

一种新原理在超高压输电线路故障定位装置中的应用

刘珠明, 吕艳萍, 刘兵, 向铁元

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 小波分析是分析非平稳信号的一种非常有效的方法, 快速小波变换使得小波分析的广泛应用成为现实, 高速数字信号处理芯片(DSP)为其在行波测距中的实现提供了硬件支持。论述了装置的实现原理, 通过EMTP仿真, 证明了算法的有效性及其实现的实时性。

关键词: 小波变换; 行波; DSP; 故障定位; EMTP仿真

中图分类号: TM773 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2002)04-0026-03

1 引言

超高压输电线路是电能传输的重要设备, 在常规继电保护中, 通常是基于提取故障引起的工频信号, 而故障引起的工频信号和非工频信号是相关联的, 只能通过延时来获得工频分量, 这给超高压(EHV)输电线路实现速动带来了困难。因此, 研究高速、准确的故障检测新技术具有很强的实用价值。

利用故障暂态信息的行波保护很好地解决了线路速动和可靠之间的矛盾。暂态保护技术的实施关键无疑是暂态特征的提取和暂态保护机理的建立, 小波分析作为新的信号处理工具, 它不仅具有可调的时频窗, 同时还有类似于FFT的快速算法^[1,2]。

通用的微处理器在计算速度上难以适应信号实时处理的要求, DSP处理器中集成有高速的乘法器硬件, 能快速地进行大量数据的乘法和加法运算。小波变换和DSP的结合使得小波变换具有很强的可实现性。

本文就小波算法在行波双端故障定位中的实现进行了研究。

2 故障定位原理

若故障行波的速度 v 为已知, 则可通过故障初始行波到达线路两端测试点的时刻(均以GPS时间为基准)来计算故障点的距离。原理如下: 如图1所示, 设线路的全长为 l 公里, 故障点距离M端为 x 公里, 距离N端为 $(l-x)$ 公里, 行波到达母线M的时刻为 t_1 , 到达母线N的时刻为 t_2 , 则

$$t_1 - t_2 = \frac{x}{v} - \frac{l-x}{v} = \frac{2x-l}{v} \quad (1)$$

由此可得

$$x = \frac{v(t_1 - t_2) + l}{2} \quad (2)$$

这种方法无论对于接地故障还是非接地故障都能适用。但采用这种方法的先决条件是波速 v 要已知, 由于实际波速的计算与架空线的结构和大地的电阻率的分布有关, 与线路的分布电感 L_0 和分布电容 C_0 有关, 而 L_0 、 C_0 随不同的地区和不同的线路结构而不同, 因此, 对于不同的线路, 波速 v 是不同的。



图1 线路接地故障示意图

当用 v 近似值时, 用式(2)计算会增加测距误差, 对此, 可采用实测的方法来解决: 在装置进行实地安装调试时, 在线路上一已知点设置故障, 然后测出行波到达线路两端的时刻 t_1 、 t_2 再代入 $v = \frac{2x-l}{t_1 - t_2}$ 算出线路的波速。

3 小波算法对行波波头的检测

输电线路发生故障后的暂态行波具有突变、奇异的特点。对这种信号, 全频域分析方法的 Fourier 变换在时域上无任何分辨率, 不能刻划出行波到达时刻、行波在该点的幅度大小及极性(相位)。使用传统的时域检测和分析方法(如微分法、相关法)也是不够的, 因为它们受噪声及线路参数频率特性的影响较大, 而小波分析对突变的奇异型信号具有良好的检测能力。通过对所记录的行波信号采样值进行分析, 确定故障行波波头到达的准确时刻。

二进小波变换具有在时间轴上的平移不变性, B 样条函数在所有多项式样条函数中具有最小支撑, 而且三次 B 样条对混杂有噪声的信号进行逼近是线性最优的, 因此拟选用三次中心 B 样条函数作

