

# 基于信号奇异性检测的行波启动元件算法的探讨

魏军<sup>1</sup>, 罗四倍<sup>2</sup>

(1. 宁夏固原供电局, 宁夏 固原 756000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 行波启动元件是超高速暂态量保护中必不可少的组成元件。在总结小波变换与信号奇异性检测理论的基础上, 分析了现有的基于 Lipschitz 指数的行波启动元件算法, 指出其在弱故障下灵敏度不足, 可能造成启动元件的拒动, 并阐明基于二次 B 样条小波的小波变换模极大值的求取算法是导致出现这一问题的原因。针对上述问题, 提出改进的梯度算法, 将梯度的模极大值应用于行波启动元件。大量 ATP 仿真测试验证了该启动算法的性能优于现有启动算法, 可有效地提高反应故障的灵敏度。

**关键词:** 输电线路; 超高速保护; 暂态量保护; 行波; 启动元件; 小波变换; 奇异性检测

## Traveling-wave starting algorithm based on signal singularity detection

WEI Jun<sup>1</sup>, LUO Si-bei<sup>2</sup>

(1. Ningxia Guyuan Power Supply Company, Guyuan 756000, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The traveling-wave based starting element is absolutely necessary for transient based ultra-high-speed protection. Through summarizing the theory of wavelet transform and signal singularity detection, this paper analyzes the previously proposed starting algorithms, and indicates that because of utilizing the wavelet transform modulus maximum algorithm based on the quadratic spline wavelet, they have the sensitivity problem and may not operate under weak faults. Thus the paper presents the improved gradient algorithm to solve the above problem, and forms a new starting algorithm. A number of ATP simulation tests show that the new starting algorithm is superior to the previously proposed algorithms, and is capable of improving effectively the sensitivity.

**Key words:** transmission line; ultra-high-speed protection; transient based protection; traveling wave; starting element; wavelet transform; singularity detection

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0001-06

## 0 引言

随着电力系统的发展和现代科技的进步, 基于暂态量的超高速保护日益受到广大继电保护工作者的重视<sup>[1]</sup>。超高速暂态量保护原理突破了传统工频量原理的局限, 以其超高速动作特性更能满足互联大电网条件下系统对暂态稳定性的要求。

一套完整实用的超高速暂态量保护方案, 启动元件是必不可少的, 它担负着故障检测与启动保护的任務。超高速保护对启动元件提出了更高的要求: 在短时(如 1 ms)内做出正确判断——故障时要可靠灵敏地启动, 正常或噪声干扰情况下不误启动; 准确地标定故障发生时刻, 以使故障处理程序能正确地获取故障发生前后的数据。

故障暂态过程是由于故障点行波在输电线路

上多次折、反射的叠加而形成的, 故障后的暂态行波中包含着丰富的故障信息, 其中故障初始行波到达保护安装处即标志着故障发生, 这为行波启动元件的构造提供了物理上的可能。

再来看一下故障暂态信号的特点: 它是具有突变性质的非平稳信号, 其频率随时间的变化而变化。而小波变换具有良好的时频局部化性能, 非常适合于非平稳信号的分析, 并且具有信号奇异性的检测能力<sup>[2,3]</sup>, 因此为行波启动元件提供了有力的数字信号处理工具。

基于此, 文献[4,5]分别提出了利用小波变换进行信号奇异性检测的行波启动元件算法。本文在总结小波变换与信号奇异性检测理论的基础上, 探讨了上述两种行波启动元件算法, 针对其可能存在的问题, 提出了相应的改进措施, 并以 ATP 仿真测试

验证了本文措施的有效性。

## 1 小波变换与信号奇异性检测<sup>[2,3,6]</sup>

数学上, Lipschitz 指数是函数局部正则性的一种度量。一般地, 函数在某一点的 Lipschitz 指数  $\alpha$  表征了该点的奇异性大小,  $\alpha$  越大, 该点的光滑度越高;  $\alpha$  越小, 该点的奇异性越大。

