

离散序列小波变换在微机继电保护中的应用

赵晓坦, 苏鹏声

(清华大学电机系, 北京 100084)

摘要:分析了电力系统常用的几种继电保护算法。针对电力系统对微机继电保护装置实时性、快速性的要求,提出了基于小波变换模极大值预测短路后故障相电流幅值的算法。与其他算法相比,该算法更能满足电力系统对继电保护装置提出的快速性要求。仿真计算结果证实了该算法作为电力系统短路故障诊断辅助算法的可行性、有效性。

关键词:微机继电保护; 分解重构; Daubechies 小波

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)10-0037-04

1 引言

电力系统对于继电保护在四个方面,即可靠性、选择性、快速性和灵敏性,有较高的要求^[1]。在电力系统微机保护装置中,需要实时获取系统各元件的电压、电流等电量。而且,需要有相应的继电保护算法来计算动作量和制动量。例如:两点采样值积算法、傅立叶算法(傅氏算法)、最小二乘算法、半周积分算法等等。

小波分析是一种新颖的信号分析方法,是近几年发展起来的信号处理技术中的一个新的分支。小波分析在时域、频域同时具有良好的局部化性质,能够将含有多种频率成份的被分析信号按照一定的时间和频率分辨率进行分解,能够有效地刻画信号突变。近年来,小波分析在理论和应用方面都得到了发展,特别适用于信号的瞬态分析、图像的边沿分析等方面的问题。同时,在电力系统故障诊断、输电线路的故障定位、谐波检测等领域,小波分析也取得了初步的成果。

本文依据信号用小波分解、重构后高频分量的特性,分析系统发生短路故障时故障相电流的波形。分析结果表明,该方法能够在较短的时间内预测出短路后故障相电流的幅值,以保证继电保护装置动作的快速性、准确性。

2 微机继电保护算法

在实际电力系统中,继电保护的种类很多,保护原理也各不相同,相应地有各种不同的保护算法,但都可以归结为计算出能够表征被保护对象运行特点的各种电量,如电压、电流的幅值与相位等^[4]。

电力系统在某一时刻发生短路时,故障相电流

突然增大,如图1中虚线所示。计算故障相电流幅值的算法主要有以下三种。

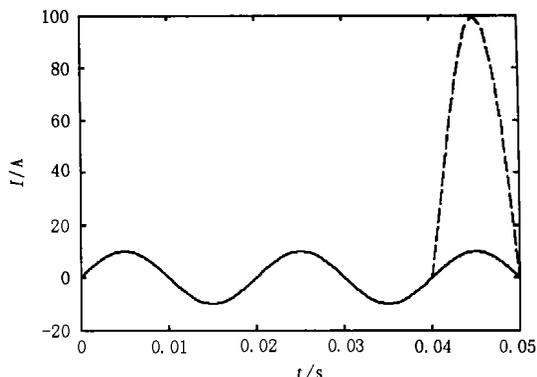


图1 短路时故障相电流波形

Fig. 1 The current waveform of the short-circuit phase

(1) 两点采样值积算法^[5]。该算法适用于输入信号为正弦函数的情况,如图1所示,当两个采样点均为虚线上的点时,最快能够在1/4周期时间内求出故障后电流的幅值。但是,当信号不是正弦函数时,两点采样值积算法的误差会很大。

(2) 傅氏算法^[4]。该算法来源于傅立叶级数算法,其数据窗最短应不少于一个周期。如果一个周期内的采样值为20个点,在实时计算过程中,若移动步长为一个采样周期,则必须在系统发生故障后第20个采样值出现后,才能计算出故障后电流的真实幅值。在此之前,采样值中有一部分是故障前的数值,一部分是故障后的数值,计算出的电流幅值呈上升趋势,如图2所示(由于所取采样值中有过零点,导致图2中箭头所指部分有两个相邻幅值相等)。

