

小电流接地电网单相接地故障的小波选线方法

贾清泉¹, 肖鹏¹, 杨以涵¹, 刘连光¹, 宋家骅²

(1. 华北电力大学, 北京 100085; 2. 东北电力学院, 吉林 132012)

摘要: 中性点非有效接地配电网发生单相接地故障时, 尽快选出故障线路对电网运行有重要意义, 但选线问题迄今尚未能很好解决。在分析了小电流接地电网发生单相接地时暂态特征的基础上, 提出应用小波变换提取故障暂态信息, 实现故障选线的方法。由于利用暂态量, 该方法适应性、灵敏性均优于现有的基于稳态量方法。

关键词: 小电流接地电网; 故障选线; 小波分析; 暂态特性

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)03-0005-04

1 引言

中压配电网中性点一般采用不接地或经消弧线圈接地方式, 称为小电流接地电网。小电流接地电网发生单相接地故障时不形成短路回路, 只是经线路对地电容形成较小电流通路, 电网线电压仍然对称, 允许维持运行一段时间。由于配电网的绝大部分故障为单相接地故障, 而且很多是瞬时性的, 所以小电流接地电网可以极大地提高供电可靠性^[1]。但小电流接地电网发生单相接地故障时, 非故障相对地电压将有不同程度的升高, 而且间歇性弧光接地可能引起电弧接地过电压, 对系统绝缘有威胁, 容易扩大为相间短路, 因此应尽快确定故障线路, 尽快排除故障。

故障选线的传统方法是逐线拉路, 虽然选线很可靠, 但对电网运行存在很多不利因素。80年代以来人们开始探索应用微机选线, 提出各种选线原理^[2,3], 并研制出在线自动选线装置。这一代选线装置选线的基本依据是单相接地产生的稳态零序电流, 并由此衍生出各种选线方法。由于小电流接地电网单相接地故障产生的故障电流很小, 有时可能接近于零序CT容许下限值, 测量误差较大; 另一方面, 对于架空线路, 由于零序滤波器三相不对称而在二次侧产生的不平衡电流作为工频干扰, 量值上可能与故障零序电流相当, 难以彻底清除; 对于消弧线圈接地电网, 基波成分不再满足选线判据, 一般采用五次谐波, 而五次谐波量值更小而且不确定。这些原因导致现有选线装置选线正确率极低, 几乎不能满足现场需要。因此, 进一步探索有效的选线方法是十分必要的。

由于故障初期暂态过程电流通常较大, 更容易测量, 而且暂态量频率较高, 消弧线圈相当于开路,

对暂态量不起作用。所以开发利用故障暂态信息进行选线有一定优势。本文出于这种考虑, 提出用小波变换提取故障暂态信息, 实现故障选线的方法, 并通过EMTP仿真和MatLab提供的小波分析工具对该方法进行了验证。

2 小电流接地系统单相接地故障暂态特性分析

小电流接地系统发生单相接地故障可以用图1电路表示。系统正常运行时A点对地电压为 u_n , 当发生单相接地故障时相当于K闭合, 与 u_n 大小相等、方向相反的电压源 $-u_n$ 串联故障电阻接入系统。根据叠加原理, 可以把故障后的电气量分解为由对称三相电源作用产生的正常分量, 和由故障等效电源的投入而产生的故障分量。所以, 故障分量实际上是一个分布参数电路的零状态响应过程。

对于小电流接地系统, 故障分量由接地故障点经各条线路对地电容构成回路。由于线路分布电感、电容的存在, 在故障暂态分量中含有多种频率成分。其中较高频带成分是线路局部参数作用产生的, 这些成分可能在正常线路与故障线路之间形成回路, 也可能在几条正常线路之间形成回路, 具有不确定性, 不能用做选线依据。较低频带成分是系统各条线路与故障点形成的整个故障回路中参数作用产生的, 这些成分是由正常线路经故障线路及线地电容形成通路。因此, 低频带故障暂态分量在故障线路上的强度要大于在非故障线路上的强度而且方向相反, 据此可作为选线依据。

小波变换是分析非平稳信号、提取信号暂态特征的一种有效信号处理方法, 近年来在各个领域得到广泛重视和应用。本文利用小波分析工具将故障

信号经小波变换投影到各尺度空间上,再把低频空间成分提取出来,并进行大小和方向的比较,构成选线判据。

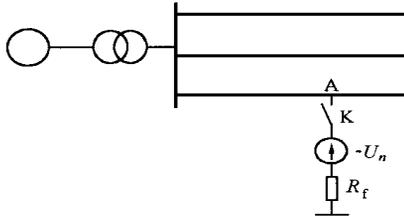


图1 单相接地故障等值电路

3 故障暂态量的小波分析与选线方法

3.1 小波简介

小波变换思想源于傅立叶变换,两者都是将被分析信号同一族参考函数作相关度运算,被分析信号与参考函数越相似,相关度越大,变换系数也就越大。同傅立叶变换不同的是,小波变换的参考函数不局限于复指数函数,可以有多种选择,只要满足具有时域和频域局部性即可。