### 定义 1 Lipschitz 指数 $\alpha$

对于函数  $f(x)$ , 如果存在常数  $k>0$  及一个  $n$  阶多项式  $p_{x_0}(x)$  ( $n \leq \alpha \leq n+1$ ), 使得

$$\forall x \in R, |f(x) - p_{x_0}(x)| \leq k|x - x_0|^\alpha \quad (1)$$

则函数  $f(x)$  在点  $x_0$  的 Lipschitz 正则性定义为参数  $\alpha$  的上确界, 即  $\sup\{\alpha\}$ 。

如果式(1)对所有  $x_0 \in [a, b]$  成立, 且  $k$  与  $x_0$  无关, 则称函数  $f(x)$  在区间  $[a, b]$  上是一致 Lipschitz  $\alpha$ ,  $\alpha$  的上确界定义为函数  $f(x)$  在区间  $[a, b]$  上的 Lipschitz 正则性。

通过考察函数傅里叶变换的渐进衰减性可以测量函数在  $R$  上的一致 Lipschitz 正则性, 但却不能给出函数的局部正则性。小波具有良好的时域局部性。对于时域具有紧支撑条件的小波, 函数  $f(x)$  在尺度  $s$ 、位置  $x_0$  的小波变换  $Wf(s, x_0)$  只和点  $x_0$  领域(领域大小正比于尺度参数  $s$ ) 的函数值有关。在小尺度下,  $Wf(s, x_0)$  给出函数  $f(x)$  的局部信息。因此, 小波变换可以给出函数的局部 Lipschitz 正则性。函数  $f(x)$  在点  $x_0$  的局部 Lipschitz 正则性可以由  $x_0$  领域中小波变换的模在小尺度下的衰减性来度量<sup>[6]</sup>。

### 定义 2 影响锥

设小波函数  $\psi(x)$  具有紧支集  $[-c, c]$ , 则  $\psi((x-b)/s)$  的支集为  $[b-c, b+c]$ 。定义点  $x_0$  的影响锥为使得  $x_0$  含于  $\psi((x-b)/s)$  支集内的所有点  $(s, b)$  的集合, 则有  $x_0$  的影响锥为  $|b - x_0| \leq cs$ 。

影响锥内的  $Wf(s, b)$  受到点  $x_0$  的函数值的影响。若  $b$  在  $x_0$  的影响锥内, 则有

$$|Wf(s, b)| \leq As^\alpha \quad (2)$$

式中:  $A$  为常数。

式(2)表明  $|Wf(s, b)|$  与  $s^\alpha$  同级衰减, 随着尺度参数  $s$  趋近于零。如果  $f(x)$  在点  $x_0$  是正则的, 在影响锥  $|x - x_0| \leq cs$  内, 则  $Wf(s, x)$  快速衰减; 如果  $f(x)$  在点  $x_0$  具有奇异性, 则  $Wf(s, x)$  衰减较慢。

事实上,  $|Wf(s, b)|$  的衰减性由其局部极大值所控制。实际应用中, 信号的局部奇异性可以通过跟踪小波变换系数模的极大值线在小尺度下的收敛特

性进行检测和分析。

### 定义 3 模局部极大线

不同尺度下小波变换的模局部极大具有不同的性态。定义模局部极大线为尺度空间  $(s, x)$  中的连通曲线, 沿该曲线上所有的点都是模局部极大点。

基于小波变换模极大的信号奇异性检测和分析的一些结论如下。

设小波函数  $\psi(x)$  是紧支的, 是  $n$  次连续可微的平滑函数  $\theta(x)$  的  $n$  次导数, 具有  $n$  阶消失矩。

#### (1) 奇异性检测和定位

如果存在  $s_0 > 0$ , 对所有的  $s < s_0$  和  $x \in [a, b]$ , 使  $|Wf(s, x)|$  没有局部极大, 则函数  $f(x)$  在  $[a+\varepsilon, b-\varepsilon]$  ( $\varepsilon > 0$ ) 上是一致 Lipschitz  $n$  的。这表明, 只有存在一个小波极大点序列  $\{s_i, x_i\}_{i \in N}$  且在小尺度下收敛于  $x_0$ , 则  $f(x)$  在点  $x_0$  是奇异的。只要小波函数具有足够大的消失矩, 函数  $f(x)$  的每一奇异性就会产生模极大线。因此, 跟踪模极大线的收敛点  $x_0$ , 可以检测和定位奇异性。值得注意的是, 只能检测 Lipschitz 指数小于分析小波消失矩的奇异性。

