

基于小波变换的电力系统故障测距装置启动判据方法

刘 扬, 向俊杰, 付 涛

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 电力系统故障或扰动时伴随着电流电压的突变, 而小波变换的窗口大小具有自适应性, 当减小尺度参数 a 的取值时, 可以使时窗宽度变窄、频窗高度增大, 有利于检测突变信号。在介绍小波变换的基础上, 通过建立故障行波的故障特征与小波变换模极大值之间的关系, 构造了一种基于行波原理的输电线路故障测距装置启动判据方法, 可以在故障发生的瞬间快速检测出电流或电压突变量信号。

关键词: 小波变换; 行波; 输电线路; 模极大值

Abstract: The failure or disturbance of power system always follow along with the abrupt change of current and voltage. And the window size of wavelet transform has the adaptability. When reducing the values of scale parameter, the window width can be narrowed and the high-frequency window can be increased, which is beneficial to detect the signal of abrupt change. On the basis of the introduction of wavelet transform, the activated criterion method of transmission line fault location device based on the principle of traveling wave is constructed by establishing the relationship between the failure characteristics of fault traveling wave and the modulus maxima of wavelet transform, which can quickly detect the instant signal of abrupt change of current or voltage when fault occurs.

Key words: wavelet transform; traveling wave; transmission line; modulus maxima

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)-0042-03

在电力系统运行中, 输配电线路担负着电能输送分配的重任, 很容易发生故障, 而用人工查找故障点又非常困难。故障定位技术可以根据线路故障时的故障特征迅速准确地进行故障定位, 不仅有利于线路及时修复, 保证可靠供电, 大大减轻人工巡线的工作量, 而且对电力系统的安全稳定和经济运行都有十分重要的作用。

通过建立故障行波的故障特征与小波变换模极大值之间的关系, 构造了一种故障测距及录波装置的启动方法, 以达到在线路故障时迅速、准确地启动装置, 以记录故障波形及实现故障定位。

1 电力系统故障特征

输电线路故障后, 故障点将产生沿线路运动的电压和电流行波; 由于波阻抗不连续, 行波在故障点、故障线路母线及与故障线路相连接的其他线路末端母线发生折、反射。行波的故障特征正是由行波分量之间的折、反射关系确定的^[1,2]。

(1) 随着各种行波陆续到达母线, 行波出现“突

变”, 分别标志着故障发生、行波从故障点到检测母线往返一次的时间等。

(2) 突变的幅值取决于故障发生时刻故障点初始电压的大小 $[-e(t)]$ 、波阻抗间断点 (像母线、故障点等) 的折、反射系数和行波的衰减特性。

(3) 突变的极性取决于故障发生时故障点初始电压的极性和波阻抗的间断性质。

2 小波变换奇异点与信号变换剧烈处的联系

两者间的联系建立在两个基本概念的基础上^[3]。

1) 设 $\theta(t)$ 是一起平滑作用的低通函数 [如高斯函数 $\theta(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}}$], 则如图 1(a) 所示, 信号 $x(t)$ 被 $\theta(t)$ 平滑得到 $y(t)$, 再求 $y(t)$ 的导数 $z^{(1)}(t)$ 。这一运算等效于直接用 $\frac{d\theta}{dt}$ 对 $x(t)$ 作处理。

同理, 图 1(b) 的两个处理也是等效的。

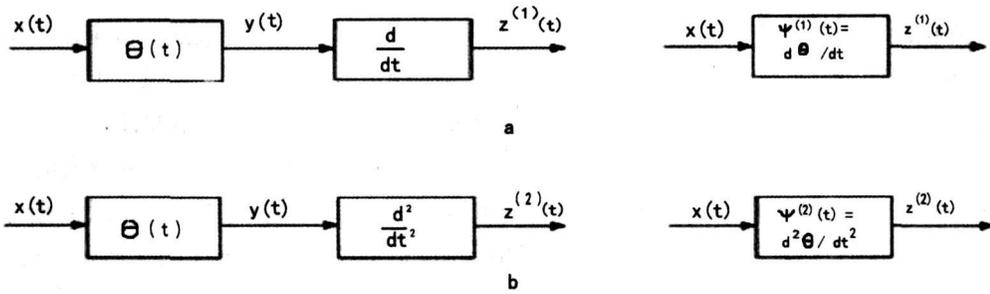


图 1 a为一阶, b为二阶导数情况

2)任何一个低通的平滑函数 $\theta(t)$ ($\int \theta(t) dt \neq 0$, $\Theta(\omega=0) \neq 0$), 其各阶导数 (例如 $\frac{d\theta}{dt}$, $\frac{d^2\theta}{dt^2}$) 必定是带通函数。因为根据傅里叶变换的微分定理, 它们的频率特性在 $\omega=0$ 处必有零点。因此, $\psi^{(1)}(t) = \frac{d\theta}{dt}$, $\psi^{(2)}(t) = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ 都可以用作小波变换的基本小波。

