

# 基于二维小波分析的配电网单相接地故障选线的一种新方法

刘增训<sup>1</sup>, 梁军<sup>1</sup>, 仇卫东<sup>2</sup>, 负志皓<sup>1</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力工程咨询院, 山东 济南 250013)

**摘要:** 将二维小波分析应用于配电网单相接地故障选线中,通过构造零序电流的解析信号,实现了对故障暂态信号幅值和相位相结合的分析,提出了一种接地选线的新方法。相对于单纯考虑幅值或相位的方法,这种结合分析能够更充分地提取丰富的故障暂态量特征信息。理论分析及 Matlab 仿真表明:该方法可以更加准确有效地实现故障选线。

**关键词:** 配电网; 故障选线; 解析信号; 小波变换; 单相故障

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)09-0001-05

## 0 引言

我国 35 kV 以下配电网中为提高供电可靠性,通常采用包括中性点不接地、中性点经高阻接地和经消弧线圈接地 3 种模式的小电流接地系统。近年来国内外学者在小电流接地故障选线方面做了大量的研究,取得了一定的成果,但准确可靠的检测一直没有得到很好的解决<sup>[1]</sup>。

目前基于系统稳态分量的研究方法,由于小电流接地系统单相接地故障时,故障电流为线路对地电容电流,数值非常小,这一小电流又叠加在较大的负荷电流之上,现有的电流互感器很难检出,现场的各种电磁干扰相对很大,系统运行方式多变,单相接地故障状况复杂,不确定因素多,电弧不稳定等原因,实际选线的可靠性较低。

在发生单相接地故障时,存在一个明显的暂态过程,尤其是暂态接地电容电流往往比其稳态值大几倍到几十倍,此过程包含丰富的故障特征,充分提取这一暂态过程的丰富的特征信息必将大大地提高故障选线的可靠性,且近年来由于高速数据采集与信号处理技术的发展,使得基于暂态信号的检测方法在实际应用中成为可能。

目前的暂态分析方法,多集中于利用小波包变换从能量的角度提取某一个特定频带的方法来分析信号<sup>[2~4]</sup>,而由于配电网发生故障时,存在不同长度的馈线,不同的负荷情况以及不同的故障过渡电阻等,所以,从暂态能量的角度提取某一特征频带的方法,难免会造成误判。

小波变换在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,可以对信号进行精细分析,特别是对暂态突变信号或微弱信号的变化较

敏感。而小波变换在二维情况下除了“显微”能力外还具有“极化”能力,即方向选择性<sup>[5]</sup>。

为充分提取故障暂态信号的丰富的特征信息,本文利用构造出的零序电流的解析信号<sup>[6]</sup>,利用二维小波分析的工具,提出了解决配电网单相接地故障选线的一种新的有效方法。

## 1 解析信号

解析信号的概念是为了直观地描述信号的幅值和相位,且可由相位进一步得到信号的瞬时频率而引入的。对于任意一个实信号  $x(t)$ ,其对应的解析信号  $s(t)$  为:

$$s(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (1)$$

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{t} * x(t) = \frac{1}{t} + \frac{x(\cdot)}{t} d \quad (2)$$

式中:实部  $x(t)$  为原信号,虚部  $\hat{x}(t)$  为原信号  $x(t)$  的 Hilbert 变换;符号“\*”表示卷积。

Hilbert 变换是幅频特性为 1 的全通滤波器:信号  $x(t)$  经过 Hilbert 变换后,其负频率成分作  $+90^\circ$  相移,而正频率作  $-90^\circ$  相移。

在离散情况下借助快速傅里叶变换 (FFT) 来定义解析信号,可得它的另一种表达形式:

$$s(t) = A(t) \exp(j\phi(t)) \quad (3)$$

式中: $A(t)$ 、 $\phi(t)$  分别为解析信号的幅值和相位。进而由解析信号的相位可以定义信号的瞬时频率:

$$v(t) = \frac{1}{2} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

即将信号的瞬时频率定义为解析信号相位的导数。

解析信号  $s(t)$  对应的小波变换  $W_s(a, b) = W_x(a, b) + j\hat{W}_x(a, b)$  仍然是解析信号,其实部  $W_x(a, b)$  为  $x(t)$  依赖于参数  $a, b$  的小波变换;其虚

