

# 超高速暂态方向继电器的研究

段建东<sup>1,2</sup>, 张保会<sup>1</sup>, 周 艺<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;

2. 广西大学电气工程学院, 广西省 南宁市 530004)

## STUDY OF ULTRA-HIGH-SPEED TRANSIENT-BASED DIRECTIONAL RELAY

DUAN Jian-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao-hui<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

2. Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Province, China)

**ABSTRACT:** The traveling-wave-based directional protection schemes have been studied for years, but essentially these protection performances are still influenced by low inception angles, reflective traveling-waves, etc. This paper presents a novel transient-based directional relay, the kernel unit of directional protection, for transmission line. The relay identifies fault direction by means of comparing the energy magnitude of the forward traveling-wave component with that of the backward. The relay algorithm is designed with the wavelet technology that fits for transient signal analysis. Traveling-wave components are extracted from fault-induced signals with wavelet multi-resolution analysis, and the wavelet transform spectral energy (WTSE) represents the energy of traveling-wave component. Numerous EMTP simulation tests show that this proposed relay response is reliable, sensitive and ultra-high-speed. Meanwhile the relay performance can endure the influences of various factors, including different fault inception angles, fault distances, fault types, fault path resistances, fault arcing, feeder modes on bus bar. The ultra-high-speed directional protection composed of this proposed relay will be worthy of application greatly.

**KEY WORDS:** Power system; Directional relay; Transients; Traveling waves; Ultra-high-speed; Wavelet analysis; Wavelet transform spectral energy

**摘要:** 行波方向保护已研究了多年,但其本质上仍要受故障初始角、反射波等因素的影响。该文提出一种新型的方向保护核心元件——暂态方向继电器,它基于故障发生后一段时间内正向行波分量与反向行波分量间的能量大小关系来识

别故障方向。该继电器的实用算法采用了适合暂态信号处理的小波技术,由小波多分辨分析来提取行波分量,并将行波分量的能量表征成小波变换谱能量(WTSE)。大量EMTP仿真试验表明:该继电器能可靠、灵敏、超高速地动作,其性能不受故障初始角、故障类型、故障距离、过渡电阻与电弧、母线接线方式的影响。以该继电器构成的超高速方向保护将具有很强的实用价值。

**关键词:** 电力系统; 方向继电器; 暂态; 行波; 超高速; 小波分析; 小波变换谱能量

## 1 引言

随着电力系统不断扩大规模、提升电压等级以及用户对电网安全性要求越来越高,快速切除故障已成为提高系统暂态稳定性、线路传输能力的重要措施<sup>[1]</sup>。输电线路发生故障时,行波自故障点向线路两端传播,并在系统中多次折反射而形成高频暂态量,它包含故障的幅度、极性、方向等信息,利用此信息可以构建各类高速方向保护<sup>[2]</sup>。

超高速方向继电器是方向保护的核心,用以在保护安装处识别故障发生的方向。20世纪70年代后相继提出了一系列基于故障行波的超高速方向保护或继电器方案<sup>[3-10]</sup>,但其原理、算法不无例外地以初始行波的极性、幅值信息为判别依据,因而其灵敏性和可靠性不可避免地会受到小初始角、近距离故障、反射波、行波色散、故障电弧、母线结构、极性判断受干扰、行波滤波后波形变化等因素的影响。为弥补行波类保护的不足,人们提出了高频暂态类方向保护<sup>[11-12]</sup>,但它们或受母线参数的制约、或物理概念不甚明确,保护算法实现也不便。

本文在文献[13]的研究基础上,进一步提出基

基金项目: 国家自然科学基金项目(50277027)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50277027) and the XUJI Bounty of China Electricity Fund.