为小波函数对电流行波施行小波变换。

3.1 初始输入序列 c_n^0 的获得

利用 Mallat 算法进行信号分解时一个很显然的问题是获得初始输入序列 c_n^0 , 严格地讲:

$$c_n^0 = \langle f(t), \phi_{0,n}(t) \rangle \quad (3)$$

但该计算太复杂, 工程上常用原始信号的采样值代替 c_n^0 , 因为当采样频率大于 Nyquist 频率时, 尺度函数可近似为一个函数。

3.2 相模变换

对输入信号进行模变换, 主要是为了去掉各相间电磁耦合。在模空间中, 各模量相互独立, 所以可以采用单相线路的方法分别对各模量进行分析。凯伦贝尔变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据这样的变换, 可以由输入电流行波的采样值 $i_a(n)$ 、 $i_b(n)$ 、 $i_c(n)$ 得到线模 $i(n)$ 、 $i(n)$ 和地模 $i_0(n)$ 的离散值, 即

$$\begin{aligned} i(n) &= i_a(n) - i_b(n) \\ i(n) &= i_a(n) - i_c(n) \\ i_0(n) &= i_a(n) + i_b(n) + i_c(n) \end{aligned} \quad (5)$$

为了便于故障定位, 可定义一个新的电流线模量 $i_r = (i_b - i_c)$ 。

3.3 快速小波算法

从滤波的角度看, Mallat 分解算法是将信号在时间和频率不同的多个尺度上进行分解, 即利用两组滤波器 $\{p_n\}$ 和 $\{q_n\}$, 将信号分解为平滑版本 (低频部分) 和细节版本 (高频部分), 其中 $\{p_n\}$ 为低通滤波器, 通过该滤波器得到的信号为平滑版本, $\{q_n\}$ 为高通滤波器, 通过该滤波器得到的信号为细节版本, 如果采样频率为 f_s , 则信号经 $\{p_n\}$ 作用后得到的 c_n^1 的频率介于 $[0, f_s/4]$ 之间, 而经 $\{q_n\}$ 作用后得到的 d_n^1 的频率介于 $[f_s/4, f_s/2]$ 之间。对 c_n^1 作用于 $\{p_n\}$ 和 $\{q_n\}$ 后得到频率介于 $[0, f_s/8]$ 的 c_n^2 和介于 $[f_s/8, f_s/4]$ 的 d_n^2 , 依次类推, 表达式有:

$$c_n^0 = \langle f(t), \phi(t-n) \rangle = f(n) \quad (6)$$

$$c_n^m = \sum_k p_{k-2n} c_k^{m-1} \quad (7)$$

$$d_n^m = \sum_k q_{k-2n} c_k^{m-1} \quad (8)$$

其中 $\{p_n\}$ 和 $\{q_n\}$ 为小波滤波器系数, c_n^m 、 d_n^m 分别是函数在 m 层尺度上的尺度逼近系数和小波分

解系数^[3], 对上述公式的下标作变换可得:

$$c_n^m = \sum_k p_{k-2n} c_k^{m-1} = \sum_l p_l c_{2n+l}^{m-1} \quad (9)$$

$$d_n^m = \sum_k q_{k-2n} c_k^{m-1} = \sum_l q_l c_{2n+l}^{m-1} \quad (10)$$

如果输入序列的长度为 N , 则每经一次运算得到的 c_n^m 、 d_n^m 个数为上一层系数的一半, 时间上, 下一层所得系数的时间间隔为上层的两倍。

3.4 数据分析和处理

对原始信号 c_n^0 作不同尺度的小波变换后得到 d_n^1 、 d_n^2 、 d_n^3 、 d_n^4 、 d_n^5 (若作五层分解), 观察、比较分解的信息序列有无极大值, 确定有无故障, 从而确定故障发生时刻。

行波波头一般有几个到几十个微秒的上升沿时间, 它可能包含从低频到数百千赫的频率分量, 当用小波分析行波信号时, 每一尺度下的信号小波变换相当于对中心频率已知的波群进行处理, 随着分析尺度的变化, 所分析的行波中的频带范围也发生变化。从理论上讲, 尺度越小, 小波系数的模极大值点与突变点的对应就越准确, 但是小尺度下小波系数受噪声影响非常大, 会产生许多伪极大值点, 只看一个尺度往往很难确定突变点的位置。依据故障信号和噪声模极大值在各尺度上的不同传递规律: 噪声信号 (白噪声) 模极大值随尺度增大而减小, 而信号的模极大值随尺度的增大而增大; 阶跃信号, 其小波变换的模极大值不随尺度的变化而变化; 根据这些特点, 我们可剔除倒闸操作的影响, 从大尺度上的极大值点反推、比较, 找到突变点位置, 从而获得初始行波到达测试点的时刻。