部  $\hat{W}_x(a, b)$  为  $x(t)$  在尺度  $a$  下小波变换对参数  $b$  的 Hilbert 变换。

对  $s(t)$  进行傅里叶变换可得解析信号的频率特征:

$$S(\omega) = \begin{cases} 2X(\omega) & \omega > 0 \\ 0 & \omega < 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式 (5) 可见解析信号的频谱在正频域除了相位相差常数  $2$  之外, 具有与原实信号相同的频谱; 而在负频域频谱为  $0$ 。这一性质保证了对解析信号进行小波分析划分频域的结果与原实信号的结果是一致的。而且不仅相位谱不变, 幅值频谱增大了一倍, 从而对暂态信号的检测更为有利。

## 2 二维小波变换原理

### 2.1 二维连续小波变换

令  $f(x_1, x_2)$  表示一个二维信号,  $x_1, x_2$  分别是其横坐标与纵坐标;  $\phi(x_1, x_2)$  代表二维的基本小波。则二维连续小波变换可定义为: 令  $a, b_1, b_2(X_1, X_2)$  表示  $(x_1, x_2)$  的尺度伸缩与二维位移, 有

$$a, b_1, b_2(x_1, x_2) = \frac{1}{a} \left( \frac{x_1 - b_1}{a}, \frac{x_2 - b_2}{a} \right) \quad (6)$$

则:

$$W(a, b_1, b_2) = \langle f(x_1, x_2), a, b_1, b_2(x_1, x_2) \rangle = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, x_2) a, b_1, b_2(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = \frac{1}{a} \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, x_2) \left( \frac{x_1 - b_1}{a}, \frac{x_2 - b_2}{a} \right) dx_1 dx_2 \quad (a > 0)$$

式中:  $b_1, b_2$  为基本小波函数在两个维度上的平移值。

### 2.2 二维多分辨率分析及分解算法

考虑二维时空间  $L^2(R^2)$  的可分离多分辨率分析的情况。对于这样的多分辨率分析, 每个向量空间可以分解为两个相同的子空间的张量积, 即

$$V_j^2(x_1, x_2) = V_j^{(1)}(x_1) \otimes V_j^{(1)}(x_2) \quad (7)$$

向量空间  $V_j^2(j \in Z)$  组成  $L^2(R^2)$  的一个多分辨率逼近, 当且仅当  $V_j^2(j \in Z)$  是  $L^2(R^2)$  的一个多分辨率逼近。于是, 尺度函数  $\phi(x_1, x_2)$  可以写成

$$\phi(x_1, x_2) = \phi(x_1) \phi(x_2) \quad (8)$$

式中:  $(x_i) (i=1, 2)$  是多分辨率逼近  $V_j(j \in Z)$  的一维尺度函数。于是  $V_j^2$  的正交归一基为

$$\phi_{j, n_1}(x_1) \phi_{j, n_2}(x_2) = 2^{-j} \phi(2^{-j}x_1 - n_1) \phi(2^{-j}x_2 - n_2) \quad (9)$$

若把  $V_j^2(x_1, x_2)$  的补空间记作  $W_j^2(x_1, x_2)$ , 又设

$(x_i)$  是与  $\phi(x_i)$  相对应的一维小波函数, 则由以下三个“基本小波”

$$\begin{aligned} (1) \quad & \phi(x_1, x_2) = \phi(x_1) \phi(x_2) \\ (2) \quad & \phi(x_1, x_2) = \phi(x_1) \phi(x_2) \\ (3) \quad & \phi(x_1, x_2) = \phi(x_1) \phi(x_2) \end{aligned}$$

作位移和伸缩组成  $W_j^2(x_1, x_2)$  的正交归一基。

由上分析, 二维小波函数通过一维小波函数经过张量积变换得到, 其分解是把尺度  $j$  的低频部分分解成四部分: 尺度  $j+1$  的低频部分和三个方向(水平、垂直、斜线)的高频部分。其基本的分解步骤<sup>[7]</sup>可用图 1 表示。

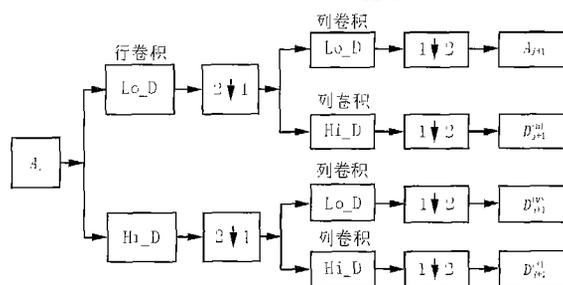


图 1 多尺度二维小波分解图

Fig 1 Flow chart of two-dimensional DWT

其中,  $\boxed{2 \downarrow 1}$  表示列抽样: 保留所有偶数列;

