

二次 B 样条小波变换的快速算法及其在变压器保护中的应用

张秀川, 黄益庄

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 从提高计算速度出发, 给出了应用二次 B 样条小波对信号进行高尺度变换的一种快速算法; 同时针对电力系统的实际情况, 在二次 B 样条小波的基础上, 构造出一个适合于电力系统故障分析的小波母函数, 并将它应用于变压器差动保护进行励磁涌流鉴别, EMTF 仿真结果证实了该方法的可行性。

关键词: 小波变换; 变压器保护; 励磁涌流

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)01-0032-05

1 二次 B 样条小波变换的快速算法

1.1 算法推导

小波分析作为一个新兴的数学工具, 近年来在信号处理领域得到广泛应用。与传统的 Fourier 分析方法不同, 小波分析方法使信号在时域和频域都实现了局部化, 它可以较为精确地描述信号在不同位置、不同频段上的特性, 小波分析方法的优良性能使它成为处理非平稳、暂态、突变信号的有效工具。

在应用小波变换进行信号处理时, 小波基的选取非常重要, 使用不同的小波基对同一信号进行分析可能得出不同的结果, 因此在实际应用中需要综合考虑研究要求、信号特征、计算量等多种因素来选取适当的小波基。二次 B 样条小波对于检测信号的奇异突变具有极为优良的性能, 在 S. mallat 所发表的系列文献中对此有详细的论述: 文献 [1] 分析了二次 B 样条小波用于信号奇异性分析的理论依据, 文献 [2] 给出了离散二进小波变换的实用算法——mallat 塔式算法。

Mallat 塔式算法是基于多分辨分析的思想而提出的, 它实现了对于信号的逐层分解与重构, 现已成为应用小波变换进行信号处理的一个常用算法。但是在信号实时处理领域, mallat 塔式算法表现出它的不足: 若需要对信号进行尺度 2^j 上的小波变换, 则在计算过程中必须由尺度 1 开始延尺度 2^j 逐步计算到 2^j , 因此在对信号进行较高尺度上的小波分解时, mallat 塔式算法因其大量的中间过程而导致计算量急剧增加, 计算时间延长, 很可能无法满足对信号进行实时分析的要求。基于此, 本节将探讨以二次 B 样条小波为母波对信号进行高尺度小波变换的快速算法。

首先给出二次 B 样条小波母函数的解析式

(t) 如下:

$$(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^2 & 0 \leq t < 1 \\ -\frac{3}{2}t^2 + 4t - 2 & 1 \leq t < 2 \\ \frac{3}{2}t^2 - 8t + 10 & 2 \leq t < 3 \\ -\frac{1}{2}t^2 + 4t - 8 & 3 \leq t < 4 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

令 $a(t) = (1/\sqrt{a}) \delta(t/a)$, 定义小波变换:

$$Wf(a, t) = f * a(t) \quad (2)$$

对式(2)离散化, 并令 $s = 1/a$, 得到式(3):

$$Wf(s, kT) = T \sum_s [f(nT) * (skT)] \quad (3)$$

式中 T 为采样周期, k 和 n 为整数。再对式(3)应用 Z 变换, 得到式(4):

$$Wf(z) = T \sum_s [f(z) \cdot (z)] \quad (4)$$

式中 $f(z)$ 为离散信号 $f(nT)$ 的 Z 变换, (z) 为 (skT) 的 Z 变换。如令 $s = 1/sT$, 则 (z) 的表达式如下:

$$(z) = \frac{1}{2^2(1-z^{-1})^3} [z^{-1} + z^{-2} + 2z^{-3} - (3^2+4)z^{-4} - (3^2-4)z^{-5} - 2z^{-6} - 3z^{-7} + 6z^{-8} - 1 + 6z^{-2} - 2z^{-3} + (3^2-4)z^{-4} - (3^2+4)z^{-5} - 2z^{-6} - 3z^{-7} + z^{-8} - 2z^{-9}] \quad (5)$$

