

# 基于递归中值滤波的暂态能量方向元件仿真分析

王寅, 潘佩芳, 孔凡坊, 杨彬伦, 王建

(温州电力局, 浙江 温州 325000)

**摘要:** 阐述了基于递归中值滤波的暂态能量方向元件的原理, 并给出其快速实用算法。建立一 500 kV 超高压输电系统模型, 对该方向元件的动作特性进行了 ATP 仿真分析。仿真结果表明, 该方向元件能够非常明确地判别出故障的方向, 且不受故障位置、类型、初始角、过渡电阻等因素的影响, 具有很好的方向识别性能。

**关键词:** 递归中值滤波; 暂态能量; 方向元件; ATP 仿真

## Simulation analysis of transient energy directional element based on recursive median filter

WANG Yin, PAN Pei-fang, KONG Fan-fang, YANG Bin-lun, WANG Jian  
(Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** The principle of transient energy directional element based on recursive median filter is described, and practical and fast algorithm is given. Operating feature is analyzed in use of ATP while model of 500 kV EHV transmission system is established. Simulation results indicate that the directional element determines fault direction clearly; its performance can endure the influences of various factors, including fault distances, types, inception angles and fault path resistances.

**Key words:** recursive median filter; transient energy; directional element; ATP simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0029-03

## 0 引言

方向元件作为行波保护和暂态量保护的核心元件, 已经被研究多年<sup>[1-2]</sup>。而暂态能量的方向元件具有动作超高速、方向识别准确等优点<sup>[3]</sup>。本文在阐述基于递归中值滤波的暂态能量方向元件原理算法的基础上, 对其动作性能进行了 ATP 仿真及分析。仿真结果表明, 该暂态能量方向元件具有很好的方向识别性能。

## 1 暂态能量方向元件的原理

### 1.1 故障暂态方向的特征差异<sup>[4]</sup>

如图 1 所示的超高压输电系统, 由网格法分析, 可以总结出故障暂态方向的特征差异:

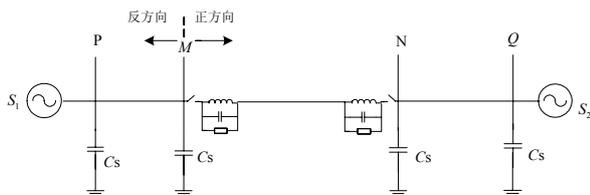


图 1 500 kV 超高压输电系统  
Fig.1 500 kV EHV transmission system

1) 正方向故障时, 设保护检测到故障的时刻(即初始故障行波到达线路边界的时刻)为  $t_0$ , 在此后的  $\Delta t_1 = 2l_{PM}/c$  时间(即  $[t_0, t_0 + \Delta t_1]$ )内, 时域方向行波始终存在这样的关系:  $f = b \cdot \beta_{NM}$ , 即  $f/b = \beta_{NM}$  (反射系数  $0 < |\beta_{NM}| < 1$ )。

2) 反方向故障时, 同样是在  $t_0$  时刻后的  $\Delta t_2 = 2l_{MN}/c$  时间(即  $[t_0, t_0 + \Delta t_2]$ )内, 所检测到的故障暂态量中, 只存在前行波, 而无反行波, 即  $b = 0$ 。因此在  $[t, t + \Delta t_2]$  时间内, 时域方向行波的关系为:  $f/b \rightarrow \infty$ 。

### 1.2 暂态能量方向元件的识别判据

根据故障暂态方向的特征差异, 可以构成识别故障方向的识别判据:

当启动元件动作后, 在时间段  $[t_0, t_0 + \Delta t]$  内, 将故障前行波与反行波相比, 即:

$$\lambda_d = \Delta u_f / \Delta u_b \quad (1)$$

若  $\lambda_d < \lambda_0$ , 则可判定为正方向故障; 若  $\lambda_d \geq \lambda_0$ , 则判定为反方向故障。其中  $\Delta u_f$ 、 $\Delta u_b$  由故障附加网络得到;  $\Delta t < \min\{\Delta t_1, \Delta t_2\}$ , 考虑到实际线路长度大都在 100 km 以上, 为保证判据可靠性,  $\Delta t$  可取小于 0.66 ms 的时间窗。

