

小波变换在行波故障检测中的应用

董新洲 贺家李 天津大学电力系 (300072)

葛耀中 西安交通大学电力系 (710049)

【摘要】 正确识别和检测线路故障后的行波信号是实现行波保护和故障测距的关键。利用小波变换有效地识别出了混杂在噪声中的行波信号,从而为行波故障检测提供了依据并构造出了基于小波变换的行波故障启动元件。

【关键词】 行波 小波变换 故障检测 故障启动元件

前言

高压输电线路发生故障后的暂态行波中包含着丰富的故障信息,这些信息包括:由故障点产生的初始行波到达故障点标志着故障发生;三相行波的幅值和相位包含着故障相信息;初始行波和随后的反射行波到达检测点的时间差代表着故障距离;线路两端行波的极性可用于区别区内和区外故障等等。正确识别和充分利用这些故障信息可以构成超高速动作的行波保护和实现精确故障测距^{[1][2]}。

行波信号是高频暂态信号,易于和噪声干扰(线路上的干扰、CT、PT及仪器中的干扰)相混淆,造成保护装置误动作和测距失败。因此有效剔除噪声干扰从而提取出有用的行波信号是实现行波保护和故障测距的关键。

本文利用小波变换的时频局部化性能,对混杂有噪声的行波信号施行小波变换,根据它们在不同尺度下的小波变换模极大值的表现规律,有效识别出行波故障信息以实现正确的行波故障检测,进而构造出基于小波变换的行波故障启动元件。

1 二进小波变换及信号的奇异性检测理论^[3]

1.1 二进小波变换

1998-06-19 收稿

*国家教委博士点基金资助项目
中国博士后科学基金资助项目

基小波是指满足以下条件的函数 $\psi(x)$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (1)$$

表示对函数 $f(x)$ 的 s (尺度因子) 伸缩, $\psi_s(x)$ 被称为小波

$$\psi_s(x) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x}{s}\right) \quad (2)$$

函数(或信号), $f(x)$ 在位置 x 、尺度 s 的小波变换 $W_s f(x)$ 被定义为

$$W_s f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_s(x-t) dt \quad (3)$$

当 s 取为 2^j , $W_{2^j} f(x)$ 被称为函数 $f(x)$ 的二进小波变换,此时的 $\psi(x)$ 被称为二进小波,它满足稳定性条件:当且仅当在两个常数 $A, B > 0$, 使得

$$A \leq \sum_{j=-\infty}^{+\infty} |W_{2^j} f(x)|^2 \leq B \quad (4)$$

成立

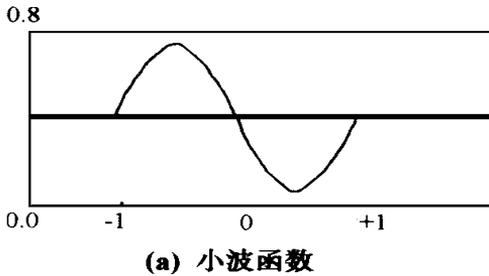
二进小波变换由于具有平移不变性常用于信号检测和模式识别,常用的小波函数是 B 样条函数的导函数,图1示出了具有紧支集的二阶样条小波和它的原函数紧支集的二阶样条^[3]。

1.2 信号的奇异性检测理论^[3]

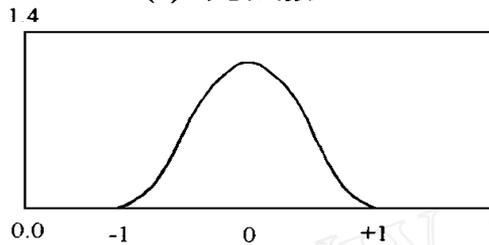
若函数 $f(x)$ ($f(x) \in R$) 在某处间断或某阶导数不连续,则称该函数在此处有奇异性;若函数 $f(x)$ 在其定义域有无限次导数,则称 $f(x)$ 是光滑的或没有奇异性。一个突变的信号在其突变点必须是奇异的。检测和识别信号的