若将 (z) 看作一个系统函数, 那么它构成了一个 IIR 系统, 它在单位圆上有重极点 $z = 1$, 因此这是一个不稳定系统, 若我们直接进行逆 Z 变换, 对小波系数实行递归计算, 那么计算过程中小波系数将是振荡放大的。对式(5)做进一步的分析, 发现当 j 取为一个确定的正整数时, 该式可以实现整除, 那么这一系统将转化为一个稳定的 FIR 系统:

$$\begin{aligned} (z) = \frac{1}{2} \int_{n=1}^{\infty} n^2 (z^{-n} - z^{-(4-n)}) + \frac{2^{-1}}{(3n-2)(2-n)} (z^{-n} - z^{-(4-n)}) \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),进行逆 Z 变换,得到式(7):

$$\begin{aligned} Wf(k, T) = \frac{\sqrt{T}}{2} \int_{n=1}^{\infty} n^2 [f((k-n)T) - f((k-4+n)T)] + \frac{2^{-1}}{(3n-2)(2-n)} [f((k-n)T) - f((k-4+n)T)] \end{aligned} \quad (7)$$

至此我们得到了在任意尺度上对离散信号 $f(nT)$ 进行二次 B 样条小波变换的计算式,很明显这一计算方法去掉了 mallat 塔式算法中大量的中间计算过程,从而使得计算简单明了,虽然其计算量随着尺度增加亦有所增加,但在一定尺度范围内可以满足信号实时分析的要求。

1.2 快速算法应用于信号奇异性检测

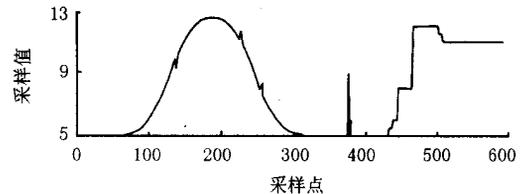
根据文献[1]的分析,以二次 B 样条小波为母波,对信号进行小波变换相当于信号被一个平滑函数平滑后再求一阶导数,因而小波系数的局部模极大值将对应信号的奇异突变点。为检验本文式(7)的快速算法是否可行,我们使用这一算法对图 1(a)所示信号实行四个尺度上的小波变换,结果示于图 1(b)~(e)。由图 1(b)~(e)可以看到,这一算法对于检测信号的奇异性效果很好,从而证实了这一算法的可行性。

2 小波变换用于变压器差动保护

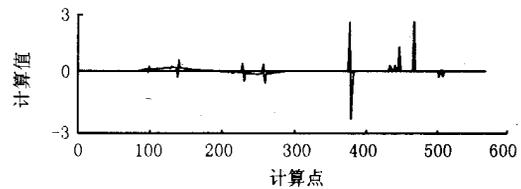
2.1 构造适合于电力系统故障分析的母小波及其算法

由于二次 B 样条小波在信号奇异性检测方面具有优良的性能,使得它在变压器差动保护乃至电力系统故障分析中得到广泛应用。然而,应该明确的是,实际应用中信号的奇异突变是一个相对的概念,对于电力系统来说,正常情况下的电流电压波形基本为 50 Hz 的正弦基波,因此我们希望小波对于正弦基波的变换结果要小,而对于波形的间断或者突变要非常敏感。但是二次 B 样条小波变换不能满足这一要求,其小波变换结果在很大程度上受正弦基波的影响,真正的故障信息往往被淹没在其中,这对于故障的准确判别非常不利,本文试图在二次 B 样条小波的基础上构造一个新的母小波,使其适应于电力系统故障分析的实际需求。

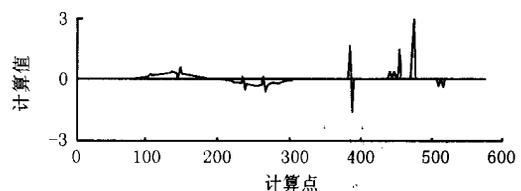
设 (t) 为二次 B 样条小波,令 $(t) = (t) - (t-2)$,以 (t) 为新的母小波。 (t) 和