把上述两个概念结合起来便可得到下述结论:

如果 $\psi^{(1)}(t)$ 是某一低通平滑函数 $\theta(t)$ 的一阶导数, 则可用 $\psi^{(1)}(t)$ 对 $x(t)$ 作小波变换。此时小波变换的零点正是 $\frac{dy}{dt}=0$ 之处, 也就是 $y(t)$ 的极值点所在 ($y(t)$ 是 $x(t)$ 被 $\theta(t)$ 平滑后的结果); 小波变换的极值点是 $\frac{d^2y}{dt^2}=0$ 之处, 也就是 $y(t)$ 的转折点, 在极限情况 (阶跃) 下它也就是阶跃点。

如果 $\psi^{(2)}(t)$ 是平滑函数 $\theta(t)$ 的二阶导数, 则可用 $\psi^{(2)}(t)$ 对 $x(t)$ 作小波变换。此时小波变换为零之点是 $y(t)$ 的转折点 [$\frac{d^2y}{dt^2}=0$]; 极限情况下也就是

阶跃点。
这些结论对基本小波的伸缩 $\psi_{\alpha}^{(1)}(t) = \frac{1}{\alpha} \psi^{(1)}(-\frac{t}{\alpha})$, $\psi_{\alpha}^{(2)}(t) = \frac{1}{\alpha} \psi^{(2)}(-\frac{t}{\alpha})$ 当然也同样适用。

图 2 以阶跃式边沿和 δ 函数式尖峰两类突变为例, 对上述分析作一图示总结 (其中 $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$ 为小波基, $WT^{(1)}x(t)$ 、 $WT^{(2)}x(t)$ 分别为对阶跃输入和脉冲输入进行小波变换后的结果)。它也就是用小波变换的过零点和极值点来检测信号的局部突变的基础。

由图 2 可见, 突变点的位置有时是由小波变换的过零点反映的, 有时是由其极值点反映的。一般来说, 根据过零点作检测不如根据极值点。因为过零点易受噪声干扰, 而且有时过零点反映的不是突变点, 而是信号在慢区间的转折点。因此, 检测边沿宜采用如 $\psi^{(1)}(t)$ 的反对称小波, 检测尖峰脉冲宜采用 $\psi^{(2)}(t)$ 型的对称小波 [4~6]。

3 小波变换用于故障信号的判据

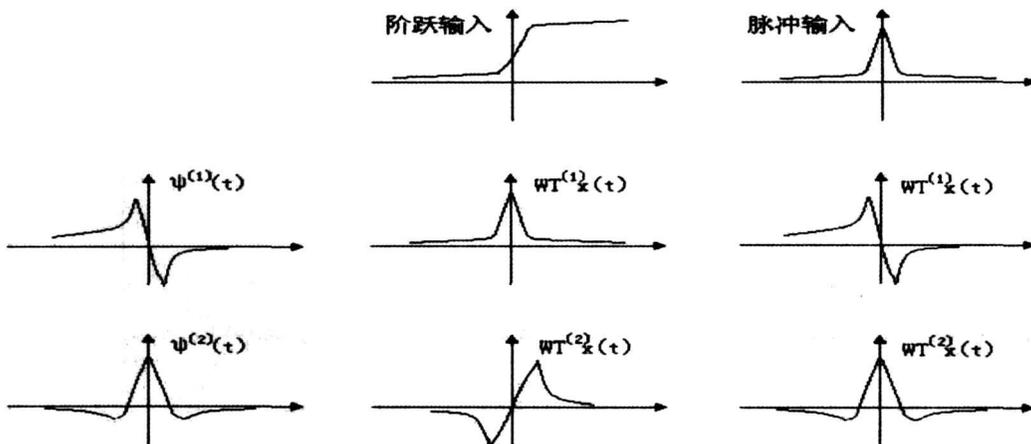


图 2 用 $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$ 作小波对阶跃输入及脉冲输入的处理结果

为了验证上节所述利用小波变换奇异点原理检测电力系统中故障或扰动时电流电压量的突变,用 MathWorks 公司的 MATLAB 中 PSB (Power System Blockset) 工具箱对此进行了大量的数字仿真。