于暂态分量能量比较的暂态方向继电器原理,构造了利用小波变换谱能量(WTSE)的方向识别算法。

## 2 故障方向特征的分析

### 2.1 分析条件

本文将在图1所示的高压输电系统中分析故障方向的基本特征<sup>[8]</sup>;约定将要安装的方向继电器DR处的电流正方向为从母线M流向线路I;线路I上的故障 $f_1$ 处在DR的正方向,线路II上的故障 $f_2$ 处在反方向。

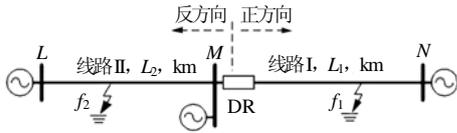


图1 故障方向特征分析用的高压输电系统

Fig. 1 Transmission system for fault directional features

### 2.2 正方向故障

正向 $f_1$ 故障时的附加网络如图2(a)所示,在故障点处附加电源 $\Delta u_{f1}$ 的作用下向线路两端传播故障行波(假定线路为无损的,行波传播速度为光速 $c$ ),行波网络图如图2(b)所示。图2(b)显示:①初始故障行波自故障点 $f_1$ 到达母线M,形成入射行波 $\Delta u_1, \Delta i_1$ ,并在此处发生折反射,反射行波为 $\Delta u'_1, \Delta i'_1$ 。其后的 $0 \sim 2l_2/c$  ( $l_2$ 为线路II长度)时间内,

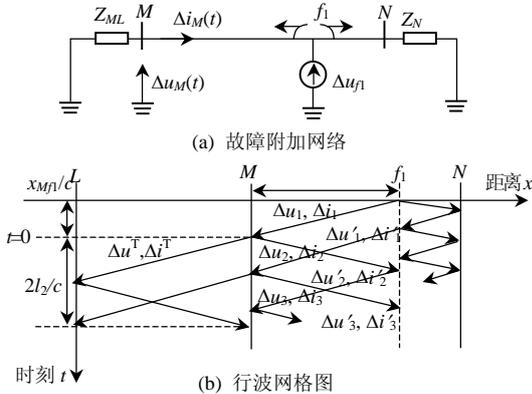


图2 正向故障时的故障附加网络与行波网络图

Fig. 2 Equivalent superimposed circuit under a fault in forward direction and its Bewley-lattice diagram

依据线路长度 $l_1, l_2$ 的不同和故障点 $f_1$ 位置的不同,母线M处可能还有两类行波;②来自于对端母线N的行波到达母线M,形成入射行波 $\Delta u_2, \Delta i_2$ 与反射行波 $\Delta u'_2, \Delta i'_2$ ;③行波 $\Delta u'_1, \Delta i'_1$ 到达故障点 $f_1$ 又返回母线M,形成入射行波 $\Delta u_3, \Delta i_3$ 与反射行波 $\Delta u'_3, \Delta i'_3$ 。①②③类入射、反射行波间都存在一个相同的母线M处反射系数如下:

$$k_r = (Z_{ML} - Z_1) / (Z_{ML} + Z_1) \quad (1)$$

式中 $Z_1$ 为线路I的波阻抗, $Z_{ML}$ 为从线路I向母线M、线路II(即ML)看过去的等效波阻抗。考虑到母线对地杂散电容的影响,反射系数 $0 < |k_r| < 1$ 。

如图2(b)所示情形,在初始故障行波到达母线M后 $0 \sim 2l_2/c$ 的时间内,母线M处的附加电压电流主要由上述三类入射、反射行波组成。那么,参照图2(b)中距离 $x$ 所规定的正方向,在 $t=2l_2/c$ 时,母线M处的反向行波为

$$\Delta u_b = \Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3 \quad (2)$$

正向行波为

$$\Delta u_f = \Delta u'_1 + \Delta u'_2 + \Delta u'_3 = k_r (\Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3) \quad (3)$$

### 2.3 反方向故障

反向 $f_2$ 故障时的附加网络与行波网络图如图3所示。图3(b)显示:①初始故障行波自故障点 $f_2$ 到达母线M,形成折射波 $\Delta u'_1, \Delta i'_1$ 沿着线路I继续传播。其后的 $0 \sim 2l_1/c$  ( $l_1$ 为线路I长度)时间内,依据长度 $l_1, l_2$ 和 $f_2$ 位置的不同,母线M处可能还有两类行波:②来自于背侧对端母线L的反射行波到达母线M,形成折射波 $\Delta u'_2, \Delta i'_2$ ;③来自于故障点 $f_2$ 的反射行波到达母线M,形成折射波 $\Delta u'_3, \Delta i'_3$ 。