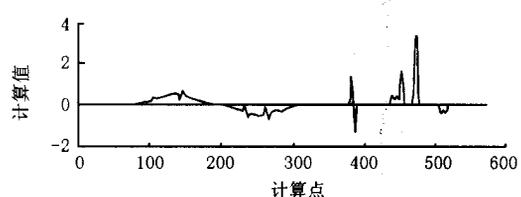
(a) 原始信号波形图



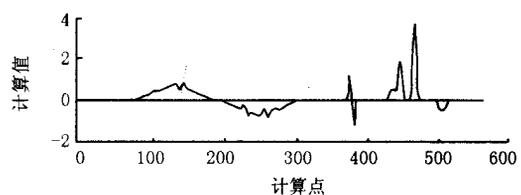
(b) 原始信号在 1~4 尺度上的小波变换结果



(c) 原始信号在 1~4 尺度上的小波变换结果



(d) 原始信号在 1~4 尺度上的小波变换结果



(e) 原始信号在 1~4 尺度上的小波变换结果

图 1 信号波形图及其小波变换结果

Fig. 1 Signal graphs and its wavelet transform results

(t) 的波形图如图 2。

在式(7)的基础上,经推导得到以 (t) 为母小波在任意尺度上对信号 $f(nT)$ 进行小波变换的快速算法:

$$\begin{aligned} Wf(k, T) = \frac{\sqrt{T}}{2} \int_{n=1}^{\infty} n^2 [f((k-n)T) - f((k-n-2)T) - f((k-4+n)T) + f((k-4+n-2)T)] + \frac{2^{-1}}{(3n-2)(2-n)} [f((k-n)T) - f((k-n-2)T) - f((k-4+n)T) + f((k-4+n-2)T)] \end{aligned} \quad (8)$$

将新的母小波 (t) 及其快速算法用于电力系统故障分析时,可以在很大程度上削减正弦基波对于小波变换结果的影响,这一点可由后文得到证

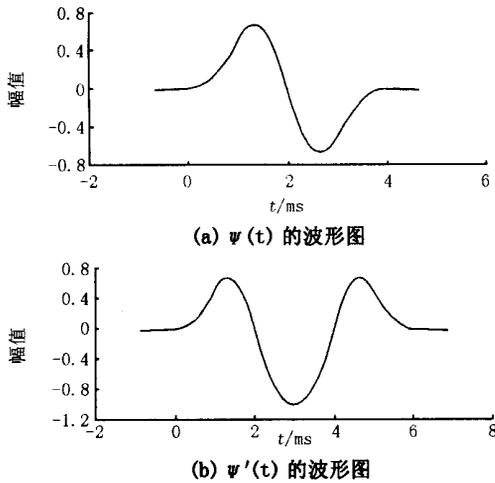


图2 二次B样条小波及新小波的波形图

Fig. 2 Graphs of the mother wavelet $\psi(t)$ and $\psi'(t)$

实。

2.2 变压器励磁涌流识别

变压器是电力系统中的重要设备,若发生故障将对供电可靠性乃至整个系统的正常运行带来严重影响。因此对变压器进行有效可靠的保护非常重要,电流差动保护作为目前普遍使用的变压器主保护,其核心问题仍然是如何区分内部故障与励磁涌流。近年来人们提出了多种方法来鉴别励磁涌流,如二次谐波制动、间断角、波形对称法等等,这些方法经过多年的研究在理论与实践上都较为成熟,目前已经在实际的变压器保护装置中广泛使用,但是据有关统计资料表明,实际运行中变压器差动保护的误动率仍然很高,因此这是一个值得继电保护工作者进一步研究和探索的问题。

