

小波理论在直流系统接地故障检测中的应用

李冬辉, 史临潼

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 分析了低频信号注入法, 并且针对其缺陷提出了基于小波变换的检测方案。即当接地故障发生后, 向直流系统正负母线注入低频正弦电压信号, 利用套在各支路的电流互感器检测出支路中的低频电流信号, 通过小波变换算法从中提取出与注入信号同频的正弦电流信号。计算出该电流信号中的阻性分量即可求得该支路的接地电阻值, 从而可以判断出故障支路。该文讲述了将小波分析应用于直流系统接地故障检测的基本过程和主要结果, 并通过大量的数值仿真和实际的实验研究验证了基于小波变换的直流系统接地检测方法的可行性。

关键词: 直流系统; 直流感地故障; 复值小波变换; B 样条小波

中图分类号: TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)21-0029-05

0 引言

发电厂、变电站的直流系统是电力系统中非常重要的工作电源, 它为电气、热工、自动装置、继电保护、事故照明、通讯等二次设备提供电源。这些二次设备的正常工作对于保障发电厂、变电站的安全运行十分重要, 因此, 要求其工作电源——直流系统及其网络具有高度的可靠性。

为了保障直流系统的安全可靠运行, 必须对其绝缘情况进行连续监视, 对其中的薄弱环节做出预测。当某一点出现接地故障时, 立即发出报警信号提示工作人员查找并排除接地故障。从全国来看, 各电网对直流系统接地点的探测工作越来越重视, 因此, 相应的研究工作也就显得日益重要起来。本文正是基于这样的背景展开对直流系统接地故障检测方法的相关讨论。

1 低频信号注入法

1.1 方法的原理

低频信号注入法的原理框图如图 1 所示。正常情况下, 由电桥电路^[2]对直流系统正负母线对地绝缘电阻进行连续监测, 一旦发现母线绝缘电阻低于某一界限值时(一般小于 20 k Ω 时, 认为出现接地故障^[2]), 启动低频信号源, 向电网注入低频信号, 并通过套在每个支路上的电流互感器检测各支路的电流信号; 无故障支路低频信号为零, 故互感器输出为零; 对于发生接地故障的支路(如图 1

中的支路 n), 其电流互感器则可以检测到一个由低频信号源通过接地电阻产生的低频电流, 根据欧姆定律可以很快计算出该支路的接地电阻值, 从而判断是否真的接地。

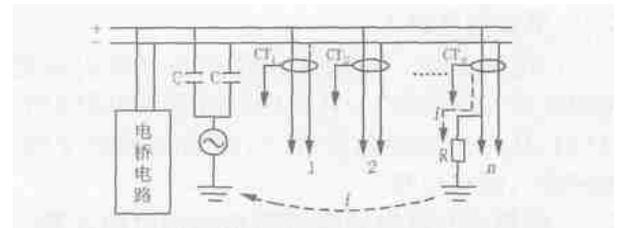


图 1 低频信号注入法原理框图

Fig. 1 Block diagram of low frequency signal injection

1.2 方法的缺陷

理论上采用低频信号注入法可以很好地进行接地故障检测, 但是在实际的应用中, 这种方法却存在很大的问题。

- 1) 直流系统各支路存在较大的对地电容。
- 2) 环网方式会造成支路中存在由环网而产生的谐波环流。
- 3) 直流系统的直流电源会产生纹波电压。
- 4) 各种干扰。

以上是低频注入法致命的缺陷, 如果不做改进则不能准确测量出故障线路的接地电阻电流, 从而导致误选。

2 基于复值小波变换的接地故障检测

为了克服上述缺陷对低频信号注入法的影响, 本文提出应用在低频信号注入法的基础上的一种基于复值小波变换^[8]的改进方法, 去除干扰, 并从采样

得到的支路电流信号中提取出低频电流相量,最终就可以计算出各支路的接地电阻值,从而判断出故障支路。具体步骤如下。

2.1 总体方案

本文以低频电流注入法为全文的基础,在此基础上用小波变换的方法提取出低频信号,然后计算接地电阻,进行故障选线。流程图如图 2 所示:



图 2 检测方案

Fig. 2 Schemes of fault detection

2.2 低频信号注入

由电桥电路^[2]对直流系统正负母线对地绝缘电阻进行连续监测,一旦发现母线绝缘电阻小于 20 k 时,认为出现接地故障^[21],启动低频信号源,向电网注入低频信号。

