

小波变换与继电保护技术

葛耀中 西安交通大学电气工程系 (710049)

【摘要】 介绍了小波变换的基本概念及其应用现状,从继电保护技术的观点出发讨论了小波变换的特点,小波变换的奇异性检测原理及其在继电保护技术发展中的作用。

【关键词】 继电保护 小波变换 行波测距

前言

电力系统继电保护是一门综合性的科学,它既古老又年轻,这是因为它已有着近一百年的历史,同时又像一些新兴科学一样处于不断发展中。回顾继电保护技术发展史可以清楚地看出相邻科学技术的重大进展都将引起继电保护技术的巨大变革。当前我们正面临继电保护技术由模拟式向数字式发展的新时期,微机保护的实现为继电保护装置智能化展现了广阔的前景。

在微机保护中,数字信号处理已成为故障信息的提取与识别的基本手段。目前微机保护原理基本上是用工频量实现的,有些保护中也用到二次、三次或五次谐波,为了从故障信息中获取上述分量,富里叶变换是一个十分有效工具,并得到非常广泛的应用。但是,对利用故障暂态行波实现的保护和故障测距来说,富里叶变换却遇到了困难,这是因为输电线路发生故障后的暂态行波是一个突变的、具有奇异性的信号,对于这种信号的分析用富里叶变换是无能为力的,这是因为富里叶变换是纯频域分析方法,它在时域上没有任何分辨能力。它即不能刻划出暂态行波到达观测点的准确时刻,也不能确定行波幅度和极性。近年来,一种称为小波变换的数学理论和方法在数学界被认为是富里叶分析的重大发展,在应用科学领域被认为是工具和方法上的重大突破,它迅速地在信号处理、图象边缘检测、模式识别等领域得到有效广泛的应用。从继电保护技术观点看,小波

变换最突出的特点是:它在时域和频域同时具有良好的局部化性质,因此成为分析象暂态行波这样非平稳变化或具有奇异性的其它故障信号的锐利工具。本文将对小波变换作深入浅出的介绍,使读者对小波变换有一个初步的认识,同时用实例说明它在行波测距和保护中的应用的成效。

1 小波变换的基本概念

小波分析是一个新的数学分支,它是泛函分析、富里叶分析、样条分析、调和分析、数值分析的最完美结晶,它已广泛地用于信号处理、图象处理、语言分析、模式识别、量子物理及众多非线性等领域,小波变换已开始电力系统中得到应用,本节将简要地讨论小波变换的基本思想及基本概念。

1.1 小波分析的思想来源

小波变换分析来源于信号分析,长期以来,无论是数学界还是信号分析界都在不断寻求一种能将纯时间或纯频域二者结合的分析方法,因此出现了时频局部化分析的思想,即同时提供一个信号的时域和频域的局部化信息。窗口富立叶变换是一种基本的时频分析法,它对一个信号开窗,在时间有限的窗口上对信号进行富氏变换,从而得出其局部化频率信息。但因它的窗口的大小和形状是固定不变的,不能及时反应信号的突变,因此还必须继续寻找其它的方法来表示信号。理论和实践表明,分析非平稳变化信号或具有奇异性突变信号的最有效的方法是小波变换分析法。