3.1 仿真模型

仿真模型为双端供电的单回输电线路分布参数模型,如图 3 所示。

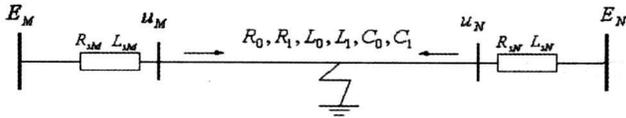


图 3 单回线路仿真模型

线路参数: $R_1 = 0.085 \Omega / \text{km}$

$L_1 = 1.016 \times 10^{-3} \text{ H} / \text{km}$

$C_1 = 1.1368 \times 10^{-8} \text{ F} / \text{km}$

$R_0 = 0.3165 \Omega / \text{km}$

$L_0 = 3.555 \times 10^{-3} \text{ H} / \text{km}$

$C_0 = 4.6673 \times 10^{-9} \text{ F} / \text{km}$

系统参数: $E_M = E_N = 220 \text{ kV}$

$R_{SM} = R_{SN} = 1 \Omega$

$L_{SM} = L_{SN} = 0.1 \text{ H}$

线路长度为 300 km, 两端电源相角差为 5° 。

3.2 数字仿真及结果

仿真数据的采样率为 4 kHz, 设置数据保存方式为前 5 个周波是故障前数据, 故障开始时刻为第 6 个周波开始, 即第 $4000 \times 0.02 \times 5 + 1 = 401$ 个采样点。

3.2.1 小波基的选择

对于小波基的选择要求既可以突出故障点, 又能尽量减少噪声造成的影响。尝试了 DB1、DB4 小波作为小波基, 发现相对于 DB1 小波, DB4 小波更符合要求。因为在短路电流比较小, 噪声较大的场合, 噪声对 DB1 小波造成的影响更大 (如图 4 所示), 而对 DB4 小波造成的影响较小如图 5 所示, 对比两图可见 DB4 小波分解后的数据在故障点处的突变更明显。

3.2.2 仿真结果

由仿真结果可知, 在各种短路情况下, 利用小波奇异点原理均可以较准确地检测到电力系统中故障或扰动时电流电压量的突变, 其误差通常控制在几个采样点左右。在有些情况下如线路另一侧出口处在电压过零点时短路, 造成本侧短路电流特别小时, 为了突出故障点, 可对采得的数据先进行一次微分。

具体应用于启动判断时, 可取当前时刻小波变换的模的绝对值与一个周期前对应时刻的小波变换的模的绝对值相减, 根据有效信号突变点所对应的小波变换模极大值具有沿尺度传递的特性, 当某一时刻在尺度 $j=2, 3$ 或 $j=3, 4$ 上, 小波变换模的突变量均超过各自尺度上的整定值时, 即可判定在该时刻发生了故障。这种方法可以大大缩减启动判断所需的数据窗的长度, 在理论上甚至可以达到不带延迟启动, 这在需要高速启动的场合例如超高压线路微机保护上面有很大的发展前途, 不过在如何区分系统扰动和故障仍需做更多的工作。