(3) 增量元件算法^[6]。该算法不能直接求出故障后电流的幅值。而且,由于只用到故障后的几个

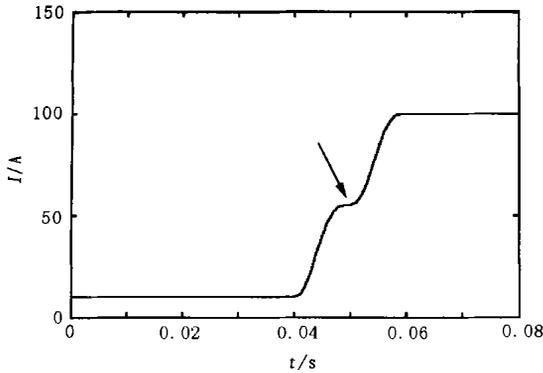


图2 用傅氏算法求出的电流幅值

Fig.2 The magnitude of short-circuit current derived from fourier algorithm

采样点,容易受到干扰的影响。

3 离散序列小波变换简介

小波分析或小波变换有连续小波变换和离散序列小波变换之分,前者是建立在连续信号分析的理论基础上,通过数值积分方法实现的;后者是对离散信号序列进行处理,更适合于工程应用中的快速计算。离散序列小波变换是建立在多分辨率分析和多采样率滤波器理论基础上的^[2]。

对信号的原始采样序列 $x(k)$ 进行多分辨率分析时,可以假设它为第 0 级输入信号 $x_k^{(0)}$ 。则第 1 级信号可分为离散平滑逼近信号 $x_k^{(1)}$ 和离散细节信号 $d_k^{(1)}$ (也就是小波变换结果),分别为:

$$x_k^{(1)} = \sum_n h_0(n-2k)x_n^{(0)} \quad (1)$$

$$d_k^{(1)} = \sum_n h_1(n-2k)x_n^{(0)} \quad (2)$$

而权重 $h_0(k)$ 、 $h_1(k)$ 为:

$$h_0(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int \phi\left(\frac{t}{2}\right) \phi^*(t-k) dt \quad (3)$$

$$h_1(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int \left(\frac{t}{2}\right) \phi^*(t-k) dt \quad (4)$$

式中: $h_0(k)$ 是低通的; $h_1(k)$ 是高通的; $\phi(t)$ 为尺度函数; $\psi(t)$ 为小波函数。

信号重构过程中,第 0 级的离散平滑逼近及离散细节信号 $a_n^{(0)}$ 、 $d_n^{(0)}$ 为

$$a_n^{(0)} = \sum_k g_0(n-2k)x_k^{(1)} \quad (5)$$

$$d_n^{(0)} = \sum_k g_1(n-2k)d_k^{(1)} \quad (6)$$

式中: $g_0(k)$ 是低通的, $g_1(k)$ 是高通的,为重构的权重系数,表达式与 $h_0(k)$ 、 $h_1(k)$ 类似。

一般而言,分解和重构过程中,第 $j-1$ 级与第 j 级信号之间的关系同上。对信号进行一维一尺度分

解,并对分解后的系数分别进行单支重构的过程如图 3 所示,其中 2 抽取和 2 插值环节包含在公式 (1)、(2) 和公式 (5)、(6) 中:

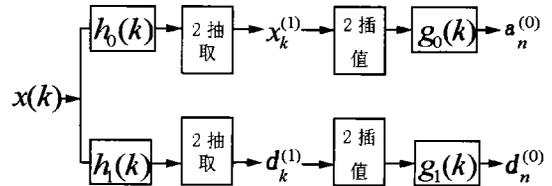


图3 信号的一尺度分解,并分别进行单支重构的流程

Fig.3 The flow of signal s one scale decomposition and reconstruction

上述算法称为 Mallat 算法,该算法中的权重系数 $h_0(k)$ 、 $h_1(k)$ 、 $g_0(k)$ 、 $g_1(k)$ 是一组滤波器。由以上分析可以看出,只要 $h_0(k)$ 、 $h_1(k)$ 已知,就可以按照公式(1)、(2),由 $x_k^{(0)}$ 逐级求出 $x_k^{(j)}$ 和 $d_k^{(j)}$ 。计算量远低于数值积分方法,而且,速度较快。同时,使用该种算法时,滤波器 $h_0(k)$ 、 $h_1(k)$ 、 $g_0(k)$ 、 $g_1(k)$ 的长度对分析结果有一定影响。滤波器长度越长,分频越准确。但是,滤波器长度越长,所需的判定时间也越长。

4 离散序列小波变换在继电保护中的应用

4.1 算法的原理

Daubechies 小波为正交紧支撑小波,用 dbN 表示, N 为正整数。选择小波函数时,应该考虑其性能和滤波器的长度等因素。db1 小波的滤波器不连续,没有实用价值;db2 小波的滤波器长度很短,判定时间也可能很短,但是,容易受外界干扰影响。相比之下,选择 db3 小波的滤波器更合适。其他 db 小波滤波器的长度都比 db3 长,判定时间也随之延长。

与 db3 小波相关联的四个滤波器如图 4 所示。分别为:

分解低通滤波器 $h_0 = [0.0352, -0.0854, -0.1350, 0.4599, 0.8069, 0.3327]$;

分解高通滤波器 $h_1 = [-0.3327, 0.8069, -0.4599, -0.1350, 0.0854, 0.0352]$;

重构低通滤波器 $g_0 = [0.3327, 0.8069, 0.4599, -0.1350, -0.0854, 0.0352]$;

重构高通滤波器 $g_1 = [0.0352, 0.0854, -0.1350, -0.4599, 0.8069, -0.3327]$ 。

用 db3 小波对短路电流信号 s 进行分解,然后进行单支重构,重构后的低频分量 a_1 、高频分量 d_1 如图 5 所示。由图 5 可以看出,从重构后的高频分量可以很明显地分辨出信号在时域中的突变点。

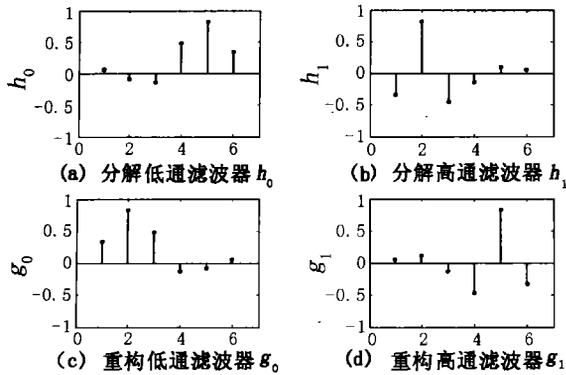


图4 与db3小波相关联的四个滤波器
Fig. 4 The four filters related to db3 wavelet

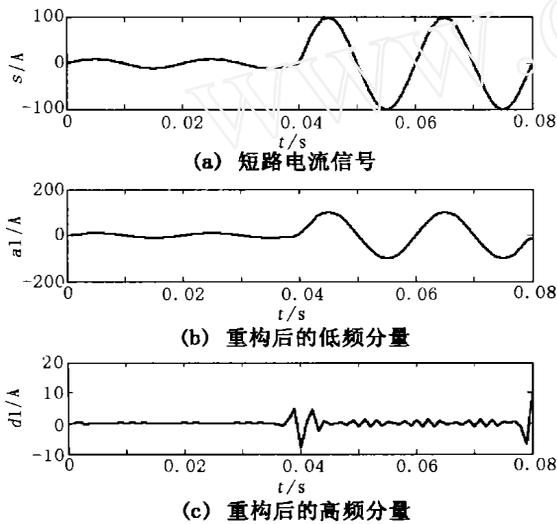


图5 信号重构后低频分量、高频分量的波形
Fig. 5 The waveform of signal s low-frequency part and high-frequency part after reconstruction