小波分析这一数学工具的引入为解决这一问题提供了新的思路,由于它具有良好的时频局部化性能,非常适合于描述信号的高频突变部分。众所周知,变压器励磁涌流由于铁芯的高度非线性而呈现出间断和突变的特点,因此使用小波分析方法来鉴别励磁涌流从理论上来说是可行的。近几年不断有这一方面的文献发表于各类报刊,其中文献[4]是首次进行这一方面的尝试并取得了良好的效果,它利用改进递归小波变换对电流波形进行处理,并使用小波变换结果的能量值与原始电流波形的能量值之比作为判据,仿真结果表明这一判据能够很好地区分励磁涌流和故障电流,然而由于文献[4]中所采用的小波算法计算量较大,且要求有很高的采样率,这使得它很难在使用普通单片机所构成的微机保护装置中得到应用。本节将在参考文献[4]的基础上,对

此作进一步的分析研究。

下面将图2的母小波以及式(8)的快速算法应用于变压器差动保护来鉴别励磁涌流,考察它检测正弦信号突变点的性能。我们使用EMTP仿真了变压器励磁涌流、内部故障电流以及变压器空投于内部故障的电流波形图(各波形均为每周96点采样),并对之应用第三尺度小波变换进行分析,各电流波形图及其小波变换结果示于图3。

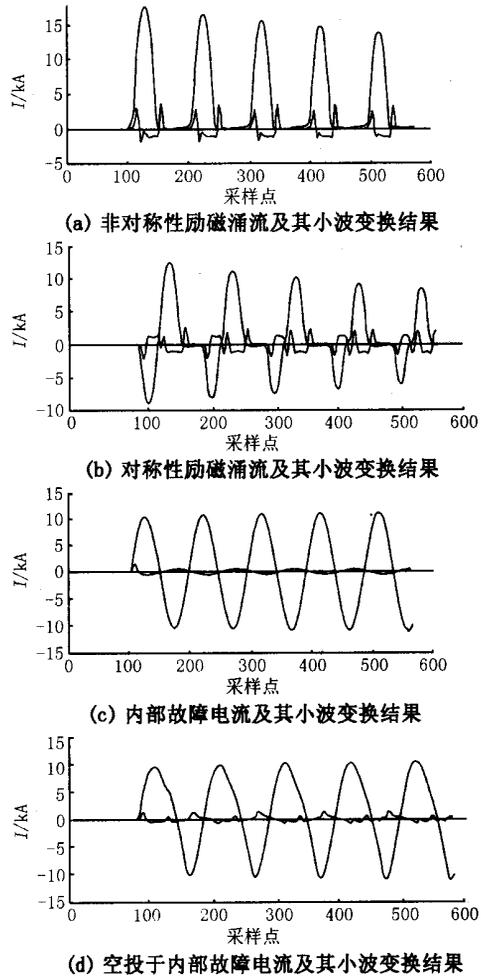


图3 励磁涌流和故障电流的波形图及其小波变换结果

Fig. 3 Graphs and wavelet transform results of inrush current and fault current

由图3可以看到,小波变换结果突出反映了信号波形的畸变特征。励磁涌流的波形畸变程度较大,在这些畸变点处均出现很大的小波系数;而故障电流和空投于故障时的电流因波形畸变程度较小其小波变换系数也相对较小。由此出发,结合参考文献[4]的有关内容,提取励磁涌流判据如下:

$$E_{de} = \frac{E_{mw}}{E_m} >_{de} \quad (9)$$

式中 $_{de}$ 为整定值, E_m 代表变压器励磁涌流一个周波内的能量值, E_{mw} 代表涌流小波变换结果一个周波内的能量值。若设 $i_m(k)$ 为变压器励磁涌流第 k 点的采样值, $i_{mw}(k)$ 为涌流小波变换结果第 k 点的值, N 为每周采样点数, 则 E_m 和 E_{mw} 的表达式如下:

$$E_m(k) = \sum_{j=0}^{N-1} [i_m(k-j)]^2 \quad (10)$$

$$E_{mw}(k) = \sum_{j=0}^{N-1} [i_{mw}(k-j)]^2 \quad (11)$$

根据式(9)~(11)计算图3所示各电流的 E_{de} , 结果示于图4:

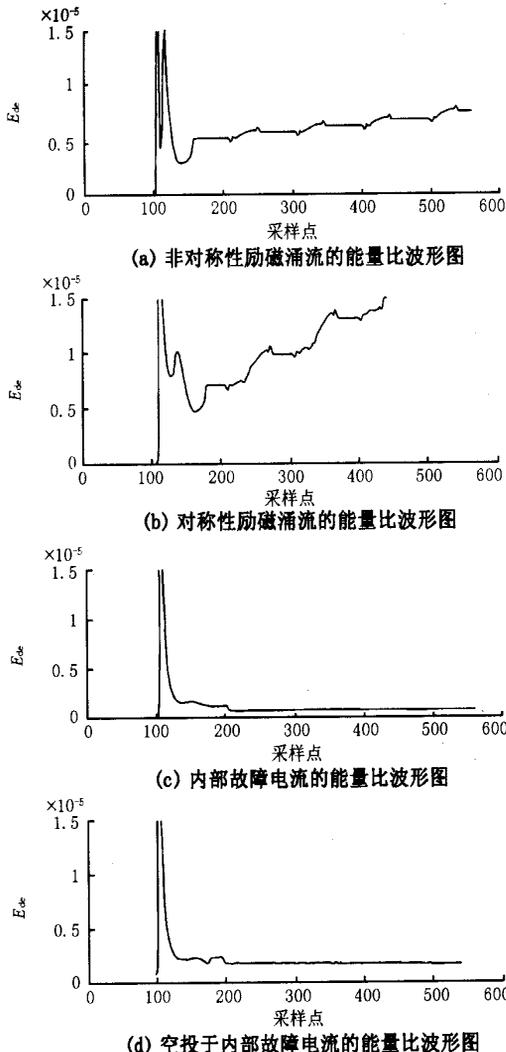


图4 励磁涌流和故障电流的能量比波形图

Fig. 4 Energy ratio graphs for inrush current and fault current

由图4可以看到,在波形起始的十几个采样点范围内,由于边界效应的影响,各个波形的 E_{re} 均很

大,但是在此以后,故障电流和励磁涌流的 E_{re} 呈现出不同的变化趋势:故障电流的 E_{re} 迅速衰减,至35点左右内部故障电流的 E_{re} 已经衰减至 1.6×10^{-6} ,空投于内部故障电流的 E_{re} 已经衰减至 1.8×10^{-6} ,而且在此以后它们也一直呈现出衰减的趋势;但励磁涌流的表现则不同,在35点左右,非对称性励磁涌流的 E_{re} 达到它的最低点,约为 2.8×10^{-6} ,此后一直表现为上升趋势,而对称性励磁涌流的 E_{re} 则始终大于 4.7×10^{-6} ,且上升势头更强。这两类波形表现出不同变化趋势的原因在于随着时间的增加,故障电流的波形畸变程度逐渐减弱,而励磁涌流因间断角依然存在且有所增大使得波形呈现出强烈畸变。通过以上分析,我们看到,若设定整定值 $re = 2.2 \times 10^{-6}$,则在35点左右(约7ms)就可以明确地将励磁涌流和故障电流区分开来。

研究表明,对于不同的采样率和不同的涌流形式,波形的 E_{re} 有一定区别。对此,本文进行了大量试验,利用EMTP仿真了不同变压器容量,不同故障形式以及不同合闸时刻的故障电流和励磁涌流,并应用上文的小波算法进行分析,结果如表1所示。

表1 EMTP仿真及小波分析结果

Tab. 1 Results of EMTP simulation and wavelet analysis

每周采样点数	整定值 re	涌流形式	涌流间断角/°	涌流判别时间/ms
48	4×10^{-5}	非对称性涌流	120	15
			150	12
			180	8
		对称性涌流	120	6
			150	6
			180	6
96	2.2×10^{-6}	非对称性涌流	120	14
			150	6
			180	6
		对称性涌流	120	6
			150	6
			180	6