若函数 $f(t)$ 满足:a)平方可积 b)容许性条件 (1)式

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

则该函数称为母小波。母小波必须是非零域有限或近似有限,且具有零均值的波动函数。由母小波经伸缩和平移而张成的一列子函数

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

称为小波基函数。小波变换定义为

$$Wf(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3)$$

尺度 a 增大或缩小,导致母小波被拉长或压缩,波动频率随之改变,再作用到被分析信号上,得到被分析信号在该频段空间上的映射值(即小波系数),从而达到分析信号的目的。

Mallat 和 Meyer 等人从不同尺度间信息增量表示方法出发,运用多分辨率分析思想,并结合数字滤波器理论,提出正交小波变换的一种塔式结构快速算法,称为 Mallat 算法。Mallat 分解算法可表示为图 2。原始序列 f 认为包含信号的全部信息, h 、 g 分别为高通和低频数字滤波器, f 经 h 、 g 滤波后分别得到高频细节系数 d_1 和低频逼近系数 a_1 ,二抽取后对 a_1 再经 h 、 g 滤波得到下一尺度的细节系数 d_2 和逼近系数 a_2 。这种算法可根据需要依次进行。

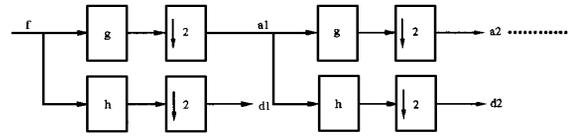


图2 Mallat 算法示意图

正交小波的 Mallat 算法优点是运算简单,速度快,信息无冗余,缺点是变换不具有线性相位。我们这里应用小波变换的目的是提取有用信息,并在小波域内对结果进行比较,不涉及信号重构,对线性相位性没有要求,所以可以采用快速算法。

3.2 小波选线方法

选线的原始信号从零序电流互感器或零序电流滤过滤器获得。选线过程如下:

(1)以故障点数据为中心,取其前后各三个周波左右的数据作为分析的数据窗,用 Mallat 算法对各条线路零序电流进行小波分解,根据信号的采样率,将信号分解到某一最大尺度,使该尺度细节分量中恰不含工频分量,得到细节系数 d_{1k} 、 d_{2k} 、 d_{3k} 、...、 d_{mk} ,其中 m 为分解的最大尺度, k 为线路编号。

(2)给母线及每条线路分别设置一个故障标志 $fs(k)$, k 为线路编号($k=0$ 表示母线),并令初值为零。

(3)设定一阈值(一般可取 $\lambda=0.2 \sim 0.4$)。从最大尺度(第 m 尺度)开始,对各条线路小波变换满足 $|d_{mk}(i)| > \lambda$ 的细节分量值取出并进行逐点比较,在各点处找出小波变换模值最大的前三条线路,若其中一条线路小波变换值与另外两条异号,则相应线路故障标志 $fs(k) = fs(k) + 1$;若三者均同号,则母线故障标志 $fs(0) = fs(0) + 1$;若满足阈值条件的线路数小于 3 条,则相应点认为无效,不进行上述判断。再对 $m-1$ 尺度按上述原则进行判断,故障标志继续累加。

(4)经 m 尺度和 $m-1$ 尺度比较后得到母线及各条线路故障标志值,其中故障标志最大者对应的线路既为故障线路。

3.3 算法的几点说明

3.3.1 小波函数的选取

在小波分析中,小波母函数的选择具有多样性。这一方面为针对不同问题选择不同小波提供了灵活性,另一方面也增加了应用小波处理问题的多样性和主观性。目前尚没有一个公认的原则来选择小波母函数及最佳小波基,实际中可采用定性分析结合试验比较的办法。 dbN 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。对于本文的应用,时间局部性要求不很严格,只要时窗不过大就可以,而频率局部性要求较高,以获得较准确的低频暂态成分,防止频域混叠。根据问题的需要,并考虑到计算量,通过采用多种小波进行多次仿真计算,证明 $db15$ 小波效果较为理想。所以,本文选用 $db15$ 小波,小波波形如图3。

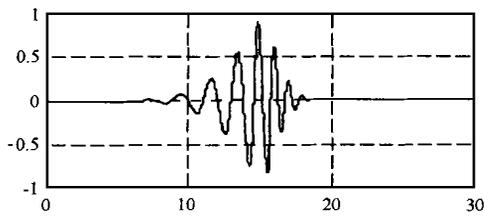


图3 $db15$ 小波函数近似波形

3.3.2 小波变换边界的处理

在数据窗的边界上,小波变换会当成突变点处理,使得各尺度分量在边界附近出现较大值,产生边界效应,影响选线结果。简单处理办法是把被分析信号的数据窗开得足够大,保证小波域内边界效应与实际故障产生的尺度分量无重叠,再把边界值清除即可。