2.3 低频信号源电压幅值和初始相位的计算^[7]及电流同步采样

要计算各支路的接地电阻值,首先要准确获得所用低频信号发生器加载到直流电网正负母线上的电压幅值和相位。

各支路互感器中的电流经过多路开关采样做后续处理。

2.4 支路电流预处理

理想情况下,故障支路的电流信号由低频电压源通过接地电阻产生。但是由于环网谐波电流、纹波电压及各种干扰,故障后支路电流的成分比较复杂,除了含有有用的低频特征信号外,还包括基波分量、多次谐波分量和噪声干扰。对于这样一个信噪比较低的混合信号,在进行低频分量提取前,需进行预处理,以滤除高次谐波分量和部分噪声干扰。

基于 3 次 B 样条小波的支路电流采样信号预处理:

1) B 样条小波

1 阶 B 样条函数的定义:

$$N_1(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & t < 0, t \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: N_1 为 $[0, 1]$ 区间的特征函数。其傅里叶变换为:

$$\hat{N}_0(\omega) = F[N_0(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} N_0(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{1 - e^{-j\omega}}{j\omega} = \frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} e^{-j\omega/2} \quad (2)$$

利用卷积的方法可以使它光滑,这就是由 B 样条函数构造小波函数的原理。 m 阶基数 B 样条函数的定义为:

$$N_m(x) = (N_{m-1} * N_1) = \int_0^1 N_{m-1}(x-t) dt, m \geq 2 \quad (3)$$

在频域中有:

$$N_m(\omega) = N_0(\omega) \times N_{m-1}(\omega) = [N_0(\omega)]^{m+1} = \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} e^{-j\omega/2} \right]^{m+1} \quad (4)$$

当 $m = 3$ 时,相应的滤波器系数为:

$$\begin{cases} h_{-1} = 0.125; h_0 = 0.375; h_1 = 0.375; h_2 = 0.125 \\ g_0 = -1.0; g_1 = 1.0 \end{cases}$$

式中: h 为低通滤波函数; g 为高通滤波系数。

利用 Mallat 塔式算法可以将信号分解为不同频带上的分量,分解算法如下:

$$c_1(n) = \sum_k h_{k-2n} c_0(k) \quad (5)$$

$$d_1(n) = \sum_k g_{k-2n} c_0(k)$$

式中: $c_0(n)$ 为采样信号。重构算法如下:

$$c_N(n) = \sum_k h_{n-2k} c_{N+1}(k) + \sum_k g_{n-2k} d_{N+1}(k) \quad (6)$$

式中: N 为分解层数。

当以频率 1 000 Hz 对支路电流采样时,根据采样定理,离散采样信号所能反映的最高频率为 500 Hz。利用公式(5)做一次小波分解,得到的系数 $c_1(n)$ 反映 0~250 Hz 的信号分量, $d_1(n)$ 反映 250~500 Hz 信号分量;同理,对 $c_1(n)$ 再做一次小波分解,所得系数 $c_2(n)$ 反映 0~125 Hz 信号分量, $d_2(n)$ 反映 125~250 Hz 信号分量。如果将 $d_1(n)$ 和 $d_2(n)$ 置零,再由公式(6)进行重构,重构出的信号中就只包含 0~125 Hz 频率分量,原始支路电流信号中的高频噪声和高次谐波分量将被滤除。

2) 仿真计算

设支路电流信号包括幅值为 6 mA,初相位为 $5/12$ 的 30 Hz 低频信号;幅值为 10 mA,初相位为 $1/6$ 的基波信号(工频干扰分量);幅值分别为 3 mA、2 mA、4 mA,初始相位分别为 $1/5$ 、 $1/3$ 、0 的 2、3、4 次

谐波信号以及零均值的白噪声干扰信号。原始信号的组成如图 3 所示:

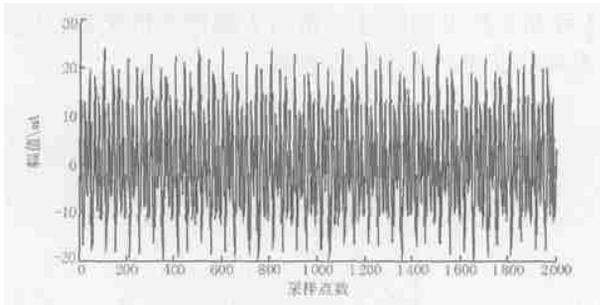


图 3 支路原始信号

Fig. 3 Original signal of the branch

经过 3 次 B 样条小波滤波处理(做 2 尺度分解)后的支路电流波形如图 4:

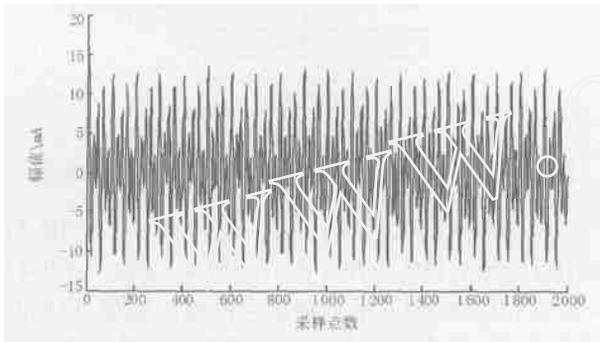


图 4 预处理后的信号

Fig. 4 Branch signal disposed by B-spline wavelet

对比上面两图可以看出,经过滤波预处理后的支路电流与原始信号相比显得简洁、清晰,减少了许多毛刺。这是因为通过滤波,高频噪声和 3 次、4 次谐波分量已基本被滤除。

2.5 复值小波提取低频电流分量

2.5.1 复值小波

复值小波在时域和频域具有良好的局部性,其在频域具有的狭窄的带通特性,可以通过相应的小波变换从复杂的原始信号中提取出我们所关心的某一频率信号的幅值和相位信息。

本文采用一种经过调制的阻尼函数作为小波母函数^[31],其时域、频域形式(如图 5(a)、5(b))分别如下:

$$\text{时域 } \psi(t) = 1 / (1 + |t| + \frac{1}{2} t^2) e^{-|t|} e^{j \omega t} \quad (7)$$

$$\text{频域 } \Psi(\omega) = \frac{6^5 - 2^3 (\omega - \omega_0)^2}{\Gamma^2 + (\omega - \omega_0)^2} \quad (8)$$

该小波母函数作伸缩、平移引出的小波基为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (9)$$

其中: a 称为尺度因子, b 称为平移因子。

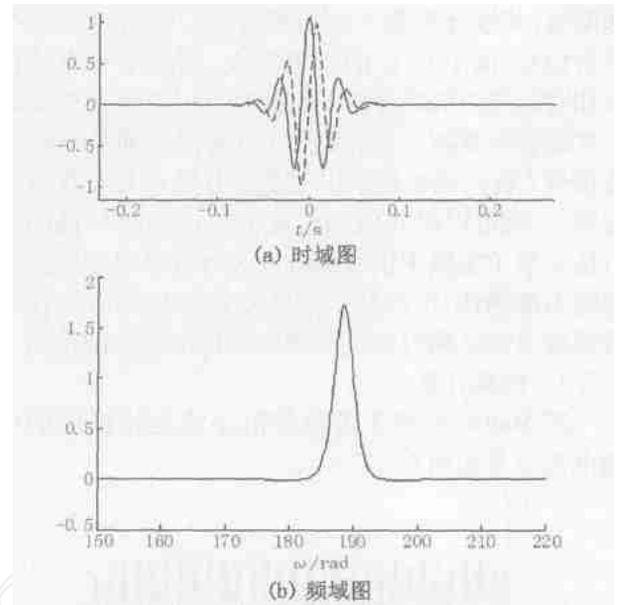


图 5 时域及频域图

Fig. 5 Time domain and frequency domain

对于能量有限信号 $s(t)$, 其小波变换为

$$WT_f(a, b) = \int_a^R s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

其中,为了使 $1/a$ 等于所关心的频率 f , 令 $\omega_0 = 2\pi f$ 。同时,通过小波函数的必要条件 $\int \psi(t) dt = 0$, 可以计算出阻尼因子 $\Gamma = 2\sqrt{3}$ 。实际应用中对于测量到的离散信号 $s(nT)$, T 为采样周期, 其小波变换可以通过“黎曼和级数”计算。对于特定的频率 f , 令 $b = kT$, 则信号 $s(nT)$ 的小波变换变为:

$$W_s(kT, f) = \sum_n s(nT) \sqrt{f} \psi[f(nT - kT)] T \quad (11)$$

该式表示小波变换对采样信号 $s(nT)$ 中频率为 f 的分量在 kT 时刻的刻画。序列 $\{W_s(kT, f)\}_k$ 包含了此分量的幅值和相位的全部信息, 可以由其提取该分量的相量特征。对于式(11), 文献[3]给出了递归算法, 大大减少了计算量, 满足实时性的要求。