假设系统频率为 $f = 50$ Hz,信号的采样频率为 1 kHz,即每基频周期采样 20 个点。因故障前的各采样值呈周期函数规律变换,采进来一个与以往值不呈周期函数规律变化的点,即认为发生了故障,并认为该点是故障后的第一个采样点。

db3 小波的数据窗为 6 个点,实时处理过程中移动步长为一个采样周期。对信号进行一层分解,并对高频分量进行重构,分析重构后高频分量的模极大值(若对 b_0 的某一邻域内的任意点 b ,有 $|f(b)| > |f(b_0)|$,则 $|f(b)|$ 为信号的模极大值)。经过分析发现,故障前最后一个采样点的相位及故障前信号的幅值确定后,重构后高频分量的模极大值随故障后信号幅值的改变而变化,满足关系式:

$$m_{ma} + k(U_{mb} - U_{ma}) = m_{mb} \quad (7)$$

其中: U_{ma} 、 U_{mb} 为故障后信号的不同幅值, m_{ma} 、 m_{mb}

分别为对应于 U_{ma} 、 U_{mb} 的重构后高频分量模极大值, k 为常数。

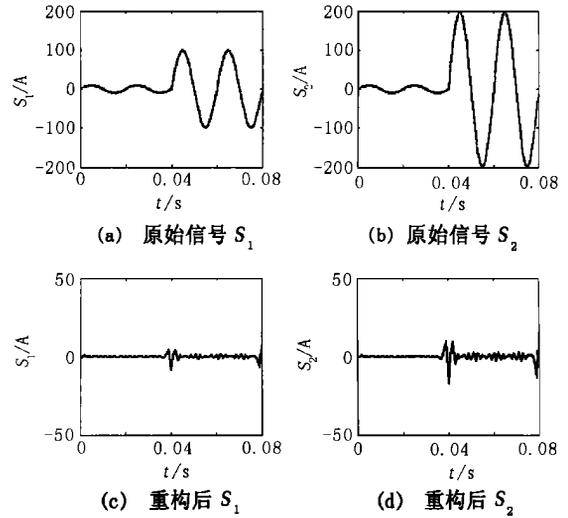


图6 故障后信号幅值增大时,重构后高频分量的模极大值随之增大

Fig. 6 The maximum absolute value of the signal s high-frequency reconstruction part grows as the short-circuit signal s magnitude grows

图 6(a)、(b)中,故障前最后一个采样点的相位均为 0° ,且故障前电流的幅值相同。后者故障后电流幅值是前者的 2 倍,重构后高频分量模极大值是前者的 2 倍多。因此,实际信号故障前的幅值、故障前最后一个采样点的相位确定后,根据其重构后高频分量的模极大值,就可以预测出其故障后的幅值。

4.3 仿真计算

定义信号从负值到正值变换过程中的过零点(如图 7 所示)为零相位。如果故障前最后一个采样点位于 0° 相位处,则故障后的第一个采样点位于 18° 相位处。

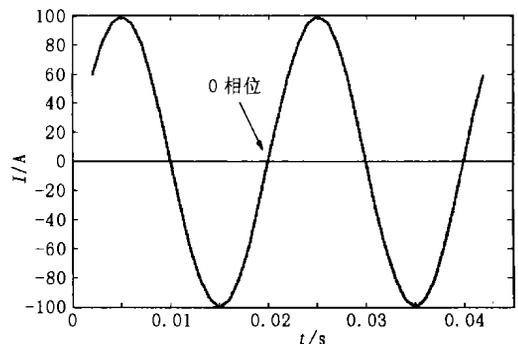


图7 零相位定义示意图

Fig. 7 The sketch map of zero-phase definition

在这种情况下,根据故障前信号幅值相同,故障后信号幅值不同的两组数值的重构后高频分量模极

大值,利用公式(7),求得 $k = 0.0911166$ 。类似地,我们可以得到故障前最后一个采样点位于其它相位处的 k 值,如表 1 所示。故障前最后一个采样点位于 $180 \sim 360^\circ$ 时,与 $0 \sim 180^\circ$ 情况相同。表 1 只列出了 $0 \sim 180^\circ$ 之间的部分相位处的 k 值,其它相位处的 k 值可以类似地得到。