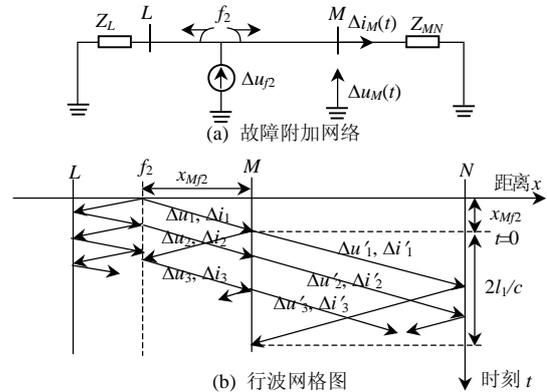


图3 反向故障时的故障附加网络与行波网络图

Fig. 3 Equivalent superimposed circuit under a fault in reverse direction and its Bewley-lattice diagram

如图3(b)所示情形,在初始故障行波到达母线M后 $0 \sim 2l_1/c$ 的时间内,母线M处的电压电流主要由上述3类折射行波组成。则在 $t=2l_1/c$ 时母线M处的反向行波为

$$\Delta u_b = 0 \quad (4)$$

正向行波为

$$\Delta u_f = \Delta u'_1 + \Delta u'_2 + \Delta u'_3 \quad (5)$$

### 2.4 故障方向特征

综合2.1节与2.2节中不同方向的故障分析,可以总结出关于故障方向的一般特征如下:

(1) 不同方向故障的正、反向行波幅值关系差

异明显。由式(2)~(5)可得出正向故障时， $\Delta u_f / \Delta u_b = k_r$  (反射系数 $0 < |k_r| < 1$ )；而反向故障时， $\Delta u_f / \Delta u_b \rightarrow \infty$ ；

(2)上述正反向行波幅值关系仅在保护安装处检测到故障后一段时间(0,  $t$ )内才严格成立，对于正向故障， $t=2l_2/c$ ；对于反向故障， $t=2l_1/c$ 。

### 3 暂态方向继电器的原理

根据上述不同方向故障的显著差异，可以构成如下识别故障方向的方向继电器原理：

在保护安装处检测到初始故障行波后  $\Delta t$  时间内，求得正向行波  $\Delta u_f$  与反向行波  $\Delta u_b$  的比值为

$$\lambda = \Delta u_f / \Delta u_b \quad (6)$$

若  $\lambda < \lambda_0$ ，则可判定故障发生在正方向；若  $\lambda \geq \lambda_0$ ，则可判定故障发生在反方向。其中几点说明如下：

(1) 时间段  $\Delta t = (0, t)$ ，起始时刻0为检测到故障行波突变的时刻，结束时刻  $t < \min\{2l_1/c, 2l_2/c\}$ ， $l_1$ 与 $l_2$ 分别为本侧线路、背侧线路的长度。若计及实际行波传播速度略小于光速 $c$ ，上述这个时间段  $\Delta t$  的选取显得保守而可靠，并且不同于行波测距，也无需对时间段的具体数值进行精确计量。一般地，(超)高压输电线路上的  $\Delta t$  值不超过1ms。

(2)  $\Delta u_f$  与  $\Delta u_b$  可由图2、3所示保护安装处测得的故障附加电压  $\Delta u_M$ 、电流  $\Delta i_M$  求得<sup>[2]</sup>。

由于  $\Delta u_M = \Delta u_f + \Delta u_b$  (7)

$$\Delta i_M = (\Delta u_f - \Delta u_b) / Z \quad (8)$$

那么  $\Delta u_f = (\Delta u_M + Z \Delta i_M) / 2$  (9)

$$\Delta u_b = (\Delta u_M - Z \Delta i_M) / 2 \quad (10)$$

式中  $Z$  为被保护线路的波阻抗。

(3) 比值  $\lambda$  的意义不仅是  $\Delta u_f$ 、 $\Delta u_b$  的瞬时值之比，也可是  $\Delta t$  时间内  $\Delta u_f$ 、 $\Delta u_b$  中的高频分量之比，还可以是其高频分量的能量之比。后续算法设计中  $\lambda$  取  $\Delta u_f$ 、 $\Delta u_b$  高频分量的能量之比。