1.2 什么是小波变换

小波变换可以定义为把一个离散信号或图

象用一组具有不同尺度和不同位置的小波函数表示。小波变换采用快速塔式算法,塔式算法包括一系列线性滤波器运算,并且是在对输出采样减半进行的。

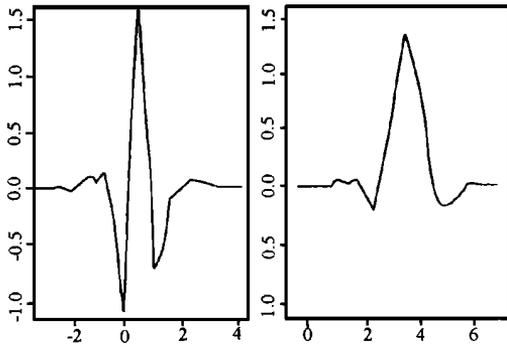


图 1

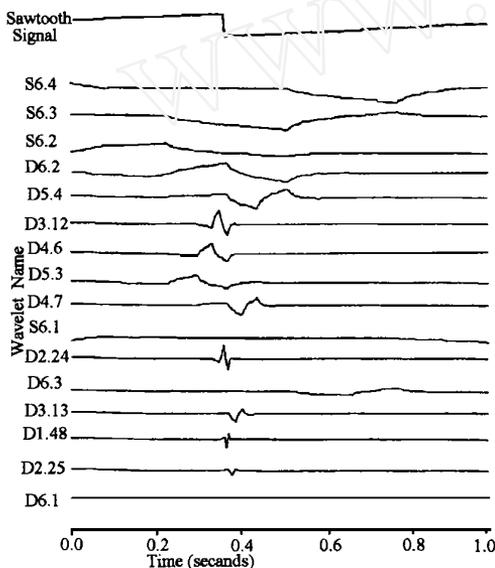


图 2

为了进一步理解上述定义,我们首先看一下什么是小波?小波是一个振荡波形,它最多持续几个周期。一个给定的小波具有位置和尺度,它特别适合于表示一个具有不连续性的信号或图象。此外,小波是各种各样的,并且还会不断发现新的小波及其函数。图 1 所示的小波是一个例子,它是在本世纪 80 年代末由 I. Daubechies 教授发现的。

在图 2 中给出了用小波变换进行信号分析的例子。被分析的信号是一个锯齿波,信号起初随时间增大,突然降低后又逐渐增大。这一信号波形用不同信号和尺度的小波表示,如图 2 所示。由图可见,粗尺度的哪些小波刻划信号平滑的上升部分,而细尺度的小波则描述着信号中的突变部分。图 2 的锯齿波信号也同样可用富立叶变换来分析。分析结果表明,在每秒采样 256 次的条件下,上述信号可用 16 个小波来表示,而用富立叶变换时,则需用 256 个正弦波,这是因为富立叶变换很难刻划信号中间突变部分的缘故。

2 小波变换的特点

小波变换的重要特点是它具有良好的时频局部化分析能力,或称为变焦性能,也就是说,它是一种能聚焦到信号或图象的任何微小细节进行分析的工具,因此被誉为数学显微镜。

首先让我们从富立叶变换谈起。富立叶变换的实质是:把一个信号波形分解成不同频率的正弦波之和,它们是从 - 到 + 时域内的函数。如果这些正弦波加起来成为原来的波形,那么就确定这个波形的富立叶变换。如前所述,与富立叶变换不同,小波变换是把一个信号分解成不同尺度和位置的小波之和,小波在时域中是局部化的,它持续只有少数几个周波。正因为如此,小波变换才在时域和频域同时具有良好的局部化性质。

为了进一步说明小波变换的特点,我们再看一下信号时频局部化分析的问题。在信号分析中,有两种方式来描述信号,把时间作为自变量而把信号的某一特征作为因变量来描述信号;此时,自变量所取值范围称为时域。另一种最常用的方法是用信号的富立叶变换来描述它的频率特性,所以,富立叶变换可以看作是时间函数在频域上的表示。富立叶变换频率所包含的信息和原函数所包含的完全相同,不同的仅是信息的表示方法。虽然富立叶变换能较好地刻划信号的频率特性,特别那些本质上含有正弦波性质的信号,例如语言信号等。但是它不

能提供在时域内的任何信息,而在很多实际问题中所关心的是信号在局部范围中的特征,这个任务是富立叶分析不能胜任的,这就需要时频分析法。时频分析法又称为时频局部化方法,时频局部化就是希望找到一种信号的表示方法,它能够在整体上提供信号的全部信息,同时又能提供任一局部时间内信号变化激烈程度的信息,加窗富立叶分析就是一个例子。

加窗富立叶变换是在富立叶变换中加入一个时间上有限的时间函数 $g(t)$,表示为

$$G(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(\tau - t) e^{-j\omega(\tau - t)} d\tau$$

式中 $e^{-j\omega t}$ 起频限作用, $g(t - \tau)$ 起时限作用,综合起来起到时频双限制作用,用图形表示为图3所示。随着 t 在时间轴上移动,使 $f(t)$ 进入被分析状态。 $g(t)$ 称为窗口函数,于是加窗富立叶变换 $G(\omega, t)$ 大致反映了在时刻 t 时频率 ω 信号成分的相对含量,因此可以同时提供时域或频域的局部化信息。

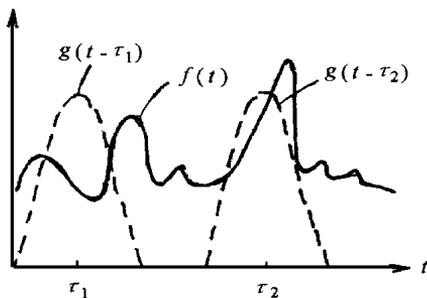


图3

尽管加窗富立叶变换属于时频分析,但它的窗口形状和大小是固定不变的,因此仍不能敏感地反映出信号的突变。因为一个信号的频率反比于时间的周期长,所以高频信息对应窄时窗,低频信息对应宽时窗,显然,窗口富立叶变换仍有缺陷。