2.5.2 谐波分量的提取

由于环网的存在使得直流系统支路电流中谐波成分大大增加, 低频分量与之相比相对减弱, 信噪比降低。这种情况下, 直接提取低频分量会产生困难, 提取的结果也不够精确。为此, 可以采用先提取支路电流谐波分量, 然后消去的间接方法。通过 3 次 B 样条小波滤波处理后, 噪声与 3 次及以上谐波被滤除, 剩下的主要成分是低频电流分量和基波分量, 也可能含有二次谐波分量。不妨设其为 $i_h(t)$,

$i_h(t) = i_d(t) + i_1(t) + i_2(t)$, 其中 i_d, i_1, i_2 分别为低频电流, 基波分量和二次谐波分量。针对这样一个混合信号, 由于 i_1, i_2 的幅值较大, 因此不宜直接提取相对较弱的低频分量 i_d 。此时可以改为首先提取二次谐波和基频分量, 用经过滤波预处理的支路电流信号 $i_h(t)$, 减去提取出的基波分量 i_1 和二次谐波分量 i_2 , 就可以得到低频电流 i_d 。这样的一种间接方法克服了支路中谐波成分太大时直接提取低频分量的不准确性, 使得基于小波变换的检测方法在直流系统出现环网时也能准确完成接地故障的检测。

2.5.3 仿真计算

用 Matlab 对图 3 进行复值小波变换提取的低频电流信号如图 6。

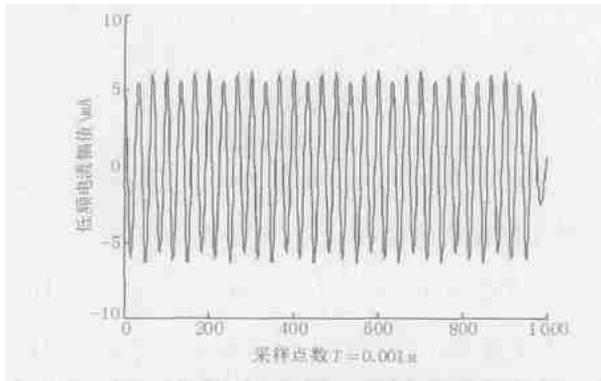


图 6 复值小波变换提取的低频电流波形

Fig. 6 Low frequency signal extracted by damped complex wavelet transform

利用傅里叶算法可计算出所提取的 30 Hz 低频电流的幅值和相位见表 1。

表 1 计算得到的幅值、相位及误差值

Tab. 1 Errors of amplitude and phasor of the two methods

项目	幅值/mA	相位/rad
给定值	6	1.309 0
复值小波	5.854 4	1.309 4
幅值误差	2.4 %	——
相位误差	——	0.030 %

由表 1 的仿真结果可以看出, 通过复值小波变换提取的低频电流相位非常精确, 虽然幅值误差相对来说较大, 但是可以接受。相位误差小是因为复值小波具有线性相位特性, 它可以准确保持原信号的相位信息, 所以, 经过小波变换后相位改变很小。造成幅值误差较大的原因有多种多样, 有滤波过程中频带能量泄漏造成的影响, 也有小波变换算法和傅里叶算法产生的误差。

2.6 接地电阻的计算

在得到低频电流的幅值和相位后, 根据向量图 7 可知支路电流阻性分量与支路电流的关系, 按照图 8 的步骤来计算接地电阻。

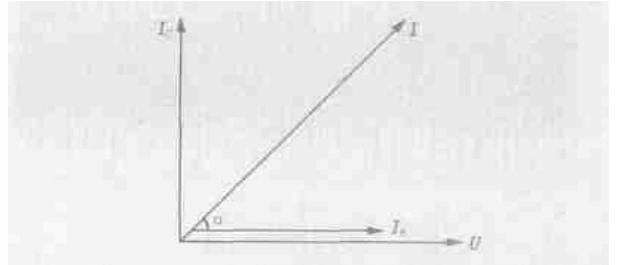


图 7 接地支路电流向量图

Fig. 7 Current vector of grounding branch

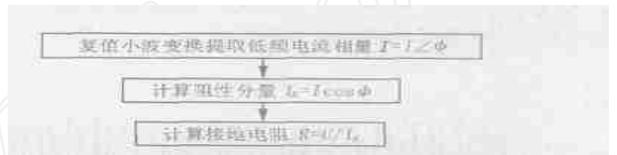


图 8 原理图

Fig. 8 Block diagram of grounding resistance calculation

低频电流表示为: $I = I \angle \phi = 5.854 4 \angle 1.309 4$, 其阻性电流分量 $I_R = I \cos \phi = 5.854 4 \cos(1.309 4) = 1.513 0$ mA, 知道了低频信号的电压幅值, 根据欧姆定律, 接地电阻 $R = U / I$, 并最终计算出该支路的接地电阻值。计算出每条支路的接地电阻值后, 与作为判断接地故障标准的阻值相比较, 就可以找出故障支路。

