

# 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

李振然, 贾旭彩, 李滨

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 提出一种基于小波变换与BP神经网络相结合的方法来实现小电流接地系统单相接地故障定位。由于利用暂态故障电流和暂态母线电压的模极大值的实部和虚部作为BP神经网络的输入,提高了识别故障能力和可靠性,通过对BP神经网络的特别处理,大大地减小过渡电阻对故障定位的影响。仿真结果表明,该故障定位方法准确可靠。

**关键词:** 小波变换; BP神经网络; 单相接地; 故障定位

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)09-0024-03

## 0 引言

我国 10 ~ 35 kV 配电网一般为小电流接地系统,单相接地时不会形成短路回路,故障线路流过的电流为所有非故障线路对地电容电流之和,数值很小。对中性点经消弧线圈接地的配电网,故障线路的故障电流感性电流补偿后数值更小甚至反相。而系统的线电压仍然是对称的,不影响对负荷的连续供电。规程规定可以继续运行 1 ~ 2 小时,但随着馈电线的增多,电容电流增大,长时间运行就容易使单相接地变成多点接地短路,弧光接地还会引起全系统的过电压,损坏设备,破坏系统的安全运行,所以必须及时找到故障线路和故障地点。

由于单相接地的稳态故障电流比较小,有可能接近于或低于电流互感器容许电流的下限值,测量误差较大。同时,稳态故障电流在数值上可能与零序电流滤过器的不平衡电流值接近,很难区别。对经消弧线圈接地系统,由于感性电流补偿,使故障线路稳态故障电流更小,甚至出现反相,给故障选线增加困难。小电流接地系统单相接地时故障电流的暂态分量比稳态故障电流大几倍甚至更大,而且暂态量的频率比较高,消弧线圈接近开路,补偿感性电流对暂态分量的影响比较小。

小波变换从暂态故障电流中提取故障特征可显著地提高故障选线的精度和可靠性,已成功地用于故障选线<sup>[1~4]</sup>。

中性点不接地系统单相接地的故障定位比故障选线更困难,关键问题有两个:一是稳态故障电流比较小;二是如何克服单相接地时过渡电阻对故障定位的影响。目前关于小电流接地系统单相接地故障

定位方法的文献很少,已有的小电流接地系统单相接地故障定位的方法主要有 S 注入法和模拟退火法<sup>[5]</sup>,模拟退火法的主要问题是采用了稳态的故障电流和电压,其次是迭代时间比较长,因此有进一步研究的必要。

## 1 小波变换

小电流接地系统单相接地时,故障电流和故障电压暂态过程中包含有丰富的故障信息,它比稳态故障信号大几倍,因此利用暂态故障信号来实现故障识别,具有更高的灵敏度和可靠性。小波变换是在傅里叶变换基础上发展起来的一种现代信号处理方法,它克服了傅里叶变换不能对信号同时进行时频局部化分析的缺点,可以对信号进行精确分析,特别是对暂态突变信号或微弱信号的变化比较敏感,能可靠地提取出故障特征。小波变换把信号分解成不同尺度和位移的小波之和,利用合适的小波基对暂态故障电流进行小波变换后容易看出故障线路上暂态故障电流幅值大于非故障线路零序电流的幅值,而其相位也与非故障线路的相位相反,因此可利用它进行故障选线和故障定位。

设  $x(t)$  为平方可积函数[记作  $x(t) \in L^2(R)$ ],  $\psi_a(t)$  被称为基本小波或母小波的函数,则

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt = \langle x(t), \psi_a(t-\tau) \rangle \quad (1)$$

式(1)称为  $x(t)$  的小波变换,式中  $a > 0$  是尺度因子,反映位移,其值可正可负。符号  $\langle x, y \rangle$  代表内积,  $\psi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$  是基本小波的位移与

尺度伸缩,被称为子小波或子波。在连续小波变换中,如果只对尺度  $a$  进行二进离散 ( $a = 1/2^j, j \in \mathbb{Z}$ ) 而平移保持连续变化,则小波变换为:

$$WT_x(\frac{1}{2^j}, \tau) = 2^{j/2} \int x(t) \psi^*(2^j(t - \tau)) dt \quad (2)$$