小波变换与加窗富立叶变换虽同属时频分析,但它们在性质上还有很大差异。小波变换发展了加窗富立叶变换的思想,但它的窗口是变化的,窗口宽度随频率增高即缩小,如图4所示,正是在这一意义上,小波变换被誉为数学显

显微镜。

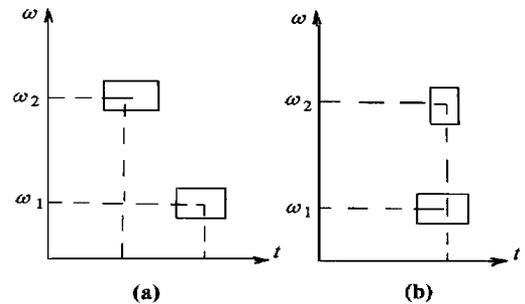


图4

3 小波变换的奇异性检测原理

在电力系统中发生故障会出现某些电气量的突变,继电保护技术的基础在于检出故障,其中包括故障发生的地点及时刻等,因此奇异性检测理论对继电保护技术有特殊重要的作用。

一个信号 $f(t)$ 在某处间断或某阶导数不连续,则称为 $f(t)$ 在该处有奇异性,检测信号奇异性的传统方法有频域法和时域法。富立叶变换是频域法,如上所述,这种方法不能具体地检出某一特定时刻的奇异性。利用求导数的方法是时域法,由于不能有效地区分信号和噪声干扰,或是造成奇异性信号检测出错,或是检测不出信号。为了消除干扰,传统的方法是先对信号进行滤波,但结果是即抑制了干扰,也平滑了信号的奇异点。

小波变换的奇异点检测理论是建立在多尺度边缘检测和奇异点对应于模极大值的基础上的。图5给出了雅号 $f(t)$ 的小波变换 $W_{s,f}(t)$ 的模极大值的示意图。图中 $f(t)$ 是在 t_0 处出现奇异点的信号,它先经平滑函数 $\phi(t)$ 进行平滑处理,平滑函数通常用高斯函数,小波变换 $W_{s,f}(t)$ 可理解为函数 $f(t)$ 在尺度 s 上经平滑后的一阶导数,小波变换 $W_{s,f}(t)$ 在 t_0 时刻出现极大值 $W_{s,f}(t_0)$,它与信号的奇异点相对应。而多尺度边缘检测则是采用平滑函数对信号在不同尺度下进行平滑,然后从一阶导数检测其奇异点。图6给出了利用多尺度边缘检测的理

论对混有噪声的信号在不同尺度下进行分解,然后再分析信号和噪声在不同尺度下的表现,从而可有效地消除噪声,保留了信号的例子。

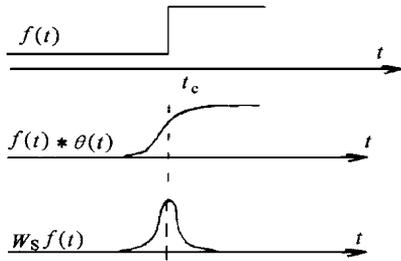


图 5

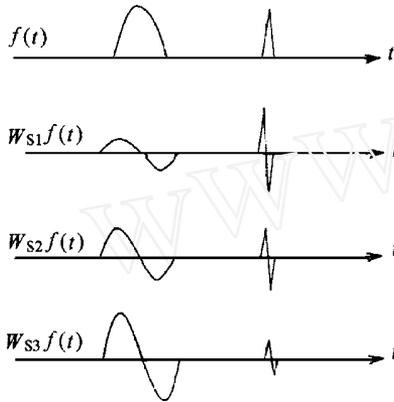


图 6

4 小波变换的用途举例

由于小波变换能有效地刻划具有间断性质的信号和图象,因此它能很好地解决诸如数据压缩和消噪的问题,而且在某种意义上,小波变换更容易解释,奇异性和边缘性对富立叶变换是一个难题,对小波变换则可迎刃而解,因此小波变换已成为工程技术人员快速识别图象和信号中局部特性的有效手段。

4.1 数据压缩

数据压缩广泛用于各种通讯及信号处理中,由于传输时间和存储空间的限制,数据压缩的思想是力图在传输和存储信号时尽可能紧凑和准确地用少量的数据去表示一个信号。常用的方法是将信号编码。通常信号并非直接编码,而是将其变换,然后将变换后的系数编码。