(4) 门槛值  $\lambda_0$  在理论上为介于保护安装处的反射系数  $k_r$  与  $\infty$  之间的任何数，在实际运用时宜选用略大于1的数，如  $\lambda_0 = 1.2$ 。

(5) 上述理论分析、原理的提出是在单相系统中进行的，实际上它们都可推广到三相系统中。只是在三相超高压输电线路路上，上述行波量应采用模量来表示，因模量是由三相量经 Clarke 相模变换<sup>[2]</sup>后获得的，故下面的算法设计中采用线模量行波。

## 4 基于小波的暂态方向继电器算法

### 4.1 小波分析

为了将第3节中的暂态方向继电器原理转化成实用算法，特别是将式(6)中的  $\Delta u_f$ 、 $\Delta u_b$  用其  $\Delta t$  时间内高频分量的能量来表示，这就需要合适的处理工具提取故障信号在  $\Delta t$  时间内的高频分量、并用合适的方式表征此高频分量的能量。近年来的研究表明<sup>[14-16]</sup>，小波分析非常适合故障暂态及行波等非平稳信号的处理，能满足以上的要求。

信号  $y(t)$  的二进离散小波变换定义为

$$d_j(k) = \langle y(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad j, k \in Z \quad (11)$$

式中  $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$  为母小波  $\psi(t)$  的离散小波函数族； $j$  为尺度系数。

假设信号  $y(t)$  的离散样本为  $c_0(n)$ ，则第  $j$  尺度上的逼近系数  $c_j(n)$ 、小波系数  $d_j(k)$  可以按式(12)、(13)的快速算法求取。

$$c_j(n) = \sum_k h(k-2n)c_{j-1}(k) \quad (12)$$

$$d_j(n) = \sum_k g(k-2n)c_{j-1}(k) \quad (13)$$

式中  $h(n)$ 、 $g(n)$  分别为低通、带通滤波器，由所选择的母小波  $\psi(t)$  来决定。

离散小波变换式(12)和(13)实质上是一种多分辨率分析的过程，假设  $c_0(n)$  为频率范围(0~100kHz)的离散信号，则小波变换后  $c_0(n)$  被分解为多个频带分量，如图4所示。

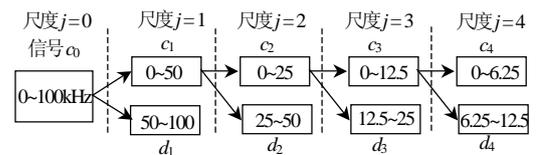


图4 信号的小波多分辨率分解 ( $C_0$ 为200kHz采样而得)

Fig. 4 Wavelet decomposition of signal sampled at 200 kHz

### 4.2 小波变换谱能量与信号分量的能量

根据Parseval定理，在正交小波变换下信号  $y(t)$  的能量可以用小波变换系数表示<sup>[16]</sup>为

$$E_s = \int |y(t)|^2 dt = \sum_k |c_J(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_k |d_j(k)|^2 \quad (14)$$

式中  $\sum_k |d_j(k)|^2 = E_j$ ，( $j=1, 2, \dots, J$ ) (15)

$E_j$ 实际上表征的是在第  $j$  尺度所对应频带上的信号分量的能量，被称作小波变换谱能量(WTSE)。

为了确保式(14)、(15)的严格成立，应当选择正

交的母小波  $\psi(t)$  来进行正交小波变换, 并且这样的选择还要能满足本文中暂态信号快速检测、定位和表征。经比较, Daubechies 小波族<sup>[17]</sup>中对称、短支撑的 sym4 小波被选用到下面的实用算法设计中。