这种小波变换被称为二进小波变换。

多分辨率分析的基本思想就是把信号投影到一组互相正交的小波函数构成子空间使信号在不同尺度上展开,从而提取信号在不同频带的特征,同时保留了信号在各尺度上的时域特征。因此多分辨率分析是一种有效的时频分析方法,多分辨率分析在理论上是完善的,但计算量过大,所以一般采用 Mallat 快速算法。

本文是以 Matlab 6.5 的小波变换工具箱进行小波变换的,所用的是 Morlet。Morlet 小波的定义是:

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{j\omega_0 t} \quad (3)$$

它的小波函数如图 1 所示:

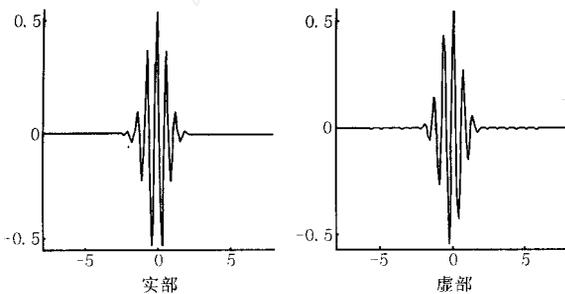


图 1 Morlet 复小波

Fig. 1 Complex Morlet wavelet

## 2 BP 神经网络

人工神经网络有许多特点,它能充分逼近任意复杂的非线性函数,它不需要预先知道对象的数学模型,它具有分布存储信息和联想记忆功能。因此可以利用人工神经网络解决小电流接地系统单相接地时的故障定位问题。前馈型神经网络模型的结构由输入层、隐层和输出层组成,根据需要可设置 1~2 个隐层。

训练 BP 神经网络有各种算法:如梯度法,变尺度法的 BFGS 法,共轭梯度法等,我们发现,不同算法主要影响算法的收敛速度,在相同的收敛准则下,测量精度没有显著差别,因此我们采用了比较简单的具有惯性因子的固定步长的梯度法。BP 神经网络的测量精度主要受隐层的层数(在我们的试验中,两个隐层比一个隐层的测量精度要高),在小的步长下的迭代次数,激活函数和惯性因子等因素影响较

大。而迭代次数的增加只不过增加了训练时间,对实时应用并无影响。因此我们所用的 BP 神经网络的结构为 4-8-4-2 结构,即输入层有 4 个输入(故障线路暂态零序电流小波变换的模极大值的实部和虚部,母线暂态零序电压的模极大值的实部和虚部),第一隐层用 8 个激活函数作为双曲正切的神经元,第二隐层用 4 个激活函数作为 S 型的神经元,输出层用了两个线性激活函数的神经元。由于故障定位受过渡电阻的影响很大,如何克服过渡电阻的影响是故障定位装置成败的关键。为此,我们在输出层中采用两个神经元,其中一个测量故障的距离,另一个用于测量过渡电阻。在 BP 网络训练时,通过调整 BP 网络的连接权值,使输出层两个神经元分别逼近故障距离的期望值和过渡电阻的期望值,通过这种逼近,将过渡电阻的影响存储在神经网络的权值中。仿真表明,这样处理是有效的,可将过渡电阻的影响大大地减少。

## 3 仿真和结果分析

本文使用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 3.0.8 来模拟小电流接地系统单相接地故障,以便获得所需要故障暂态信息。仿真所采用的系统结构如图 2 所示。线路参数:正序阻抗为  $0.17 + j0.38 \Omega / \text{km}$ ,正序容纳为  $3.045 \mu\text{s} / \text{km}$ ,零序阻抗为  $0.23 + j1.72 \Omega / \text{km}$ ,零序容纳为  $1.884 \mu\text{s} / \text{km}$ 。4 条 10 kV 馈线长度分别为 8 km,10 km,15 km,12 km。通过大量仿真,可得到不同过渡电阻下不同故障地点单相接地时故障线路暂态零序电流和母线暂态零序电压,数据窗为故障后 3 个周波,采样频率为 2 kHz。