突变点并用奇异性指数 lipischitz 来刻划它就是信号的奇异性检测,它包括:

- (1) 信号奇异性的数学描述;
- (2) 信号奇异性和小波变换的关系;
- (3) 典型信号的奇异性。



(a) 小波函数



(b) 原函数

图1 小波函数

一个函数(或信号) $f(x)$ 在 R 在某点的奇异性常用其奇异性指数 lipischitz 来刻划。

定义 设 $0 < \alpha < 1$, 在点 x_0 , 若存在常数 K , 对 x_0 的邻域 x 使得下式成立

$$|f(x) - f(x_0)| \leq K |x - x_0|^\alpha \quad (5)$$

则称函数 $f(x)$ 在点 x_0 是 Lipschitz α ;

如果 $\alpha = 1$, 则函数 $f(x)$ 在 x_0 是可微的, 称函数 $f(x)$ 没有奇异性; 如果 $\alpha = 0$, 则函数 $f(x)$ 在 x_0 间断。 α 越大, 说明奇异函数 $f(x)$ 越接近规则; α 越小, 说明奇异函数 $f(x)$ 在 x_0 点变化越尖锐。

函数(或信号)的奇异性可用其 lipischitz 来刻划, 其数值可通过小波变换模极大值在不同尺度的数值计算出来^[3]

函数 $f(x) \in L^2(R)$ 与它的小波变换满足如下关系

$$|W_s f(x)| \leq K(2^j) \quad (6)$$

当 s 取为 2^j 且 $W_2^j f(x_0)$ 是小波变换模极大值时, 从式(6)可得

$$W_2^j f(x_0) = K(2^j) \quad (7)$$

从而 lipischitz 可由下式来计算

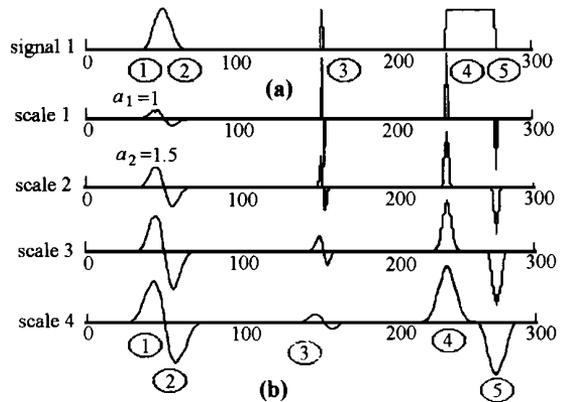


图2 拥有五个尖锐交化点的信号及小波分解

(a) 信号 (b) 小波分解

$$= \log_2 \frac{W_2^{M+1} f(x_0)}{W_2^M f(x_0)} \quad M \quad Z \quad (8)$$

图2示出了拥有五个尖锐交化点的信号及小波分解, 使用式(8)计算得到的 lipischitz 依次是 0.585, 0.585, -1, 0, 0。其中的 -1 表明该点的奇异性比间断(= 0)还要严重, 它是一个函数。

2 基于小波变换的行波故障检测

2.1 行波信号的小波变换

高压输电线路发生故障后, 在故障点附加电源的作用下, 线路上将出现向两侧变电站母线运动的行波。随着各个行波分量陆续到达检测点, 行波信号将呈现出明显的突变。对其施行小波变换后, 小波变换将呈现模极大值。如图3所示。正确识别第一个到达检测点的初始行波, 可判定故障发生。

实际得到的行波信号不会象图3所示的那样规则, 往往和各种噪声混杂在一起, 从而给行波检测造成困难。传统的数学方法对此是无能为力的^[2], 这就是把小波变换引入行波分析的原因。