### 4.3 基于小波的暂态方向继电器实用算法

由于小波变换谱能量式(15)能表征信号第  $j$  频带上信号分量的能量, 因而方向继电器原理式(6)中的  $\Delta u_f, \Delta u_b$  就用其对应的小波变换谱能量  $E_{j,f}, E_{j,b}$  来表达, 这样, 式(6)的计算可转化为

$$\lambda = E_{j,f} / E_{j,b} \quad (\text{尺度 } j = 1, 2, \dots) \quad (16)$$

考虑到故障行波暂态量的频率范围为 5~100kHz, 由 Shannon 定理可知, 对故障信号进行 200kHz 采样较为合适。此采样信号的小波分解如图 4 所示, 可见尺度 1~4 所对应频带及其小波系数  $d_1 \sim d_4$  都可以为式(15)、(16)所用。因此, 式(16)的计算既可选用  $j=1 \sim 4$  中的单尺度, 也可计算多尺度上的  $\lambda$  值以综合使用。

总之, 结合第 3 节暂态方向继电器原理和第 4 节中小波多分辨分解及小波变换谱能量的概念, 构成了暂态方向继电器的实用算法, 其流程如图 5 所示。

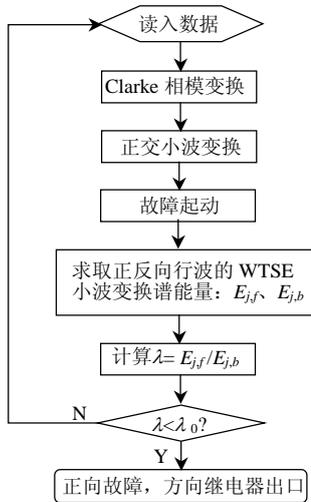


图5 基于小波的暂态方向继电器算法主流程  
Fig. 5 Flow chart of transient-based directional relay algorithm using wavelet

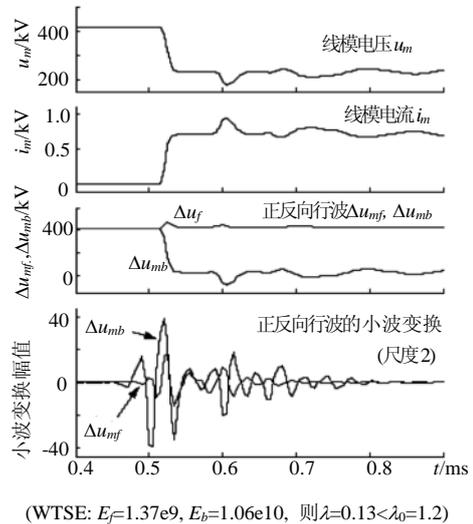
## 5 EMTP仿真研究

### 5.1 典型故障的仿真

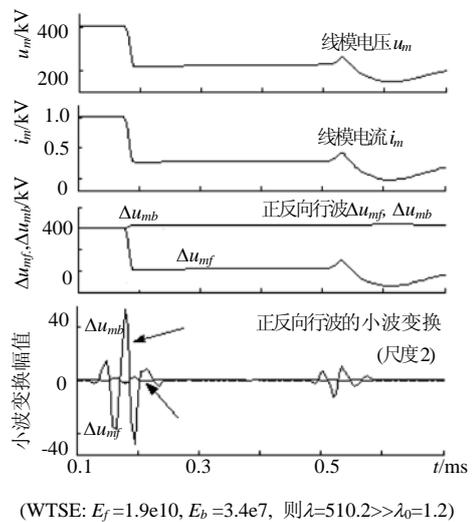
以图 1 所示 500kV 高压输电系统作为仿真系统, 线路 I 和 II 段的长度分别为:  $l_1=100\text{km}$ ,  $l_2=160\text{km}$ ; 线路结构及参数来自华中电网平武线, 采用频率相关模型进行仿真, 由 EMTP 软件中的线路参数子程序 (Line Constants) 可求得线模波阻抗为  $Z = 248.4\Omega$ ; 母线的对地杂散电容为  $0.01\mu\text{F}$ 。所要研究

的暂态方向继电器 DR 安装在线路 I 的母线 M 侧, 信号的采样率为 200 kHz; 数据窗选用  $\Delta t = 0.5\text{ms}$  (小于  $2l_1/c$  和  $2l_2/c$ ); 正反向线模行波  $\Delta u_{mf}, \Delta u_{mb}$  的小波变换谱能量 WTSE 采用尺度  $j=2$  上的值 (即对应 25~50kHz 频带上信号分量的能量);  $\Delta u_{mf}, \Delta u_{mb}$  比值  $\lambda$  的阈值整定为  $\lambda_0=1.2$ 。