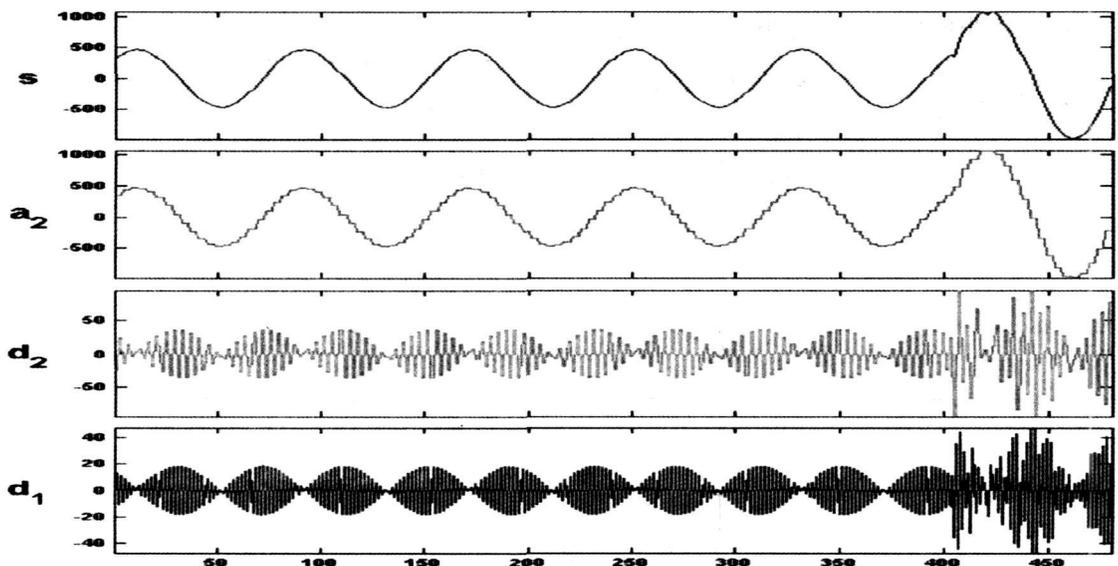


图 4 A 相相距 M 侧 270 km 处故障 DB1 小波分解图

(下转第 58 页)

[19] Massimo A, Antonio C, Nuccio S. A chip-Z transform based synchronizer for power system measurements[C]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement Technology Conference USA, 2002.

[20] Massimo A, Antonio C, Salvatore N. A PC-based instru-

ment for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems[J]. Measurement 2004, 35 (4): 371-380.

(收稿日期: 2008-10-29)

(上接第 44 页)

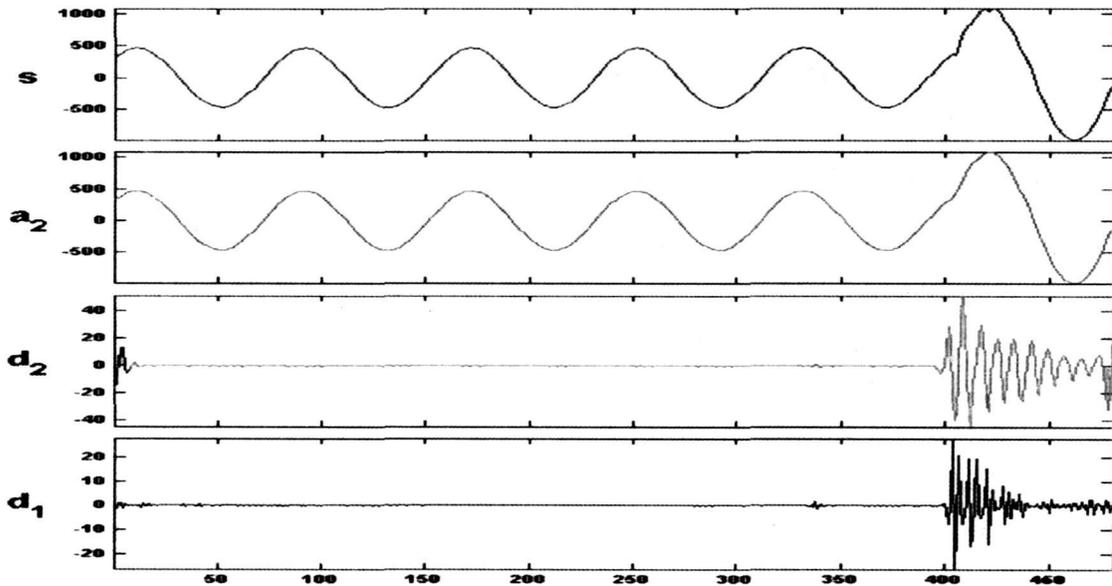


图 5 A 相距 M 侧 270 km 处故障 DB4 小波分解图

4 结 论

线路故障后的暂态行波中包含着故障信息,其故障特征是信号的突变,分析了利用小波变换作为故障判别启动判据的方法。它利用小波分析对突变信号的敏感性,采用对采集的数据进行小波变换后寻找奇异点的方法判别故障的发生,以此来启动故障测距或录波系统。通过 MATLAB 中的小波工具箱对上述方法进行的仿真表明了本方法的有效性^[7]。

参考文献

[1] 贺家李, 葛耀中. 超高压输电线故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[2] 金玉生, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 高压架空输电线路的故障测距方法[J]. 电网技术, 2000, 24 (4): 27-33.

[3] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.

[4] 蒋涛, 陆于平. 基于小波变换的单端输电线路行波故障测距[R]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会.

[5] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 36-39.

[6] 贾俊国, 范云鹏, 李京, 等. 利用线路行波的线路故障测距技术及应用[J]. 电网技术, 1998, 22 (8): 63-66.

[7] 董新洲, 贺家李, 葛耀中, 等. 基于小波变换的行波故障选相研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (1): 20-22.

作者简介:

刘 扬 (1986-), 男, 汉族, 湖北襄樊人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 武汉大学电气工程学院。

(收稿日期: 2008-12-15)