#### (2) 局部 Lipschitz 指数估计

非振荡孤立奇异性的局部 Lipschitz 指数可以通过模极大线的  $|Wf(s, x)|$  的衰减程度进行估计。 $f(x)$  在  $x_0$  的领域内是一致 Lipschitz  $\alpha$ , 当且仅当存在常数  $A > 0$  时, 影响锥  $|x - x_0| \leq cs$  中的模的极大点  $(s, x_i)$  (设收敛于  $x_0$  的模极大点包含在锥中) 满足

$$|Wf(s, x_i)| \leq As^\alpha$$

即

$$\log_2 |Wf(s, x_i)| \leq \log_2 A + \alpha \log_2 s \quad (3)$$

上式给出函数  $f(x)$  在  $x_0$  的 Lipschitz 正则性  $\alpha$  与小波变换模极大值衰减性的关系,  $\alpha$  对应于  $s$  趋近 0 时直线  $\log_2 |Wf(s, x_i)| - \log_2 s$  的最大斜率。

实际应用中, 为了减小计算的复杂度, 通常采用二进小波变换, 即只考虑二进尺度 ( $s_j = 2^j$ )  $j \in Z$  的小波变换模极大, 函数的正则性可以由小波变换模极大沿二进尺度的衰减性来表征。

## 2 行波启动元件算法的研究

### 2.1 基于小波变换模极大值的行波启动元件算法

在二进小波变换中, 尺度因子  $s$  的变化仅取二进序列  $\{2^j\}_{j \in Z}$ , 设  $(s, x_{\max})$  为影响锥  $|x - x_0| \leq cs$  中的模极大点, 则由式(3)可得

$$\log_2 |Wf(2^j, x_{\max})| \leq \log_2 A + j\alpha \quad (4)$$

上式近似处理 (取等号), 则有

$$\frac{|Wf(j+1, x_{\max})|}{|Wf(j, x_{\max})|} = 2^\alpha \quad (5)$$

式(4)和(5)给出了小波变换的模极大值随尺度  $j$  的变化规律: 若  $\alpha > 0$ , 则  $j$  增大, 小波变换模极大值  $|Wf(2^j, x_{\max})|$  也增大;  $\alpha < 0$ ,  $j$  增大,  $|Wf(s, x_{\max})|$  则减小;  $\alpha = 0$ ,  $j$  增大,  $|Wf(s, x_{\max})|$  则保持不变。

文献[4]认为故障行波的 Lipschitz 指数  $0 \leq \alpha \leq 1$ , 其小波变换模极大值随尺度  $j$  的增大而增大或保持不变; 而白噪声和脉冲干扰的 Lipschitz 指数  $\alpha < 0$ , 则小波变换模极大值随尺度  $j$  的增大而迅速衰减。据此文献[4]提出了基于小波变换模极大值的行波启动元件算法: 对电流信号进行小波变换, 考察小波变换模极大值和尺度  $j$  变化时小波变换模极大值的变化情况, 若满足式(5)和(6), 则启动元件动作, 否则启动元件返回。

$$I_{j, \max} \geq I_{\text{set}} \quad (6)$$

$$I_{j+1, \max} \geq I_{j, \max} \quad (7)$$

## 2.2 基于小波变换模之和的行波启动元件算法

注意到只有对于孤立奇异性, 式(3)和(4)才是严格成立的。输电线路近距离故障时, 后续反射波会很快到来, 如果它落入故障初始行波的影响锥内, 将可能造成基于小波变换模极大值的行波启动元件不能启动。

为解决上述问题, 文献[5]首先分析了输电线路故障行波波头的奇异性特点 (计及非孤立奇异性)——Lipschitz 指数  $-0.5 \leq \alpha \leq 1$ , 而工程中白噪声的 Lipschitz 指数  $\alpha = -0.5 - \epsilon$  ( $\epsilon > 0$ ), 脉冲噪声  $\alpha = -1$ 。接着提出了适于检测孤立和非孤立奇异信号的小波变换模之和法:

$x_0$  影响锥  $|x - x_0| \leq cs$  内的小波变换模之和为

$$Nf(s, x_0) = \int_{|x-x_0| \leq cs} |Wf(s, x)| dx \quad (8)$$

进一步推出,

$$Nf(s, x_0) \leq A's^{\alpha+1} \quad (9)$$

式中:  $A > 0$ , 也为常数。同样可得,

$$\log_2 Nf(s, x_0) \leq \log_2 A' + (\alpha + 1) \log_2 s \quad (10)$$

在二进小波变换中, 可相似地得到

$$\frac{Nf(j+1, x_0)}{Nf(j, x_0)} = 2^{\alpha+1} \quad (11)$$

以此为基础, 文献[5]提出了基于小波变换模之和的行波启动元件算法。该启动元件利用电流量分

析, 对于离散电流信号序列  $i(k)$ , 其执行步骤为:

(1) 计算尺度  $j=1$  上的小波变换系数  $Wi(1, k)$ , 若存在小波变换模极大值  $Wi(1, k_0) = \max\{|Wi(1, k)|\} > \epsilon_0$ , 则信号奇异。  $\epsilon_0$  为阈值。

(2) 计算奇异点  $k_0$  影响锥内的小波变换系数  $Wi(j, k)$ ,  $j=2, 3$ ; 进而求出  $k_0$  影响锥内的小波变换模之和  $Ni(j, k_0)$ ,  $j=1, 2, 3$ 。

(3) 若  $Ni(j+1, k_0)/Ni(j, k_0) \geq \sqrt{2}$  ( $j=1, 2$ ), 则判别该信号为故障行波, 启动元件动作; 否则判别该信号为噪声干扰, 启动元件不动作。

## 2.3 现有行波启动元件算法存在的问题及其改进

从上述两种行波启动元件算法来看, 在各自的适用范围内, 基于小波变换的信号奇异性检测理论是有效的, 判据(7)和执行步骤(3)的成立是有理论上的保证的, 能够可靠地区分故障行波与噪声干扰。但必须注意到的是, 这两种启动元件都需要检测信号是否存在奇异性, 即首先要求判据(6)和执行步骤(1)成立, 因而小波变换模极大值的求取方法对启动元件来说也至关重要。小波变换模极大值是怎样求得的呢? 它的求取算法能否灵敏地反应所有故障情况呢? 文献[4,5]都没有详细地考查, 本文对此将予以研究。

文献[4,5]都使用了二进小波变换, 采用的小波是紧支撑的具有 1 阶消失矩的二次 B 样条小波 (也称三阶 B 样条小波) [6]。

快速二进小波变换是通过在法语中称为 à trous 的滤波器组算法而计算 [7,8]。对任何滤波器  $x(n)$ , 记  $x_j(n)$  为在  $x(n)$  的每两个滤波器系数间插入  $2^j - 1$  个零后得到的滤波器, 在滤波器中插入零产生洞, 法语为 trous。设尺度滤波器为  $h(n)$ , 小波滤波器为  $g(n)$ , 原始信号为  $a_0$ , 则二进小波变换可由下式进行卷积运算求得。

$$\begin{aligned} a_{j+1}(k) &= (a_j * h_j)(k) \\ d_{j+1}(k) &= (a_j * g_j)(k) \end{aligned}, \quad j \geq 0 \quad (12)$$

这样原始信号  $a_0$  就可以由逼近系数  $a_j$  和不同尺度下的小波系数  $\{d_j\}_{1 \leq j \leq J}$  来表征。二次 B 样条小波对原始信号进行卷积运算时, 其尺度滤波器系数为:  $h(-1)=0.125$ ,  $h(0)=0.375$ ,  $h(1)=0.375$ ,  $h(2)=0.125$ ; 小波滤波器系数为:  $g(0)=1$ ,  $g(1)=-1$ 。