图 6 示出了正向故障的仿真结果。此故障发生在线路 I 上距离方向继电器 150km 处, 为 A 相接地短路, 接地电阻  $10\Omega$ , 故障初始角  $75^\circ$ 。图示结果包括故障的线模电压  $u_m$  和  $i_m$ ,  $\Delta u_{mf}, \Delta u_{mb}$  及其在第 2 尺度上的小波变换值。经计算可得, 检测到故障 0.5ms 内  $\Delta u_{mf}, \Delta u_{mb}$  在第 2 尺度上小波变换谱能量 (WTSE) 的比值  $\lambda = E_f / E_b = 0.13 < \lambda_0 = 1.2$ , 因而准确地判定出故障为正向。图 7 示出了一反向故障的仿真结



(WTSE:  $E_f=1.37e9, E_b=1.06e10$ , 则  $\lambda=0.13 < \lambda_0=1.2$ )  
图6 正向A相接地故障的仿真结果  
Fig. 6 Phase-A-to-ground fault in forward direction



(WTSE:  $E_f=1.9e10, E_b=3.4e7$ , 则  $\lambda=510.2 >> \lambda_0=1.2$ )  
图7 反向BC相接地故障的仿真结果  
Fig. 7 Phase-B-C-to-ground fault in reverse direction

果，此故障发生在线路 II 上距离方向继电器 50km 处，为 BC 相接地短路，接地电阻  $50\Omega$ ，初始角  $60^\circ$ 。对图中计算得检测到故障 0.5ms 内  $\Delta u_{mf}, \Delta u_{mb}$  在第 2 尺度上小波变换谱能量的比值  $\lambda = 510.2 \gg \lambda_0 = 1.2$ ，从而可以准确地判定故障为反方向。

### 5.2 暂态方向继电器性能的仿真分析

就暂态方向继电器的性能，在不同故障条件下进行了大量 EMTP 仿真研究，如图 8 所示，线路单相接地故障时  $\lambda$  随不同故障距离、不同故障初始角、不同故障过渡电阻的变化曲线。至于其他故障类型情形与此类似。

由图 8 中的  $\lambda$  曲线可见，正向故障时  $\lambda$  都小于 0.2 (并且显著地小于门槛值 1.2)；而反向故障时大部分情形中  $\lambda$  值都在 100 以上 (远大于门槛值 1.2)，仅在故障初始角接近于  $0^\circ$  时才会出现  $\lambda$  偏小的现象。后者这种现象是由于故障暂态很弱而使  $\lambda$  计算结果受误差影响所致，尽管如此，仿真中  $\lambda$  在故障初始角  $2^\circ$  时仍为 3.1 明显地大于门槛值 1.2，不会影响到继电器动作的正确性。

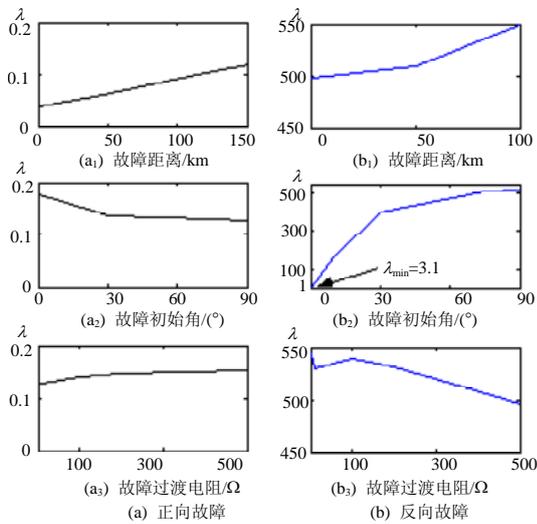


图8 在不同故障条件下正反方向行波WTSE比值 $\lambda$ 的曲线  
Fig. 8  $\lambda$  Curves with different fault conditions