$\boxed{1 \downarrow 2}$  表示行抽样: 保留所有偶数行;  $\boxed{X}$  表示与滤波器进行行(或列)卷积运算,  $X$  可以为 Lo\_D 或 Hi\_D;  $A_j$  表示尺度为  $j$  的低频系数;  $D_{j+1}^{(h)}$  表示尺度为  $j+1$  的水平高频系数,  $D_{j+1}^{(v)}$  表示尺度为  $j+1$  的垂直高频系数,  $D_{j+1}^{(d)}$  表示尺度为  $j+1$  的斜线高频系数。

## 3 故障选线原理

### 3.1 单相接地故障分析

小电流接地系统 in 发生接地故障时, 单相接地暂态电容电流可以看成是如下两个电流之和:

1) 由于故障电压突然降低而引起的放电电容电流, 它通过母线而流向故障点, 衰减很快, 振荡频率主要取决于电网中线路的参数 ( $R$  和  $L$  的数值)、故障点的位置以及过渡电阻的数值。

2) 由于非故障相电压突然升高而引起的充电电容, 主要通过电源而形成回路, 衰减较慢。

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时, 由于消弧线圈的补偿作用, 流过故障点和故障线路的零序电流很小, 而且在过补偿的情况下, 故障线

路的稳态零序电流相位与非故障相一样,由母线流向线路,不能根据相位来判断,此时许多用于不接地系统的选线原理失效,但是由于电感电流不能突变,在故障瞬间,零序电流主要表现为容性,健全线路暂态电流与故障线路暂态电流的相位相反,而与零序电压的起始方向变化方向相同,根据这一特点,利用二维小波变换可以作为故障选线依据。

### 3.2 小波函数的选取

我们把小波应用到小电流接地系统的选线问题,主要利用的是小波分析的信号突变检测能力、分频能力、时频局部化分析能力,最后以信号细节分量的极性为判据,而这些都是多数小波变换所具有的基本特点,因此,我们对小波函数的性能要求并不高。但是,由于该方法针对现场应用,必须保证具体实现的可行性。尤其在出线数较多的情况下,需要尽量减少计算量和对内存的要求。这也是一个制约母小波函数选取的条件。

db $N$ 小波系是工程上应用较多的小波函数,这一小波系的特点是随着序号 $N$ 的增大,时域支集变长,时间局部性变差;同时,正则性增加,频域局部性变好。Harr小波(即db1小波)最大的优点是它很简单,滤波器系数只有两个数,因而大大减少了计算量。同时,对于满足问题解决的小波函数越短,其检测间断点的性能就越突出,通过大量的仿真试验结果,Harr小波可以满足我们的故障选线要求,得到较为理想的结果。因此本文选用Harr小波。

### 3.3 选线算法

首先确定故障发生的时刻,然后对采集到的所有的线路的零序电流进行Hilbert变换,构造出各线路的零序电流的解析信号,利用解析信号的实部和虚部构成二维小波变换的两个变量,通过二维多分辨率分析,得出各尺度上的平滑逼近和细节部分,选取特征最为明显的某一细节部分的各尺度的模值。由于构造的解析信号的实部反映了暂态量的幅值信息,而虚部则反映了暂态量的相位信息,因此本文选取的反映故障后相位特征的垂直高频系数,根据故障线路和非故障线路在此细节部分表现出的模极大值和极性的不同,选出故障线路。信号的采样率取4 kHz。数据窗取5个周期的数据,包括故障前半个周期和故障后4个半周期的数据。

## 4 仿真分析

中性点不接地系统发上单相故障后,故障特征明显,选线较容易。相比之下,中性点经消弧线圈接

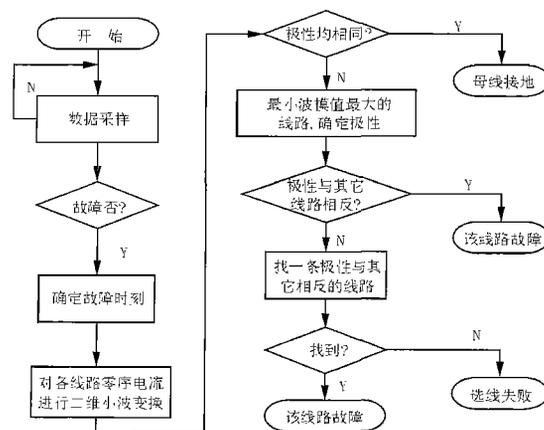


图2 故障选线的流程图

Fig 2 Flow chart of fault line selection

地系统,单相接地故障选线较困难。因此本文采用Matlab中的PSB工具箱,以中性点经消弧线圈接地系统为例,仿真采用的系统结构如图3所示。线路参数为:正序阻抗 $Z_1 = (0.17 + j0.38) / \text{km}$ ,正序容纳 $B_1 = 3.045 \mu\text{s}/\text{km}$ ,零序阻抗 $Z_0 = (0.23 + j1.72) / \text{km}$ ,零序容纳 $B_0 = 1.884 \mu\text{s}/\text{km}$ ,消弧线圈运行过补偿方式,补偿度取7.5%。