目前,流行的是离散余弦变换的方法。分析结果表明,小波变换比离散余弦变换更为有效。图 7(a) 给出了一个地震信号,这个信号分别用 100 个小波系数或 100 个离散余弦变换系数来表示后的重构波形分别如图 7(b)、(c) 所示。由图可见,小波变换能更真实地刻划原有的信号。将小波变换用于继电保护技术中必将提高数据传输和信号处理的效率。

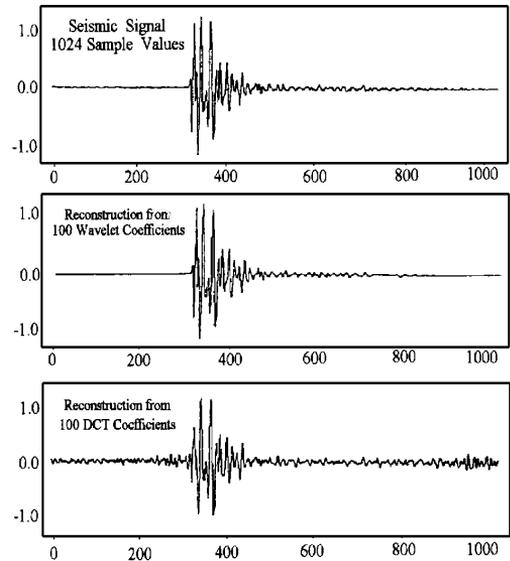


图 7

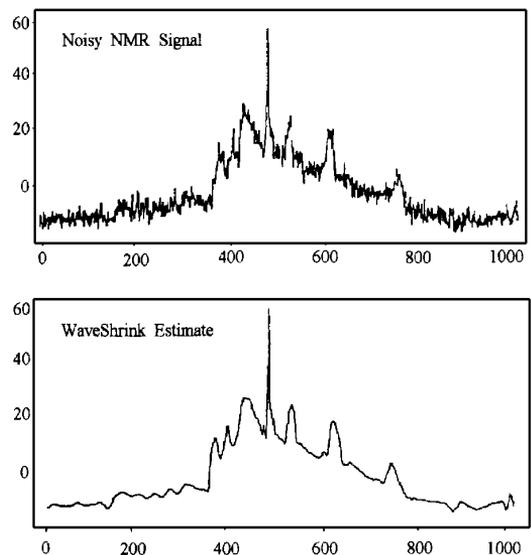


图 8

4.2 信噪分离与滤波

信噪分离与滤波是获得信号的常用方法。利用小波变换消噪和滤波有时会比频域法容易得多。用小波变换可消除各种形式信号中的噪声,例如突变性、尖峰性或其它非光滑性信号等。

图8(a)是一个核磁共振信号,其中参杂着大量噪声,经小波变换消噪后的信号波形如图8(b)所示,将图(a)和(b)对比可以看出小波变换在信噪分离上的效果。

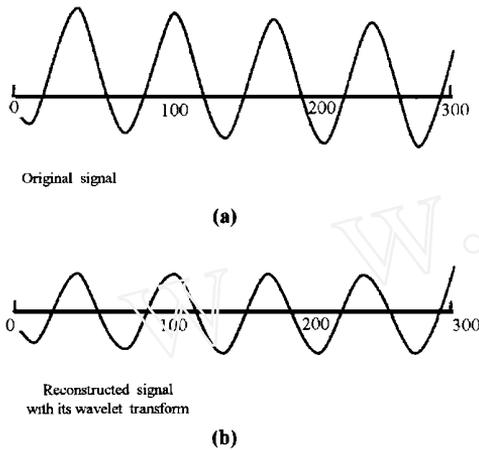


图9

图9给出了一个含有非周期分量的短路电流用小波变换滤波前、后的波形。小波变换能够把信号划分为不同频带,根据信号在不同频带下的小波变换,去掉其中非周期分量比较集中的低频分量,然后再重构信号,重构信号中几乎不包括非周期分量。

4.3 故障信息的提取与识别

故障信息的提取与识别是电力系统继电保护技术的基础。目前,在继电保护装置中(包括微机保护装置)广泛利用的是故障信息中的工频分量。此外,还有行波保护和超高速保护,它们是建立在反应故障暂态分量的基础上的,尽管它的超高速动作性能曾引起人们的极大兴趣和关注,但因没有找到实现行波和超高速保护时解决快速动作与可靠性之间矛盾的有效途径,所以近年来人们侧重于利用故障分量中的