值得一提的是，靠近本端或对端母线的故障时，故障点或对端母线的反射波使得故障初始行波畸变，这影响到初始行波及其故障信息的提取，从而影响到行波方向元件动作的可靠性。但图 8(a)、(b) 显示，反射波问题不会影响到暂态方向继电器的稳定性能，实际上反射波的存在使得故障暂态分量更为明显，还更有利于暂态方向的识别。

因此，本文所提的暂态方向继电器在各种故障情形下皆能可靠地工作，而且相对于所设定的门槛值，识别故障方向的灵敏度是非常高的。

### 5.3 其他试验与分析

(1) 故障电弧的影响。实际电力系统中多发电弧性故障，可能会影响到行波波头部分的故障信息(如幅值、极性等)，这对于基于初始行波波头的行波方向保护显然是不利的，进而影响到保护的实用性。而本文提出的暂态方向继电器是基于故障后一段时间内的暂态量，笔者依据文献[18]中高压线路的故障电弧模型进行了大量仿真，故障方向识别的仿真结果与无电弧的故障情形非常相近(限于篇幅仿真结果略去)，可见电弧故障时暂态方向继电器仍然是可靠的。此外，在小初始角故障情形下行波方向保护不能工作，但电弧的存在却有利于高频暂态分量，因而暂态方向继电器仍可以正常使用。

(2) 母线接线方式的影响。实际系统的母线接线方式主要有3类<sup>[2]</sup>：①母线上有或无变压器，除被保护线路外仅有1条出线；②母线上有变压器，除被保护线路外还有2条以上的出线；③母线上有变压器，除被保护线路外没有其他出线。虽然这些母线的接线方式不同，但都使母线处的反射系数  $k_r$  值有  $0 < |k_r| < 1$ ，因而能确保正向故障时正反向行波的比值  $\lambda = \Delta u_f / \Delta u_b = k_r < \lambda_0 = 1.2$ ；反向故障时  $\lambda$  值与母线处的反射系数  $k_r$  (母线接线方式) 无关。故本文提出的方向继电器的性能不受母线接线方式的影响。

(3) 动作速度。图5所示的算法流程中计算量主要体现在Clarke相模变换、正交小波变换、故障起动和小波变换谱能量等环节上，其中故障起动算法引自文献[19]。经初步估算，图5主流程的运算量不超过6000次的乘法和5500次的加法。在所设计的暂态量保护研究开发装置上<sup>[20]</sup>(采用PentiumIII主频1.4GHz处理器)进行0.5ms故障信号的采样、故障起动和故障方向的判别等一整套试验，结果表明该暂态方向继电器在1.5ms内就能出口，具有超高速的意义。可以预见，若采用主频更高、乘法运算更高效的DSP处理器来实现，该继电器的动作将更高速。

(4) 电压互感器方面的考虑。当前，超高压线路大多采用电容式电压互感器CVT，而其仅能传变10kHz以下的暂态高频电压信号。因而，本文所提的暂态方向继电器算法在当前实际中使用时，要么选用10kHz以下的合适频带(即小波变换的合适尺度)；要么借用其他方式抽取10kHz以上高频电压信

号<sup>[21]</sup>。随着新型(光电)互感器的研制成功并逐渐应用于电力系统,其传变高频的优良性能使得暂态方向保护的实用化将不受CVT性能的影响。

## 6 结论

本文在故障方向的特征分析基础上,提出了一种新型的暂态方向继电器原理及其基于小波的实用算法,它具有以下特点:

(1) 故障方向由正、反向行波中高频暂态分量能量的比值大小来判别,此比值小于门檻值则表明正向故障发生,否则为反向故障;

(2) 正、反向行波中的高频分量可以由小波多分辨分解来提取,高频分量的能量则由小波变换谱能量来表征;

(3) 短故障数据窗、快速的小波算法等使得1.5ms甚至更短的时间内整套暂态方向继电器就能超高速地动作,因而具有超高速保护、暂态量(行波)保护的一般特点;

(4) 大量的EMTP仿真试验表明,该暂态方向继电器能可靠地、高灵敏度地识别出故障方向,其性能不受故障距离、初始角、过渡电阻、故障类型以及反射波、电弧、母线接线方式的影响。