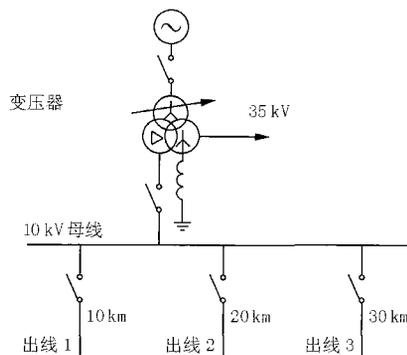


图3 小电流接地系统结构及参数

Fig 3 Structure and parameters of the power system with neutral point ungrounded

仿真算例1为线路1在相电压达峰值时,距母线5 km处接地,故障电阻为10 $\Omega$ 。图4为接地故障后零序电流的仿真图形,图5为经二维小波变换的结果。

仿真算例2为线路3在相电压过零时,距母线25 km处接地,故障电阻为150 $\Omega$ 。图6为经二维小波变换的结果。

仿真算例3为相电压达峰值时,母线A相接地,故障电阻为300 $\Omega$ 。图7为经二维小波变换的结果。

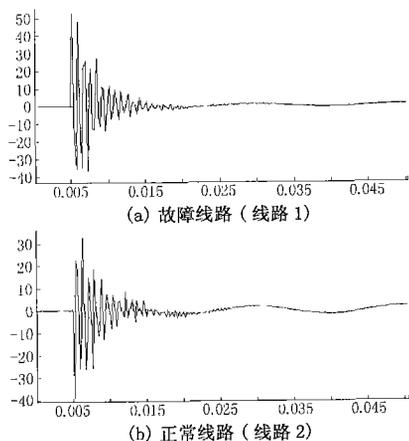


图 4 小电流接地系统零序电流仿真结果

Fig 4 Simulation results of zero-sequence current in power system with neutral-point ungrounded

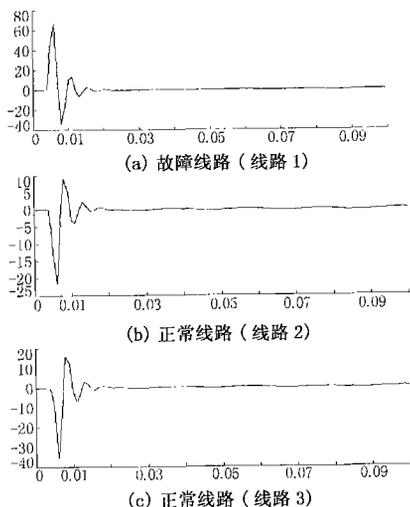


图 5 仿真算例 1 二维小波变换模极大值分析结果

Fig 5 Results of maximal modulus with two-dimensional wavelet transform in case one

可以看出,虽然故障线路和非故障线路在零序电流故障瞬间较为杂乱,经过本文的二维小波变换处理后故障点的模极大值特点非常清晰,表现为如下特征:故障线路的故障瞬间的模极大值点的极性与非故障线路的模极大值点的极性相反;当母线故障时,所有线路故障瞬间的模极大值点的极性相同。根据故障瞬间的二维小波变换模极大值极性的这一特点,可以准确地选出故障线路。

通过对不同长度线路,不同故障时刻,不同故障地点,不同过渡电阻等各种情况的大量的仿真分析表明,本方法可以有效地提取故障特征,能够清晰地选出故障线路。

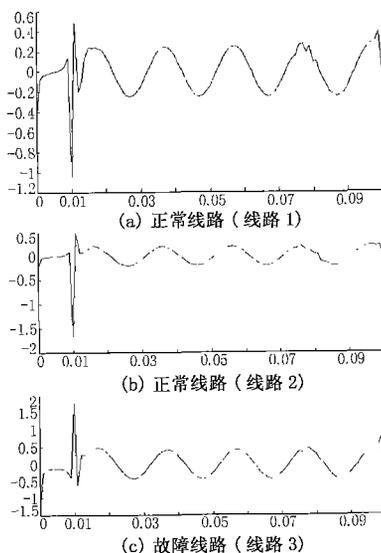


图 6 仿真算例 2 二维小波变换模极大值分析结果

Fig 6 Results of maximal modulus with two-dimensional wavelet transform in case two