4 硬件结构框图

装置的实现主要由硬件和软件两大块组成。软件部分主要开发三相线路故障检测软件包。硬件部分要完成实施软件包的模拟装置。常规工频信号频率只有 50Hz, 对于该信号的采样率只需几百赫; 而行波信号的能量主要集中在几十千赫乃至数百千赫, 所以对它的采样将要求至少几百千赫的采样率, 这样高的采样率常规硬件是不可能做到的。因此, 对高采样率所获得的庞大数据进行小波变换, 需要 CPU 具有快速处理能力。所以我们有必要寻找一种新的快速处理芯片专门用于数据处理以满足保护的要求。随着硬件技术的不断发展, 快速采样 (高速 A/D) 和快速数字信号处理芯片 (DSP) 的出现为行波测距的实现提供了硬件支持。将 GPS (全球定位系统) 信号作为两端各种装置共同的时间基准且为采

集到的数据打上“时标”,两端测量装置的数据交换准备借用调制解调器来完成。

硬件原理框图如下:

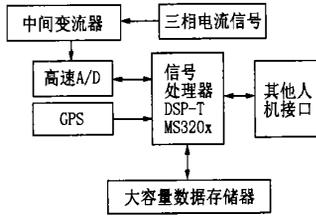


图2 硬件结构图

5 EMTP 仿真、实验结果分析和结论

以某一长为 340km 的 500kV 线路为例,采用 EMTP 进行了多项故障仿真。考虑到算法的精度及实时性,以 $p[5] = \{-0.125, 0.25, 0.75, 0.25, -0.125\}$; $q[3] = \{0.25, -0.5, 0.25\}$ 为小波滤波器系数,每次运算 128 个数据,作五层分解,且相连的初始运算数据前后重叠 8 个。以下为单相接地实验结果,在距 M 端 100km 处发生接地故障,线路模型如图 3 所示^[4]。

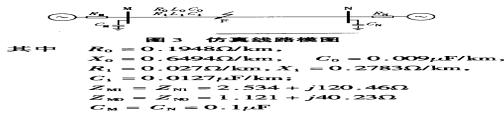


图3 仿真线路模图

其中 $R_0 = 0.1948 \Omega/\text{km}$,
 $X_0 = 0.6494 \Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.009 \mu\text{F}/\text{km}$,
 $R_1 = 0.027 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.2783 \Omega/\text{km}$,
 $C_1 = 0.0127 \mu\text{F}/\text{km}$;
 $Z_{M1} = Z_{N1} = 2.534 + j120.46 \Omega$,
 $Z_{M0} = Z_{N0} = 1.121 + j40.23 \Omega$,
 $C_M = C_N = 0.1 \mu\text{F}$

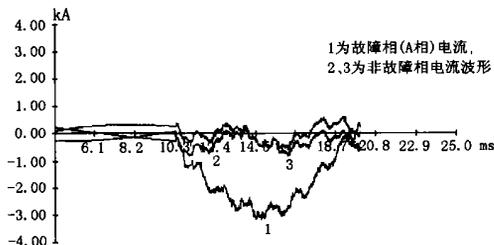


图4 M端采集的电流波形

实验结果如上图所示,从图 4、6 采集的电流波形看到:两端电流突变点相对故障发生时刻分别有

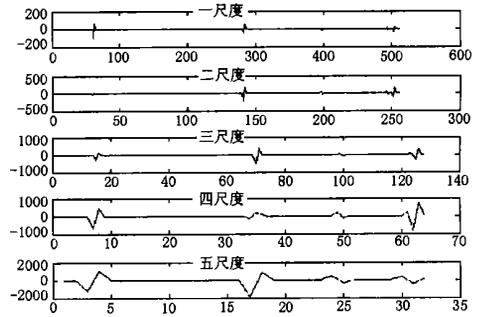


图5 M端 模量各尺度小波变换波形

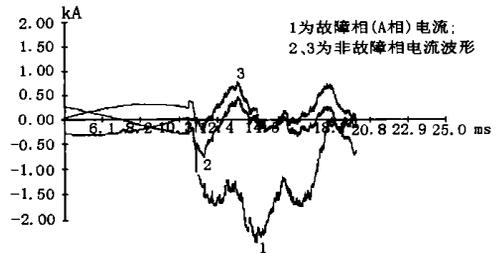


图6 N端采集的电流波形

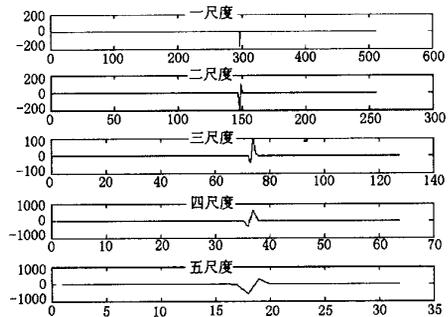


图7 N端 模量各尺度小波变换波形

不同的延时,从小波变换结果图 5、7 可以看到有明显的时间间隔。由于数据来自 EMTP 实验,取速度大小 $v = 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$,从软件的数据可得到该实验中两端初始行波到达的时间间隔大小为 $t_1 - t_1 = 0.468 \text{ms}$ 。代入公式(2)得到距 M 端的距离:

$$x = 99.8 \text{km}$$

测距精度 $r = (100 - 99.8) / 100 \cdot 100 \% = 0.2 \%$

该误差可能是采样率所限和硬件精度引起,在现场投入时可能还会受线路结构参数的影响。由于零模分量存在严重的衰减和波速不稳定,一般宜采用线模分量进行测距;利用零模和线模小波变换模极大值之间的关系进行选相。经多次实验,该装置实现简单、定位精度高、实时性和可靠性强。

(下转第 42 页)

- 译. 计算机继电保护系统. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [2] 段玉倩. 神经网络式微机继电保护的研究. 天津大学博士研究生毕业论文, 1998, 12.
- [3] (美) Douglas Boling 著. 北京博彦科技发展有限公司译. Microsoft Windows CE 程序设计 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1999.
- [4] (美) Terence A. Goggin 著, 尤淘, 张平, 等译. Windows CE 高级开发指南 [M]. Windows CE Developer's Handbook. 2000, 电子工业出版社.

- [5] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 中国电力出版社, 1999, 3.

收稿日期: 2001-10-17

作者简介: 王海吉 (1964 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及其自动化; 贺家李 (1925 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统故障分析及继电保护领域的研究工作; 段玉倩 (1972 -), 女, 博士, 主要从事电力系统故障分析及继电保护领域的研究工作。

Study on computerized relay protection and integrated automation system of the 35kV/10kV electric power substation based on PC industrial controlling computer

WANG Hai-ji, HE Jia-li, DUAN Yu-qian, XI Guo-hua, LIU Xiu-ling
(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: There have broad developing foreground in the fields of computerized relay protection and integrated automation of power system based on industrial computer. Based on MIC2000 modular industrial computer series, WINDOWS CE and computerized relay protection card designed by the author, this system realized the integrated function of the protection and automation of the 35kV/10kV electric power substation. There have much difference between the realized method of protection based on industrial computer and the protection devices based on singlechip processor. The author studies comprehensively the algorithm of multi-line protection achieved by single CPU and uses the technique of parallel processing and multi-threads. It makes the system meet the need of rapidity even if multiple faults on several lines take place simultaneously. This paper is mainly about the hardware structure, the scheme and design of software, the realization of protection algorithm and the realization of the under frequency unloading function.

Key word: computerized relay protection; automation; industrial computer; WINDOWS CE; data sampling card; under frequency unloading

(上接第 28 页)

参考文献:

- [1] Chang C S, Tong Feng. Analysis of distribution disturbance using wavelets technique [C]. IPEC '99 Singapore Proceedings of the International Power Conference, 1999.
- [2] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE Trans On PAMI, 1989, 11(7): 674 ~ 693.
- [3] 崔景泰, 著 [美], 程正兴, 译. 小波分析导论 [M]. 西安

交通大学出版社, 1995.

- [4] 林湘宁. 微机保护新原理的小波理论应用研究 [M]. 华中科技大学博士论文, 2000.

收稿日期: 2001-09-17

作者简介: 刘珠明 (1976 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为小波分析在继电保护中的应用、电力电子; 吕艳萍 (1956 -), 女, 副教授, 研究领域为电力系统继电保护及变电站综合自动化; 刘兵 (1976 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为小波分析在继电保护中的应用。

Study of a new principle applied in EHV transmission line fault locator

LIU Zhu-ming, L Ü Yan-ping, LIU Bing, XIANG Tie-yuan
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The wavelet transformation (WT) is a very powerful tool for the analysis of non-stationary signals. The fast algorithm of WT enables the applications of wavelet transformations. High-speed digital signal processors (DSP) provided the hardware support for fast algorithm of WT. This paper introduced the principle of the instrument. The results from EMTP simulation prove the efficiency and realtime of it.

Keywords: wavelet transformation; travelling-wave; DSP; fault location; EMTP; simulation