因此,以暂态方向继电器构成的超高速方向保护将具有很强的实用价值和应用前景。

## 参考文献

- [1] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 1-6.  
Zhang Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 1-6.
- [2] 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.
- [3] Chamia M, Liberman S, Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines-development, design and application [J]. IEEE Trans. Power App. Sys., 1978, 97(4): 2104-2116.
- [4] Mansour M M, Swift G W. Multi microprocessor-based traveling wave relay[J]. IEEE Trans. on PAS-104, 1985.
- [5] Johns A T. New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines[J]. Proc. Inst. Elect. Eng. C, 1980, 127(4): 228-239.
- [6] 杨钟皓, 董新洲. 波阻抗方向继电器的完善方案[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 22-26.  
Yang Z H, Dong X Z. Complete scheme of surge impedance relay [J]. Trans. on China Electro-technical Society, 2003, 18(2): 22-26.
- [7] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 基于小波变换的比率式行波方向继电器的研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(8): 771-775.  
Dong Xingli, Ge Yaozhong, Dong Xinzhou. Study of ratio directional relay based on traveling waves and wavelet transform [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(8): 771-775.
- [8] Wu Q H, Zhang J F, Zhang D J, Ultra high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [9] Chen Wei, Malik O P, Yin Xianggen *et al.* Study of wavelet-based ultra high-speed directional transmission line protection[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2003, 18(4): 1134-1139.
- [10] 段建东, 张保会, 张胜祥. 利用线路暂态行波功率方向的分布式母线保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 7-12.  
Duan Jiandong, Zhang Baohui, Zhang Shenxiang. A distributed bus protection using transient traveling wave power directions of transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 7-12.
- [11] Bo Z Q, Johns A T, Aggarwal R K. A new directional relay based on the measurement of fault generated current transients[C]. 6<sup>th</sup> IEE Conference DPSP, 1997, 227-230.
- [12] Bo Z Q, Aggarwal R K, Johns A T *et al.* A new directional relay for the protection of distribution feeders[C]. Proceeding of 4<sup>th</sup> Conference APSCOM, 1997, 221-225.
- [13] Duan Jiandong, Zhang Baohui, Zhou Yi. Research on ultra-high-speed directional relay of EHV/UHV transmission lines using wavelet transform[J]. WSEAS Transaction on Circuits and Systems, 2004, 4(3): 896-901.
- [14] Mallat S. A wavelet tour of signal processing [M]. Academic Press, 1999.
- [15] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 利用暂态电流的输电线路单端量保护新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 56-61.  
Ha Hengxu, Zhang Baohui, Lv Zhilai. A novel principle of non-unit protection based on transient components for EHV transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 56-61.
- [16] Gaouda A M, Salama M M A, Sultan M R *et al.* Power quality detection and classification using wavelet multi-resolution signal decomposition[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1999, 14(3): 1469-1476.
- [17] Daubechies I. Ten lectures on wavelets [M]. SIAM, PA, 1992.
- [18] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems[J]. IEE Proc. - Gen., Trans. Dist., 1994, 141(2): 148-154.
- [19] 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 Jiandong, Zhang Baohui. Study of starting algorithm using traveling-waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 30-36.
- [20] 张胜祥, 张保会, 段建东. 暂态量保护开发平台的研究[J]. 继电器, 2004, 32(15): 34-38.  
Zhang Shenxiang, Zhang Baohui, Duan Jiandong. Research on platform for transient based protection [J]. Relay, 2004, 32(15): 34-38.
- [21] 曾祥君, 尹项根, 林福昌, 等. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法研究. 中国电机工程学报. 2002, 22(6): 42-46.  
Zeng Xiangjun, Yin Xianggen, Lin Fuchang *et al.* Study on fault location for transmission lines based on the sensor of traveling wave [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 30-36.

收稿日期: 2004-10-08。

作者简介:

段建东(1973-), 男, 博士研究生, 讲师, 从事新型继电保护的研究; 张保会(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护、安全稳定控制和电力线通信等领域的教学研究。