 徐玉琴. 基于小波变换和 BP 网络的非故障相暂态电流故障定位[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 25-27.
- WANG Ming, XU Yu-qin. Locating fault using transient component of non-fault-phase based on wavelet analysis and BP neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 25-27.
- [13] 郭晶, 孙伟娟. 神经网络理论与 MATLAB 7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 25-88.
- GUO Jing, SUN Wei-juan. Neural network theory and MATLAB 7 application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 25-88.
- [14] 胡晓鹏, 易理刚. 基于小波预处理的人工神经网络实现微机变压器保护的新方法[J]. 继电器, 2004, 32(6): 22-26.
- HU Xiao-peng, YI Li-gang. A new method of applying artificial neural network based on preprocess of wavelets to realize computer-based transformer protection[J]. Relay, 2004, 32(6): 22-26.
- [15] 李微, 谭阳红, 彭永进. 基于小波神经网络的电力电子电路故障模式识别[J]. 继电器, 2005, 33(14): 82-86.
- LI Wei, TAN Yang-hong, PENG Yong-jin. Fault pattern recognition of power electronic circuits based on wavelet neural network[J]. Relay, 2005, 33(14): 82-86.
- [16] 刘晓芳, 刘会金, 柯定芳. 基于小波变换和神经网络的暂态电能质量扰动自动识别[J]. 继电器, 2005, 33(23): 46-50.
- LIU Xiao-fang, LIU Hui-jin, KE Ding-fang. Auto recognition of transient power quality disturbances based on wavelet and neural network[J]. Relay, 2005, 33(23): 46-50.
- [17] 宋人杰, 边奕心, 闫淼. 基于小波系数和 BP 神经网络的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 87-90.
- SONG Ren-jie, BIAN Yi-xin, YAN Miao. Short-term load forecasting in power system based on wavelet coefficient and BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 87-90.
- [18] 秦代春, 周林, 郭珂, 等. 一种小波神经网络的电能质量信号去噪新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 88-93.
- QIN Dai-chun, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. A new method of power quality de-noising based on the wavelet neural network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 88-93.

收稿日期: 2010-03-04; 修回日期: 2010-11-28

作者简介:

朱玲玲(1980-), 女, 硕士, 研究方向为配电网电力系统自动化; E-mail: zhulingling1980@126.com

张华中(1979-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护。