由快速二进小波变换的算法不难发现, 二次 B 样条小波计算尺度  $j=1$  上的小波系数  $Wi(1, k)$  时, 仅仅是进行了简单的梯度计算, 即

$$Wi(1, k) = i(k)g(0) + i(k-1)g(1) = i(k) - i(k-1) \quad (13)$$

超高速暂态量保护为了能够捕捉到故障行波及其暂态过程,对采样率要求很高,一般为几百 kHz 甚至更高,如行波测距装置的数据采样率已达 1 MHz。而故障初始行波到达保护安装处时,由于线路等的衰减作用,行波波头陡度将明显降低。这些因素造成有些故障时由上述简单梯度算法得到的小波变换模极大值  $Wi(1, k_0) = \max\{|Wi(1, k)|\}$  很小,致使启动元件灵敏度大为降低,可能出现拒动,对于弱故障(如故障初始角零度附近经较大过渡电阻的单相接地故障)更是如此。

如图 1(a)和 1(b)所示的典型单相接地故障的模量电流行波(为故障分量)及其第 1 尺度的小波系数,采样率为 400 kHz。其小波变换模极大值仅为 5.32,在有效的阈值之下是不可能动作的。

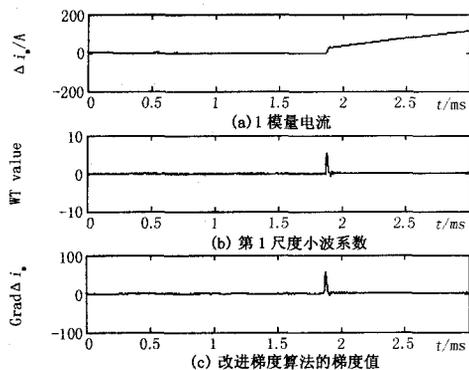


图 1 故障初始角 5°、过渡电阻 300 Ω 的 A 相接地故障  
Fig. 1 A-phase ground fault with inception angle 5° and path resistance 300Ω

为了有效解决上述问题,弥补现有两种行波启动元件存在的不足,本文提出如下的改进方法:

借鉴数字图像处理中的梯度算法<sup>[9]</sup>,采用改进的梯度算法:当前点后 3 个数据之和减去当前点前 3 个数据之和,用数学公式表示为

$$Grad(k) = \sum_{n=k+1}^{k+3} i(n) - \sum_{m=k-3}^{k-1} i(m) \quad (14)$$

这种改进的梯度算法既充分地利用了高速的采样数据又自然地实现了对采样率的四分频,而且具有一定的平滑消噪作用,计算也简单方便。如图 1(c)所示改进梯度算法计算的梯度值,其模极大值为 56.38,10 倍于小波变换模极大值,有效地提高了启动元件的灵敏度,能够保证判据(6)和执行步骤(1)的正确动作。因此,本文提出如下改进的行波启动元件算法:

(1) 由式(14)计算梯度值  $Grad(k)$ ,若存在梯度模极大值  $Grad(k_0) = \max\{|Grad(k)|\} > \varepsilon_0$ ,则信号奇异。 $\varepsilon_0$  为阈值。

(2) 计算奇异点  $k_0$  影响锥内的小波变换系数  $Wi(j, k)$ ;进而求出  $k_0$  影响锥内的小波变换模之和  $Ni(j, k_0)$ 。 $j=1, 2, 3$ 。

(3) 若  $Ni(j+1, k_0)/Ni(j, k_0) \geq \sqrt{2}$  ( $j=1, 2$ ),则判别该信号为故障行波,启动元件动作;否则判别该信号为噪声干扰,启动元件不动作。

该启动算法首先由三相电流故障分量进行 Clarke 相模变换<sup>[10]</sup>得到  $i_1$  和  $i_2$  两个线模量,在执行步骤(1)时,选取梯度模极大值较大的模量作为启动判别的模量。小波变换仍采用二次 B 样条小波进行快速二进小波变换。

### 3 ATP 仿真研究

本文改进的行波启动元件算法的执行步骤(2)、(3)所进行的故障行波与噪声的判别是有理论上的保证的,文献[5]也已用大量实例证明了此方法的有效性,因此本文的仿真研究首先集中于考查执行步骤(1)的改进,并与原算法相比较。

如图 2 所示的 500 kV 超高压输电系统作为测试系统,线路长度为  $l_{PM}=214$  km,  $l_{MN}=160$  km,  $l_{NQ}=301$  km,线路结构及参数取自东北电网董辽线,仿真模型采用频率相关模型,母线系统对地等效电容  $C_s$  为 0.01 μF。为了考查线路三相参数不平衡对启动元件的影响,本文仿真中的线路均不换位。数据采样率为 400 kHz,对位于被保护线路 MN 的 M 侧的启动元件进行性能测试。