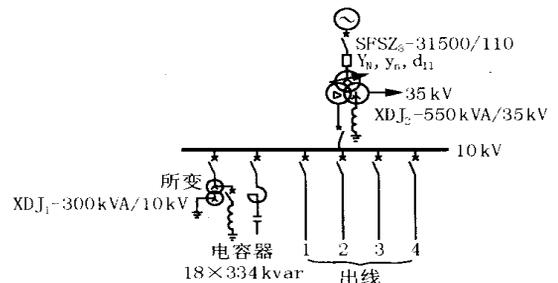


图 2 小电流接地系统仿真实例

Fig. 2 Simulation case of NDGS network

利用 MATLAB 6.5 的小波变换工具箱<sup>[6]</sup>,采用 Morlet 复小波对上述信号的采样值进行小波变换,得到故障线路零序电流的小波变换模极大值的实部和虚部及母线零序电压的小波变换模极大值的实部和虚部,作为 BP 神经网络训练的输入样本,“指导

教师'就是相应的故障点距离和过渡电阻值。表1是在BP神经网络训练好以后,利用故障线路暂态故障零序电流和母线零序电压的小波变换模极大值的实部和虚部作为BP神经网络的输入,在不同过渡电阻、不同故障点下的仿真结果。

从表1可看出,除个别点外,各故障点的相对误差小于1%,绝对误差在10m以内的占60%,其余都在30m以内,因此测量精度是可以满足工程要

求。同时,也证明我们在BP神经网络上所采取的减小过渡电阻对测量值影响的措施是有效的。在仿真中虽然只列出0,10和20三种过渡电阻的仿真结果,但也已证明采取这种措施后,过渡电阻对测量值的影响是不大的。梯度法在训练时收敛速度虽然比较慢,但在训练好以后用于测量时的速度是很快,可以满足实时的要求,这也是BP网络的一个优点。

表1 利用BP神经网络进行故障测距的仿真结果

Tab.1 Simulation results of fault location using BP neural network

过渡电阻 0			过渡电阻 10			过渡电阻 20		
故障点距离/km	仿真结果/km	相对误差(%)	故障点距离/km	仿真结果/km	相对误差(%)	故障点距离/km	仿真结果/km	相对误差(%)
1	1.000 317 6	0.03	1	1.013 085	1.308	1	1.011 502	1.15
2	2.010 620 9	0.53	2	2.015 727	0.786	2	2.008 345	0.217
3	3.002 030 1	0.067	3	3.001 992	0.066	3	2.990 465	- 0.318
4	4.004 587 9	0.11	4	3.996 934	- 0.076	4	4.002 289	0.057
5	5.006 832	0.136	5	5.003 693	0.074	5	5.021 333	0.427
5.5	5.500 847	0.015	5.5	5.484 846	- 0.275	5.5	5.537 843	0.688
5.6	5.600 958	0.017	5.6	5.584 114	- 0.284	5.6	5.630 437	0.543
5.7	5.718 66	0.327	5.7	5.685 349	- 0.257	5.7	5.723 495	0.412
5.8	5.779 124	- 0.36	5.8	5.807 374	0.127	5.8	5.825 245	0.435
5.9	5.901 168	0.019	5.9	5.891 998	- 0.136	5.9	5.911 822	0.2
6	6.010 022	0.167	6	5.996 612	- 0.056	6	6.007 377	0.123
6.1	6.087 123	- 0.21	6.1	6.101 607	0.066	6.1	6.103 965	0.065
6.2	6.219 413	0.313	6.2	6.206 664	0.107	6.2	6.201 596	0.025 7
6.3	6.277 719	- 0.35	6.3	6.311 536	0.183	6.3	6.300 254 4	0.004
6.4	6.410 172	0.158	6.4	6.415 993	0.25	6.4	6.399 859 2	- 0.002
6.5	6.502 277	0.035	6.5	6.519 858	0.306	6.5	6.500 298 1	0.004 5
7	6.995 853	- 0.059	7	7.026 928	0.384	7	7.009 107 1	0.13
8	8.001 685	0.02	8	8.025 244	0.315	8	7.981 108 8	- 0.235

## 4 结论

小电流接地系统单相接地故障定位是多年来一直未能解决的一个难题,小波变换作为一种现代信号处理方法,非常适合于分析电力系统故障暂态过程。本文提出的基于小波变换与BP神经网络相结合的方法来实现小电流接地系统单相接地故障定位方法是可行的,同时本文提出的在BP神经网络中减小过渡电阻对测量值影响的措施是有效的。

## 参考文献:

[1] Oinís C M, Francoise B, et al. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (3) : 1301-1308.