表 1 故障前最后一个采样点位于不同相位时的 k
Tab. 1 Value k varies when the last non-fault sampling point located in different phases

故障的最后一个 采样点的相位/ $^\circ$	k
0	0.0911166
12	0.143120
42	0.241485
72	0.275145
102	0.235080
132	0.0880857
162	0.0403006
180	0.0911166

这样,由信号故障前的幅值、故障前最后一个采样点的相位、以及重构后高频分量的模极大值,利用公式(7)和一组相应的基准值,可以求出故障后信号的幅值。例如,如果已知故障前电流的幅值为 100 A ,故障前最后一个采样点的相位为 12° ,并得到小波变换重构后高频分量的模极大值为 270.7496 ,需要的是故障后电流的幅值 I_m 。为了求出故障后电流的幅值,需要有这种条件下(故障前幅值为 100 A ,故障前最后一个采样点的相位为 12°)的基准值。把故障后电流幅值为 1 kA 时,通过小波变换得到的重构后高频分量模极大值 127.6296 ,作为基准值。将上述两个数据代入公式(7),得出下式:

$$127.6296 + 0.14312(I_m - 1000) = 270.7496$$

求得 $I_m = 2\text{ kA}$ 。仿真计算证明此结果是正确的。

仿真结果显示,使用 db3 小波,故障后采样点数至多为七个时,将出现重构后高频分量的模极大值。所以,该种算法可以在短路故障发生 $7/20$ 周期内预测出故障后短路相电流的幅值。当然,也可以使用其他 db 小波或其他类型小波,只是要注意小波的性质

能和滤波器的长度等因素。

5 结论

离散序列小波变换是一种快速算法,通过该变换,可以将信号中的高频成分和低频成分分离。其中,高频成分包含了信号发生突变的信息。本文提出了利用离散序列小波变换中,由重构后高频分量的模极大值,预测系统因故障导致电流发生突变后电流幅值的算法,并考虑了突变发生时不同相位的影响。

仿真分析表明,该算法能够较快地预测出短路后电流信号的幅值,满足继电保护提出的快速性要求。该算法的优点就在于能在很短的时间内定量地预测出故障后电流的幅值,但是,也容易因个别采样值受到干扰而带来误差。综上所述,可以把该算法作为电力系统稳态短路的一种辅助算法。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
- [2] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [3] 胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [4] 陈德树,张哲,尹相根. 微机继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [5] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社,1992.
- [6] 罗士萍. 微机保护实现原理及装置[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [7] 张昊,石铁洪,刘沛. 基于 B 样条小波预处理的短窗算法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):50-54.

收稿日期: 2002-03-28; 修回日期: 2002-06-05

作者简介:

赵晓坦(1976-),女,硕士,研究方向为小波分析在继电保护中的应用;

苏鹏声(1946-),男,副教授,从事电机、电力电子及故障诊断等的教学与科研工作。

The application of discrete wavelet transform in microprocessor-based protection of power system

ZHAO Xiaotan, SU Peng-sheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Several algorithms of protection are analyzed in this paper. And according to the real time feature of microprocessor based protection set, a new algorithm is studied. This algorithm makes use of the maximum absolute value of the signal's high-frequency reconstruction part after discrete wavelet transform, predicting the magnitude of short-circuit current in a short time. It is quicker than other algorithms. The simulation results show the effectiveness of this algorithm.

Key words: microprocessor-based protection; decomposition and reconstruction; Daubechies wavelet