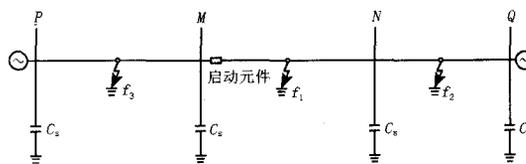


图 2 超高压输电系统  
Fig. 2 EHV transmission system

表 1、2 为部分仿真测试结果,所示的模极大值为两个线模量中的大者。其中,表 1 故障初始角固定为 45° (A 相);表 2 弱故障为故障初始角 5° 的 A 相接地故障。

从表 1 的测试结果看,改进算法的梯度模极大值比原算法的小波变换模极大值提高了 1 个数量级;对于表 2 中的弱故障,改进算法的性能明显优

于原算法, 在一些故障情况下, 原算法根本无法启动, 而通过本文算法的改进, 可以有效地提高灵敏度, 保证故障时的准确启动。

表 1 故障初始角一定时改进算法与原算法的性能比较  
Tab. 1 Comparison between the improved algorithm and the original algorithm under the fixed inception angle

故障位置	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	原算法 $Wi(1, k_0)$	改进算法 $Grad(k_0)$
线路 MN 中点	Ag	0	175.37	1070.15
		300	61.18	378.94
	ABg	0	494.27	2612.79
		300	498.21	2662.84
	AB	0	499.53	2680.24
		300	219.79	1180.12
ABC	0	472.08	2316.21	
	300	472.07	2316.17	
线路 NQ 中点	Ag	0	50.84	555.09
		300	18.20	198.38
	ABg	0	160.50	1707.88
		300	164.31	1752.25
	AB	0	165.64	1771.16
		300	72.95	780.18
ABC	0	162.24	1779.87	
	300	162.25	1779.95	
线路 PM 中点	Ag	0	122.65	1220.45
		300	43.54	436.07
	ABg	0	286.78	2770.17
		300	288.63	2789.12
	AB	0	289.27	2795.75
		300	127.38	1231.10
ABC	0	275.79	2657.50	
	300	275.78	2657.48	

表 2 弱故障时改进算法与原算法的性能比较

Tab. 2 Performance comparison between the improved algorithm and the original algorithm under weak faults

故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	原算法 $Wi(1, k_0)$	改进算法 $Grad(k_0)$
线路 MN	0	39.91	147.10
首端 1km	300	13.87	53.77
线路 MN	0	23.39	144.18
中点	300	8.16	51.05
线路 MN	0	14.93	150.75
末端 1km	300	5.32	56.38
母线 N	0	6.37	66.42
	300	2.61	26.35
线路 NQ	0	10.97	119.93
中点	300	3.93	42.87
母线 M	0	46.18	159.22
	300	10.21	68.27
线路 PM	0	36.90	368.18
中点	300	13.10	131.54

其次, 对噪声干扰情况和弱故障情况下启动元

件的动作性能进行考查。图 3 中标记①和②分别表示均匀分布和高斯分布的白噪声, ③表示线路 NQ 上距离 N 端 10 km 发生 A 相接地故障的 1 模量电流行波, 故障初始角  $5^\circ$ , 过渡电阻为  $300 \Omega$ 。本文改进的启动元件在这 3 种情况下的判别结果见表 3。不难看出, 虽然噪声干扰情况下的梯度模极大值要比弱故障时的大, 但前者小波变换模之和的尺度间比值均小于  $\sqrt{2}$ , 而后者均大于  $\sqrt{2}$ , 故启动元件动作为正确, 满足超高速暂态量保护的要求。

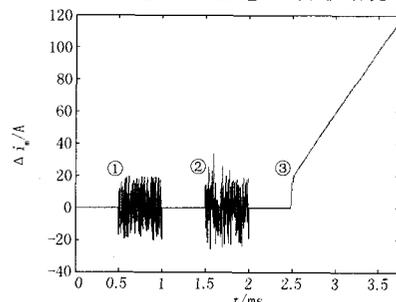


图 3 白噪声和故障电流行波

Fig. 3 White noise and current traveling-wave

表 3 图 3 各种情况下改进的启动元件的判别结果  
Tab. 3 Test results of the improved starting algorithm under each situation in Fig. 3