仿真试验表明,在变压器的三相励磁涌流中一般有一相表现为近似的对称性涌流,若三相都为非对称性涌流,则至少有一相涌流的间断角大于 120° 。因此我们在应用式(9)所示判据进行励磁涌流判别时,可以采用或门判别,即任一相满足要求则闭锁保护出口。由表1看到,此判据可以在6~15ms以内将励磁涌流可靠地判别出来。当然,实际变压

器的故障电流和励磁涌流的表现形式与 EMTP 仿真试验结果之间可能存在一定出入,因此本节所提出的励磁涌流判别方法在应用于实际保护装置时尚需进一步完善。

3 结语

本文的第一部分从小波分析的基本理论出发,探讨了以二次 B 样条小波为母波在任意尺度上对信号实行小波变换的快速算法;第二部分在二次 B 样条小波的基础上构造了一个适合于电力系统故障分析的新小波,并将这一小波应用于变压器差动保护进行励磁涌流识别。

小波变换作为一种全新的数学分析工具,它优良的时频局部化性能必将进一步促进电力系统信号处理技术的发展。目前小波变换在电力系统中的应用还处于探索和试验阶段,大量的理论和实用问题有待深入的研究。

参考文献:

- [1] Mallat S, WEN Liang-wang. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38: 617 - 643.
- [2] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from

Multiscale Edges [J]. IEEE Trans On PAMI, 1992, 14: 710 - 732.

- [3] Chaari Oanis, Meunier Michel, Brouaye F. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11: 1301 - 1308.
- [4] 张传利, 黄益庄, 等 (ZHANG Chuan - li, HUANG Yi - zhuang, et al). 改进递归小波变换在变压器保护中的应用研究 (Study of Relaying Protection for Transformer Applying IRWT) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(17): 20 - 22.
- [5] 杨钟皓, 董新洲 (YANG Zhong - hao, DONG Xin - zhou). 基于小波变换的变压器励磁涌流识别方法 (Method for Exciting Inrush Detection in Transformers Using Wavelet Transform) [J]. 清华大学学报 (自然科学版) (Tsinghua Univ (Sci &Tech)), 2002, 42 (9): 1184 - 1187.

收稿日期: 2003-01-08

作者简介:

张秀川(1977 -),男,硕士研究生,研究生方向是变压器微机保护;

黄益庄(1938 -),女,教授,长期从事电力系统自动化以及微机保护方面的科研和教学工作。

A fast algorithm of 2B - spline wavelet transform and its application to transformer protection

ZHANG Xiur-chuan, HUANG Yf-zhuang

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

Abstract: A fast algorithm of 2B - spline wavelet transform is introduced to meet the real - time demands of signal processing. On the basis of 2B - spline wavelet, a mother wavelet founction suitable for the fault analysis of power system is constructed. The algorithm and mother wavelet are used to discriminate the inrush current in transformer's differential protection. Results of EMTP simulations show that this method is feasible.

Key words: wavelet transform; tranformer protection; inrush current

(上接第 31 页 continued from page 31)

Relation between load impedance and distance relay with quadrilateral characteristics

ZHANG Tai-sheng¹, LUO Cheng-lian¹, DU Ling¹, LIU Hai-yang²

(1. Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450052, China; 2. Luoyang Shouyangshang Power Plant, Luoyang 417900, China)

Abstract: Because the value of the resistance components can be set independently, a quadrilateral - characteristic distance relay is very sensitive to a large earthed resistance when faults. In view of that, the relation between the load impedance and the quadrilateral characteristics of a distance relay in $R - X$ plane is analyzed in detail. And also, the method to reliability coefficient calculation is put forward.

Key words: quadrilateral - characteristic; distance relay; load