工频或稳态分量实现保护。

小波变换所具有的良好时频局部化分析能力为分析研究行波保护和超高速保护提供了一个锐利的工具,它使快速可靠地提取和识别故障暂态行波信息成为可能。小波变换奇异性检测原理已成功地用于暂态行波故障测距中。此外,小波变换用于行波保护的研究也已取得令人鼓舞的结果。

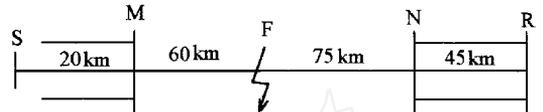


图10

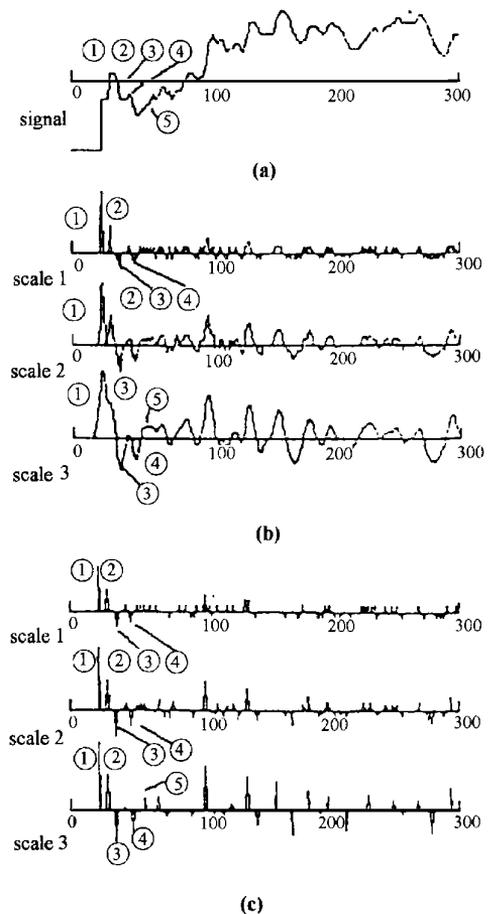


图11

作为一个例子,图10示出了一500kV三相输电系统接线图,故障线路为MN,故障点为

F 点,故障性质为 A 相单相接地,故障线路长度为 135km, F 点距 M 母线 60km, 距 N 母线 75km。检测点设在 N 母线,相邻线路长度为 45km,由故障点所产生的暂态行波电流波形(N 端)以及小波变换如图 11 所示。对 A 相电流信号(图 11a)施行小波变换,变换只进行了三次,分别对应于尺度因子为 $2^1, 2^2, 2^3$ 。图 11(c)示出了对应于图 11(b)的小波变换模极大值。

由图 11 可见:

(1)随着行波陆续到达检测母线,行波信号呈现“突变”,对应于“突变”的信号,其小波变换出现模极大值,其模极大值的位置和“突变点”一致,分别为图中 点;

(2)图中 点分别是初始行波电流到达母线和故障点反射波到达母线, 点对应于零模分量, 点分别对应于相邻母线的反射波和对端母线的反射波并由故障点透射过来的行波分量;

(3)由不同尺度下的小波变换(图 11b)及其模极大值(图 11c)可见,小波变换具有良好的消噪性能。

6 小结

本文对小波变换的实质及其应用作了简要的说明,小波变换所具有的时频局部化分析的卓越能力必将进一步促进电力系统继电保护技术的发展。目前小波变换在继电保护技术中的应用尚处于起始阶段,还有大量理论和实用问题有待不断深入研究。小波变换用于故障暂态行波的提取和识别及其在行波测距中的成功应用向人们展示出小波变换在继电保护中应用的诱人前景。

参考文献

- 1 秦前清、杨宗凯编著. 实用小波分析. 西安电子科技大学出版社,1994
- 2 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障距离研究. 西安交通大学电气工程学院,博士论文,1996
- 3 董新洲、耿中行、葛耀中等. 小波变换应用于电力系统故障信号分析初探. 中国电机工程学报, 1997. 6
- 4 Andrew Bruce et. al. Wavelet analysis. IEEE Spectrum, October, 1996
- 5 葛耀中著. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安交通大学出版社,1996

葛耀中,男,68岁,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护基础理论与应用的研究。

WAVELET TRANSFORM AND PROTECTIVE RELAYING TECHNOLOGY

Ge Yaozhong (Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China)

Abstract The wavelet transform and its application are introduced. The distinguishing features and the singularity detection theory of wavelet transform associated with protective relaying technology are discussed. An example is given to verify the effectiveness of wavelet transform application to fault location based on travelling waves.

Keywords protective relaying wavelet transform fault location travelling waves

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告