以下结合行波启动元件的构造作进一步的探讨。

2.2 基于小波变换的行波故障启动元件

启动元件用于故障后快速启动继电保护或故障测距装置。利用行波故障分量的启动元件根据比较初始行波的幅值和给定的整定值的大小来构成。和其它启动元件一样,要求它在故障时可靠启动而在非故障时不误启动。由于对行波启动元件要求灵敏度很高,因此很难保证非故障时不误启动,当采用行波信号的瞬时采样值启动判据时尤其如此^[1]。

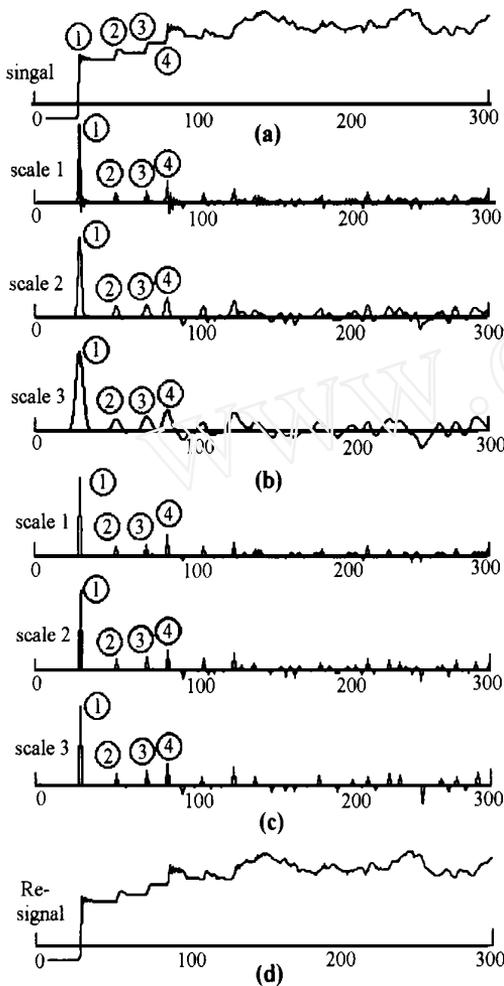


图3 暂态电流行波及其小波变换

究其原因,除了2.1所述的由于噪声干扰存在之外,还由于故障行波信号难以与线路开关的分合闸操作及不造成故障的雷击等扰动相区别。对于后者,它是行波启动元件的先天不足,这里暂不讨论;对于前者,若采取合适的消

噪手段并设置合适的门槛,有可能做到非故障情况下的不误启动。

根据上述思想并考虑1.2的结论(奇异信号的 lipischitsz 大于0 小于1; 函数的 lipischitz 小于0),可以按照下述思路构造行波故障启动元件。

首先观察图4所示的混杂有噪声的电流行波信号及其小波变换模极大值的变化规律。

由图4可见,突发性的脉冲干扰 a、噪声信号 1、2、3和行波信号 b 在小波变换下的模极大值的表现是不同的:对于突发性的脉冲干扰及噪声信号(a、1、2、3),其小波变换模极大值随尺度因子的增大而迅速衰减;而行波信号(b)的小波变换模极大值随尺度因子的增大而保持不变。据此启动元件的启动条件可设定为:对于保护或者测距装置所检测到的信号,如果其小波变换的模极大值增大或不变,则判定为行波信号到来,启动元件应启动,否则启动元件不动作,用式子可表示成:

$$I_2^{j \max} \quad I_2^{j-1 \max} \quad (9)$$

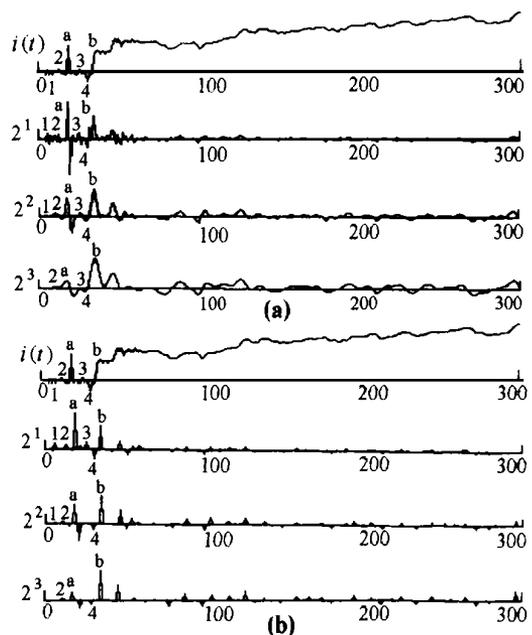


图4 混杂有噪声的电流行波及其小波变换

a. 信号和小波变换; b. 模极大值和重构信号

为了保证启动元件的可靠性,还可进一步

通过设定门槛来判断

$$I_{2'}^{\max} \quad I_{\text{set}} \quad (10)$$

合并式(9)、(10)就构成了基于小波变换的行波故障启动元件。

事实上,由故障点所产生的行波,当其运动到达母线时,由于线路电容的滤波作用及损耗,行波波头陡度将大大降低,因此绝大多数行波信号都不会呈现间断性质。结果是:行波信号的小波变换模极大值必然增大(尺度因子增大),而噪声的小波变换模极大值必然减小(尺度因子增大),从而使得行波和噪声更易于区别。

把上述基于小波变换的行波故障启动元件概括如下:

- (1) 对行波信号施行小波变换;
- (2) 考察随尺度因子变化时对小波变换模极大值的变化情况;
- (3) 满足式(9)、(10)则启动元件启动,否则启动元件返回。

以上所述的启动元件是以电流行波为基础构造的。同样的思想可应用于利用方向行波的启动元件的构造,限于篇幅,这里不再赘述^[2]。

基于小波变换的行波故障启动元件的运算量为 $N \log_2 N$, 因为基于二次样条小波和它的尺度函数其滤波器系数最多仅为4点支撑,当小波分解进行到第四层(2^4)时,则需要64点的采样数据就可以决定启动元件是否动作,此时运算量约为333,采用频率为12MHz的单

片机,启动元件可在1ms左右出口。

3 结论

- (1) 小波变换应用于行波故障检测是有效的;
- (2) 基于小波变换的行波故障启动元件较之直接采用瞬时值能有效抗干扰;
- (3) 没有对开关操作、不造成故障的雷击等可能造成启动元件误启动的情况进行进一步探讨。

参考文献

- 1 贺家李,葛耀中.超高压输电线路故障分析与继电保护.北京:科学出版社,1987.
- 2 董新洲.小波理论应用于输电线路故障测距研究,博士学位论文.西安交通大学,1996.
- 3 Mallat, S. and Zhong, S.: Wavelet transform maxima and multiscale edges, in wavelet and their applications, Beykin G. eds, Jones and Baftlett, Cambridge, MA, 1991.

董新洲 博士后。1983年毕业于西安交通大学电机系,1996年获西安大学工学博士学位。主要从事行波保护、行波测距以及小波变换在电力系统中的应用等研究工作。

贺家李 教授、博士生导师。长期从事电力系统故障分析、继电保护领域的科学研究工作。

葛耀中 教授、博士生导师。长期从事电力系统故障分析、继电保护领域的科学研究工作。

APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM IN DETECTION OF FAULT TRAVELLING WAVES

Dong Xinzhou, He Jiali (Tian Jin University)

Ge Yaozhong (Xi'an Jiao Tong University)

Abstract The key point to realize protective relaying and the fault location based on travelling wave is how to correctly distinguish and detect the travelling wave signal. In this paper, we detect the travelling wave signal from the noise with wavelet transform. As a result, a criterion which can distinguish the travelling wave signal from the noise is proposed. Also, a starting element based on the wavelet transform and the travelling waves is presented.

Key words travelling waves wavelet transform fault detection starting element of fault