[2] 肖白,束洪春,高峰(XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng). 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述(Survey of the Methods of Fault Line Selection for Single phase-to-earth Fault in Network with Ungrounded Neutral) [J]. 继电器(Relay), 2001, 29(4) : 16-20.

[3] 贾清泉,刘连光,杨以涵(JIA Qing-quan, LIU Liang-guang, YANG Yi-han). 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流接地故障选线保护(Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2001, 21(10) : 78-82.

[4] 操丰梅,苏沛浦(CAO Feng-mei, SU Pei-pu). 小波变换在配电自动化接地故障检测中的应用研究(Study on the Application of Wavelet Transform to Detect Earthfault in Distribution Automation System) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(13) : 33-36.

(下转第34页 continued on page 34)

- [2] Salvaderi L, Billinton R. A Comparison Between Two Fundamental Approaches to Comparison System Reliability Evaluation [J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(12): 3486-3491.
- [3] 张焰, 张卫红 (ZHANG Yan, ZHANG Wei hong). 配电管理系统中的分析应用软件研究 (Research of Analysis and Application System for Distribution Management System) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 1999, (11): 7-9.

收稿日期: 2003-08-11; 修回日期: 2003-10-29

作者简介:

文艳 (1979 - ), 女, 硕士研究生, 现从事电力系统自动化方面的研究;

罗安 (1957 - ), 男, 博士生导师, 长期从事电力系统自动化方面的研究工作;

谷群辉 (1972 - ), 男, 博士研究生, 主要从事配电网可靠性方面的研究。

### Reliability stratification evaluation algorithm of distribution network

WEN Yan, LUO An, GU Qun-hui

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Aiming at the three modes of failure generation, this paper analyses their influence to the reliability of distribution network, and presents an assessment algorithm for power system reliability based on failure diffusion. The algorithm can quickly calculate the reliability index of the feeder lines, transformer substations and electric networks, and find out the system capacity constraint influencing the reliability of the power supply. It is a powerful tool for distribution system planning, maintenance, and reconstruction. The application of the algorithm verifies its validity.

**Key words:** distribution network; reliability; stratification algorithm

(上接第 26 页 continued from page 26)

- [5] 阎钊, 李尔学, 杨仕友 (YAN Tian, LI Er-xue, YANG Shi-you). 10 kV 线路故障测距模拟退火算法应用 (Application of Simulated Annealing Algorithm to Measure Fault Distance of 10 kV Fault Line) [J]. 继电器 (Relay), 1998, 26(5): 14-17.
- [6] 飞思科技产品研发中心 (Feisi Science and Technology Product Center). MATLAB 6.5 辅助神经网络分析与设计 (MATLAB 6.5 Analysis and Design of the Auxiliary Neural Network) [M]. 北京: 电子工业出版社 (Beijing: Publishing

House of Electronics Industry), 2003.

收稿日期: 2003-08-15; 修回日期: 2003-11-11

作者简介:

李振然 (1935 - ), 男, 教授, 从事电力系统自动化、人工智能在电力系统中应用的教学和科研工作;

贾旭彩 (1977 - ), 女, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中应用;

李滨 (1975 - ), 女, 讲师, 研究方向为电力系统优化和人工智能在电力系统中应用。

### Fault location for single-phase-to-earth fault using the combination of wavelet transform and BP neural network

LI Zhen-ran, JIA Xu-cai, LI Bin

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In this paper, the method based on the combination of wavelet transform and BP neural network is presented to realize fault location for the single-phase-to-earth fault in non-direct-ground systems. Because of taking the modal maxima of real and imaginary part of the transient fault current and transient bus voltage as the input of BP neural network, the ability of the fault detection and the reliability are enhanced. The effect of transient resistance on fault location is reduced greatly through special processing of BP neural network. Simulation results show that the proposed method is of precision and reliability.

**Key words:** wavelet transform; BP neural network; single-phase to earth; fault location