情况	$Grad(k_0)$	小波变换模之和 $Ni(j, k_0), j=1, 2, 3$	$Ni(j+1, k_0)/Ni(j, k_0)$	启动元件 动作情况
① 均匀 分布 白噪声	61.38	46.79	0.821 0	不启动
		38.41	1.183	
		45.44		
② 高斯 分布 白噪声	81.53	44.10	1.257	不启动
		55.46	1.079	
		59.82		
③ 故障 行波	30.23	7.938	2.933	启动
		23.28	2.623	
		61.06		

需指出的是, 理论上电压过零点的单相故障和相间电压差为零的两相故障没有行波过程的存在, 因此本文的改进算法也将失效。鉴于绝对零度的弱故障在现实中发生的概率很低<sup>[10]</sup>, 可以适当地牺牲一定的快速性, 采用目前微机保护装置中广泛使用的突变量启动元件解决此类故障的启动问题。

#### 4 结论

本文在总结小波变换与信号奇异性检测理论的基础上, 分析了现有的两种行波启动元件算法, 指

出这两种方法存在的灵敏度问题及其原因,进而提出改进的梯度算法,并将其应用于行波启动元件的构建。大量的 ATP 仿真测试验证了本文启动算法可有效地提高反应故障的灵敏度,性能优于现有的启动算法。

### 参考文献

- [1] 罗四倍,段建东,张保会.基于暂态量的 EHV/UHV 输电线路超高速保护研究现状与展望[J].电网技术,2006,30(22):32-41.  
LUO Si-bei,DUAN Jian-dong,ZHANG Bao-hui. Present Status and Prospect of Research and Development of Transient Component Based Ultra-high-speed Protection for EHV/UHV Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 32-41.
- [2] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [3] Mallat S, Zhong S F. Characterization of Signals From Multiscale Edges[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732.
- [4] 董新洲,贺家李,葛耀中.小波变换在行波故障检测中的应用[J].继电器,1998,26(5):1-4.  
DONG Xin-zhou, HE Jia-li, GE Yao-zhong. Application of Wavelet Transform in Detection of Fault Travelling Waves[J]. Relay, 1998, 26(5): 1-4.
- [5] 段建东,张保会.行波启动元件的算法研究[J].中国

电机工程学报,2004,24(9):30-36.

DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Study of Starting Algorithm Using Traveling-waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 30-36.

- [6] Mallat S.A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. Academic Press, San Diego, CA, 1998.
- [7] Holschneider M, Kronland-martinet R, Morlet J, et al. A real-time Algorithm for Signal Analysis with the Help of the Wavelet Transform in Wavelets: Time-frequency Methods and Phase Space[M]. Berlin: Springer, IPTI, 1989: 286-297.
- [8] Dutilleul P.An Implementation of the Algorithm a Trouis to Compute the Wavelet Transform. in Wavelets: Time-frequency Methods and Phase Space[M].Berlin: Springer, IPTI, 1989.298-304.
- [9] 何东健.数字图象处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [10] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,1996.

收稿日期:2007-02-05;

修回日期:2007-04-16

作者简介:

魏军(1972-),男,主要从事电力系统继电保护方面的工作;E-mail:wlh\_2789@163.com

罗四倍(1982-),男,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护方面的研究。

## 关于召开“继电保护应用技术”研讨会的通知

继电保护是一门技术含量高、涉及范围广,对制造、安装、运行和管理工作要求标准非常高的专业。为了推动我国继电保护技术的发展,提高继电保护设备的研发、制造和运行水平,加深本专业的广泛交流和深入探讨,促进与世界先进水平接轨,《继电器》杂志社与清华大学电机工程与应用电子技术系、华中科技大学电气与电子工程学院、华北电力大学电气与电子工程学院定于2007年12月1日至4日在湖北武汉召开“继电保护应用技术”研讨会,请收到录用通知的作者按照通知的地点和时间届时参加会议,欢迎对本次会议感兴趣的各位专家到会指导。