4 EMTP 仿真分析

本文通过 EMTP 仿真了小电流接地电网各种单相接地故障状况,并借助 MatLab 提供的小波分析工具对仿真结果进行了分析;另外,还通过动模实验

记录了一些数据,用该方法进行了验证。结果表明该方法确实是有效的。限于篇幅,这里只给出部分仿真结果。

仿真对象为具有5条线路的10kV系统,线路正序参数: $R_{0p} = 0.17 \Omega/\text{km}$, $L_{0p} = 7.6 \text{ mH}/\text{km}$, $C_{0p} = 0.061 \mu\text{F}/\text{km}$; 零序参数: $R_{0z} = 0.23 \Omega/\text{km}$, $L_{0z} = 34.4 \text{ mH}/\text{km}$, $C_{0z} = 0.038 \mu\text{F}/\text{km}$; 变压器电抗 $X_T = 11.18 \Omega$, 电压 110/10kV; 线路长度分别为 $D1 = 18\text{km}$, $D2 = 43\text{km}$, $D3 = 11\text{km}$, $D4 = 16\text{km}$, $D5 = 3\text{km}$ 。小波算法中,采样率为 3200Hz,用 $db15$ 小波按快速算法进行小波分解,分解到第四尺度。

仿真1:线路1在6km处A相电压达负最大值时刻(0.01s)发生A相接地故障,故障电阻 $R_f = 20 \Omega$ 。故障线路1和正常线路2零序电流波形如图4(a)。限于篇幅,图4(b)、(c)、(d),只给出具有代表性的故障线路1和长线路2及短线路5在第四尺度上小波细节系数。在尺度4上,由图4(b)、(c)、(d)可以看出:对于几个数值较大的点,故障线路1上的值均大于其它线路的值,且符号相反。按本文方法判断,取 $\theta = 0.2$,则求得故障标志 $f_s(1) = 7$,而其它线路故障标志均为零。

仿真2:故障电阻增大为 $R_f = 5\text{k}\Omega$,其它条件同情况1相同。若取阈值 $\theta = 0.2$,结果为:在尺度4上只有一个点满足阈值条件,其值为 $d1 = -1.0056$, $d2 = 0.6497$, $d4 = 0.2307$,尺度3上没有点满足阈值,但仍可判定线路1故障。由于参与比较的数据已经过阈值筛选,所以即使只有一个点能够进行比较,结果还是有一定可信度。

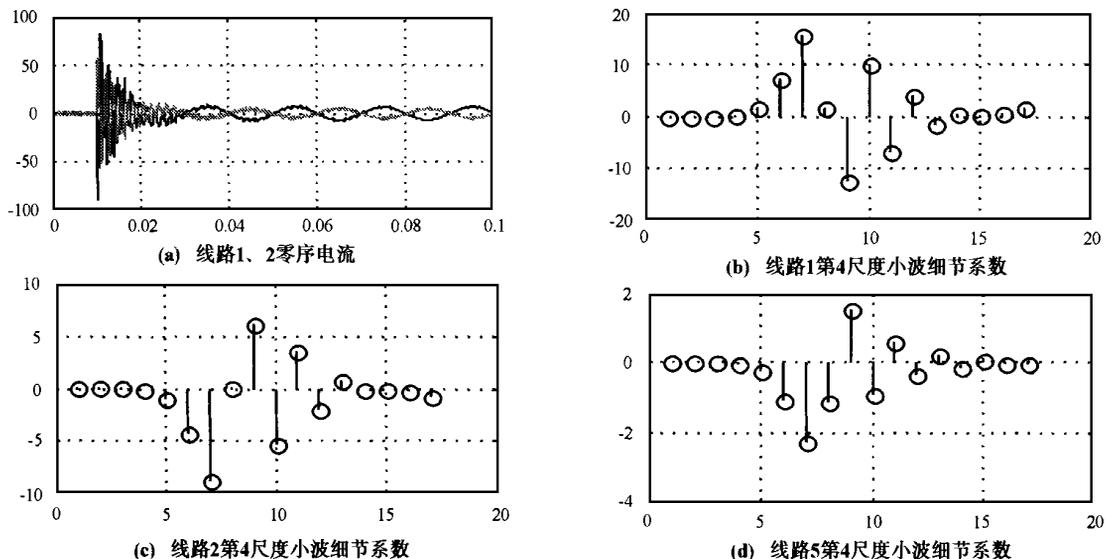
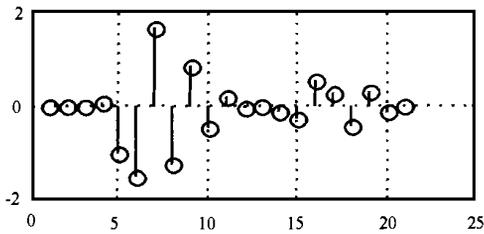