3 结论

小波分析能够准确反映特定频率信号的幅值和相位信息, 因而适用于信号特征的提取。复值小波具有优异的窄带滤波特性, 对于本文所述的直流接地故障检测问题, 能准确提取出低频电流相量, 从而可以通过计算各支路接地电阻值的方法来检测故障支路, 避免了直流系统中对地电容对检测结果的影响。本方法通过多次仿真结果, 证明其选线的准确性。

参考文献:

[1] 张次衡 (ZHANG Ci-heng). 直流系统接地检测装置存在的问题 (Problem Existing on DC System Grounding Fault Monitoring Device) [J]. 中国电力 (Electric Power), 1996, 29 (7): 64-66.

[2] 李冬辉, 蔡旭, 邹宝兰 (LI Dong-hui, CAI Xu, ZOU Bao-lan). 微机直流系统绝缘监视装置及测量方法的研究

- (Research on Insulation Monitoring Device and Measuring Method for DC System Based on Microcomputer) [J]. 电子测量与仪器学报 (Journal of Electronic Measurement and Instrument) ,2000,14(3) :37-39.
- [3] 何建军,任震,黄雯莹 (HE Jian-jun, REN Zhen, HUANG Wen-ying). 电力系统奇异信号的复值小波分析 (Complex Wavelet Analysis for Singular Signals of Power System) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1999, 19(11) :33-38.
- [4] Lobos T, Rezmer J. Wavelet Transform for Real-time Estimation of Transmission Line Impedance Under Transient Conditions[J]. Electrical Engineering, 2002, 84 :63-70.
- [5] Liang J, Yun Z H, Liu F F. A Method of Fault Line Detection in Distribution Systems Based on Wavelets [J]. IEEE Power System Technology, 2002, 4 :2635-2639.
- [6] Lobos T. Nonrecursive Methods for Real-time Determination of Basic Waveforms of Voltages and Currents [J]. IEEE Proceedings, 1989, 136(6) :347-351.
- [7] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelet :A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3) :1301-1308.
- [8] Liang J, Elangovan S, Devotta J B. A Wavelet Multiresolution Analysis Approach to Fault Detection and Classification in Transmission Lines [J]. Electrical Power & Energy System, 1998, 20(5) :327-332.

收稿日期: 2004-03-08; 修回日期: 2004-05-14

作者简介:

李冬辉(1962 -),男,博士、副教授,主要从事电力电子应用、计算机控制、楼宇自动化等方面的研究; E-mail: li-dong-hui@sohu.com

史临潼(1979 -),女,硕士研究生,主要从事电力系统、楼宇自动化方面的研究。

Method for detecting DC system grounding fault based on wavelet transform

LI Dong-hui, SHI Lin-tong

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The paper analyzes the method of low frequency signal injection, which is usually used to detect DC system grounding fault, and advances the method based on wavelet transforms. That is when the grounding fault occurs, the sine voltage signal with low frequency is injected into the positive bus and the negative bus, the current signal existed in each branch is detected by the current transformer that is installed on the top of the branch, and the complex wavelet transform algorithm extracts the sine current signal that has the same frequency with the injected signal from each branch current. After the value of the resistance current that is included in the extracted current can be calculated to get the value of each branch's insulating resistance, the faulted branch will be found out. The paper depicts the whole thought of the detection process and the main result. Simulations by Matlab verify that it can get the phasor characteristics of the low frequency current exactly in the case of high direct earth capacitance and the faulted branch will be found out accurately.

Key words: DC system; DC grounding fault; complex wavelet transform; B-spline wavelet

(上接第 28 页 continued from page 28)

A visual graph creating system for simulations based on BPA flow data file

LIU Cui-yan¹, CHEN Chao-ying¹, ZHANG Yan-xia¹, HAN Xue-jun², CHEN Jian-min², ZHAO Liang-liang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. East China Grid Company, Shanghai 20002, China)

Abstract: According to the existing BPA flow data file and the characteristics of data structure of electric system, this paper develops a new drawing software, which makes full use of BPA flow file and just needs a little information inputting by hand. The drawing software could automatically analyze the topology graph and search the flow data for simulations in BPA data file. It also provides the three-phase node number, solves the suppositional generator problem, and records data. This system lessens the burden of the users and improves the intelligence and validity of electrical graph analysis.

Key words: flow data; simulations; drawing software; database; topology graph