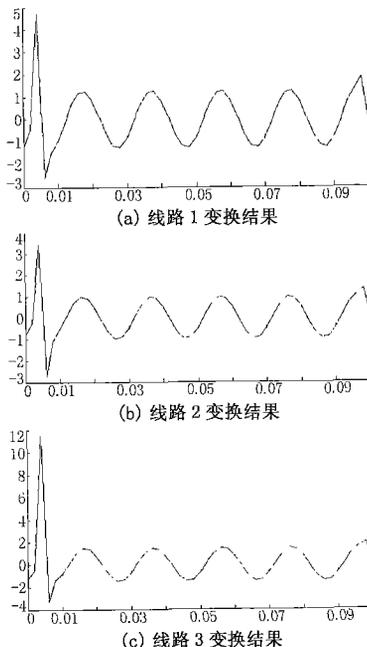


图 7 仿真算例 3 二维小波变换模极大值分析结果

Fig 7 Results of maximal modulus with two-dimensional wavelet transform in case three

## 5 结论

本文将解析信号同二维小波分析相结合,利用解析信号比原信号大一倍的幅值谱和原信号相同的相位谱,结合小波变换可以对信号进行精细分析,特别是对暂态突变信号或微弱信号的变化较敏感的特

点,尤其是在二维情况下除了“显微”能力外还具有的“极化”能力,从而可以更为有效的分析故障后的暂态信号,提取故障特征用于选线。需要指出的是,本文所应用的二维小波分析是一种较为简单的形式,如果充分利用具有旋转能力的小波变换,可以选择最佳的“偏振”方向进行分析,相信将会得到更为理想的结果。

#### 参考文献:

- [1] 马珂,张保会.中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J].继电器,2003,31(5):65-70  
MA Ke, ZHANG Bao-hui Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks[J]. Relay, 2003, 31(5): 65-70.
- [2] 毛鹏,孙雅明,张兆宁,等.小波包在配电网单相接地故障选线中的应用[J].电网技术,2000,24(6):9-13.  
MAO Peng, SUN Ya-ming, ZHANG Zhao-ning, et al Wavelets Packet Based on Detection of Phase-to-ground Fault in Distribution Automation System[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 9-13.
- [3] 张艳霞,陈超英,赵杰辉,等.配电网单相接地故障选线的一种新方法[J].电网技术,2002,26(10):21-24.  
ZHANG Yan-xia, CHEN Chao-ying, ZHAO Jie-hui, et al A New Method of Locating Fault Line Under Single Phase to Ground Fault in Distribution Network[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 21-24.
- [4] 黄景光,吕艳萍.应用小波包构成暂态零序功率分量的消弧线圈接地系统故障选线保护[J].继电器,

2003, 31(6): 1-8

HUANG Jing-guang, L ü Yan-ping Single-phase Fault Detection Based on the Wavelet Packet Analysis of Zero-sequence Power Components in the Petersen-coil Grounded System[J]. Relay, 2003, 31(6): 1-8

- [5] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:中国科学出版社,2000  
YANG Fu-sheng Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 王建曦,李威,冉启文,等.解析信号小波分析及其在电力系统中的应用[J].电力系统自动化,2000,24(22):28-31.  
WANG Jian-xi, LI Wei, RAN Qi-wen, et al Wavelet Transform of the Analytic Form of Signal and Its Application in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 28-31.
- [7] Mallat S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.

收稿日期: 2004-08-10; 修回日期: 2005-01-13

#### 作者简介:

刘增训(1979-),男,硕士,主要从事配电网故障检测方面的研究;E-mail: liuzengxun@mail.sdu.edu.cn

梁军(1956-),男,博士,教授,主要从事电力系统运行与控制领域的研究;

仇卫东(1972-),男,硕士,主要从事电力系统规划与设计方面的研究。

### A new single-phase earth fault detection method based on two-dimensional wavelet transform in distribution automation system

LIU Zeng-xun<sup>1</sup>, LIANG Jun<sup>1</sup>, QU Wei-dong<sup>2</sup>, YUN Zhi-hao<sup>1</sup>

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Electric Power Engineering & Consulting Institute, Jinan 250013, China)

**Abstract:** A novel method of applying two-dimensional wavelet transform to detect single-phase fault in distribution system is proposed. By structuring analytic signals of zero-sequence current, the analysis of combining amplitude and phase of fault transient signals is realized. Compared with the use of single amplitude or single phase, applying combined signal can obtain more details of transient signal. Theoretical analysis and Matlab based simulations show that the presented method can exactly and effectively choose the fault line in single phase-to-ground fault.

**Key words:** distribution systems; fault line selection; analytic signals; wavelet transform; single-phase fault