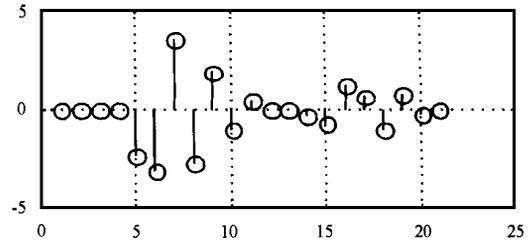
图4 线路1发生单相接地($R_f = 20 \Omega$)零序电流波形及小波变换系数

仿真 3: 母线发生单相接地故障, $R_f = 500$ 。图 5 给出线路 1~4 在小波变换第四尺度上的值, 可以

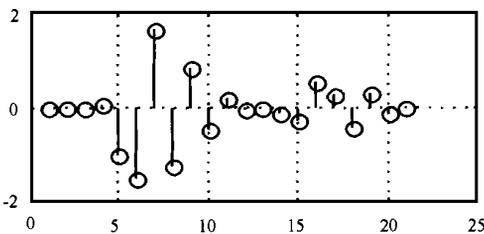


(a) 线路 1 第 4 尺度小波系数

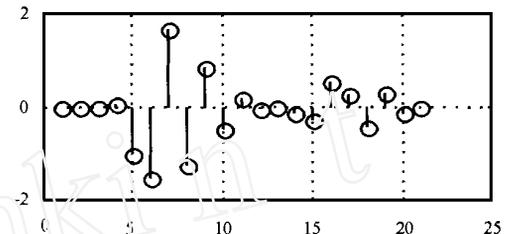
看出, 它们的小波系数变化规律相同, 母线故障标志 $f_s(0) = 6$, 最大, 判定为母线故障。



(b) 线路 2 第 4 尺度小波系数



(c) 线路 3 第 4 尺度小波系数



(d) 线路 4 第 4 尺度小波系数

图 5 母线故障时各线路小波变换系数

5 结 论

小电流接地电网单相接地选线是多年来一直未能很好解决的一个难题。充分利用故障信息, 综合多种选线方法是解决这一问题的有效途径。小波分析作为一种尚处于发展之中的现代信号处理方法, 应用在小电流接地选线这种可靠性、实时性要求不很高的场合, 是一种现实的、有益的尝试。本文提出应用小波变换分析小电流接地电网单相接地故障暂态特征, 识别故障线路, 使选线所利用的故障信息扩大到暂态。该方法适应性强、灵敏度高、容易实现, 是对传统选线方法的可利补充。

参考文献:

[1] 要焕年. 论城市电网接地方式的发展. 中国电力, 1993, (8).

- [2] 郝玉山, 杨以涵. 小电流接地群体比幅比相原理. 电力情报, 1994, (2).
- [3] 檀国彪, 等. 基于最大 I_{sin} 或 I_{sin} 原理的微机选线装置. 中国电力, 1995, (7).
- [4] Robertson D C, Camps O I, Mayer J S, etc. Wavelets and electromagnetic power system transient. IEEE Trans on PWRD, 1996, (2): 1050 ~ 1058.
- [5] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying. IEEE Trans on PWRD, 1996, (3): 1301 ~ 1308.

收稿日期: 2000-08-22

作者简介: 贾清泉 (1970 -), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网故障检测与配电自动化; 肖鹏 (1976 -), 男, 博士研究生, 研究方向为小波理论在电力系统中的应用及电力市场; 杨以涵 (1927 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域有人工智能在电力系统中的应用、电力市场等。

Wavelets method to select single phase faulted circuit for small current grounding power systems

JIA Qing-quan¹, XIAO Peng¹, YANG Yi-han¹, LIU Lian-guang¹, SONG Jia-hua²

(1. North China Electric Power University, Beijing 100085, China; 2. Northeast China Electric Power Institute, Jilin 132012, China)

Abstract: When phase to earth fault occurs on a neutral non-direct grounded power system, it is necessary to select the faulted circuit quickly, but so far this has not been done very well. This paper gives a brief analysis firstly to fault transient characteristics of these kinds of system, and then presents a novel fault circuit selecting method. The proposed method utilizes wavelets transform to obtain useful fault transient components, and therefore is superior in adaptability and sensibility to currently used methods in which steady state components are based.

Key words: small current grounding power systems; fault circuit selection; wavelets analysis; transient characteristic