在三相输电系统中，为避免电磁耦合，各方向行波经 Clark 模变换成各模量行波。

为提高判据的可靠性，利用故障后一段时间内的方向行波能量的比值构成判据，即：

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{E_{\Delta u_f}}{E_{\Delta u_b}}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=N_s}^{k=N_s+N-1} \Delta u_{fm}^2(k)}{\sum_{k=N_s}^{k=N_s+N-1} \Delta u_{bm}^2(k)}} \quad (2)$$

其中： $N_s$  为启动元件动作时刻对应的采样点； $N$  为数据窗宽度。

正方向故障时，初始前行波是由初始反行波经母线系统反射后产生的，其幅值与极性受母线反射系数的影响，也就是受母线系统连接设备（诸如对地等效电容、阻波器等）的影响。

图 2 给出了线路不同方向上某次故障时的前、反行波的波形图。由图可以看出，在初始故障行波到达保护安装处的很短时间内（取  $\Delta t$ ），反行波初始波头为阶跃函数或斜坡函数，但由于受行波反射的影响，后续波头会出现一系列的突变尖峰或脉冲，尤其是前行波更为明显。文献[5]经分析得出，这种尖峰主要是由于线路阻波器和母线对地等效电容的作用所引起的。

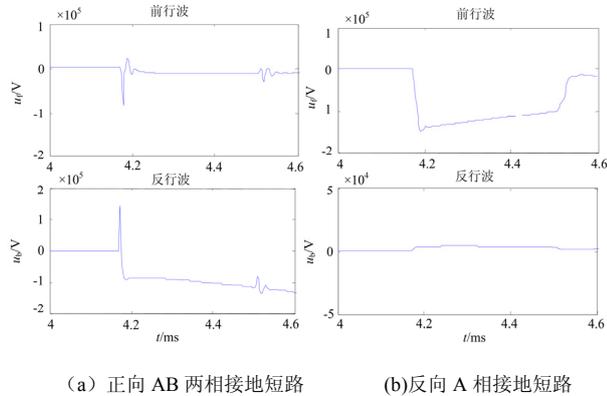


图 2 不同故障方向的方向行波  
Fig.2 Directional traveling-waves of different fault direction

反方向故障时，初始前行波是初始故障行波的折射波，与初始故障行波相比，其陡度变缓，波形基本为斜坡函数。

在利用式(2)判断故障方向时，突变尖峰的存在会使方向判别的灵敏度降低，甚至有可能将正方向故障误判为反方向。如果对各故障方向行波进行适当的滤波，使其输出能够在有效保持阶跃函数或斜坡函数波形不变的情况下，尽可能削弱或消除突变尖峰，上述方向元件就可以在极短的时间内正确可靠地判别出故障方向。（递归）中值滤波具有此优良

性能，所以将其应用在构造暂态能量方向元件的方向行波滤波算法中<sup>[5]</sup>。

## 2 基于递归中值滤波的方向元件算法

### 2.1 递归中值滤波算法

设中值窗长为  $L$  ( $L$  为奇数)，采样序列为  $\{x(n)\}$  ( $n=1,2,3,\dots$ )，从中连续抽取  $L$  个数据： $\{x(i-k), x(i-k+1), \dots, x(i-1), x(i), x(i+1), \dots, x(i+k)\}$ ， $k=(L-1)/2$ 。

中值滤波的数学表达式为：

$$y(i) = \text{Median}\{x(i-k), x(i-k+1), \dots, x(i-1), x(i), x(i+1), \dots, x(i+k)\} \quad (3)$$

递归中值滤波算法则是利用式(3)中已求得的输出量计算新的输出量，用公式表示为：

$$y(i) = \text{Median}\{y(i-k), y(i-k+1), \dots, y(i-1), y(i), y(i+1), \dots, y(i+k)\} \quad (4)$$

递归中值滤波的主要特性包括如下几个方面<sup>[6]</sup>：①在滤除脉冲等干扰的同时，可以很好的保持信号的边缘特性；②能够滤除脉冲宽度小于  $L/2$  的脉冲干扰，并能削弱三角波，使其顶部变平，同时对高斯白噪也有一定的抑制能力。③由递归中值滤波所得的中值比常规中值滤波准确，且对较大强度的脉冲噪声有一定的去噪能力。

在构造方向元件时，先对故障方向行波进行递归中值滤波，使其在有效保持波形（阶跃或斜坡）的基础上，尽可能削弱甚至消除突变尖峰或脉冲干扰，以提高方向元件判据的可靠性。图 3 是图 2 中的前、反行波经递归中值滤波后的波形图。

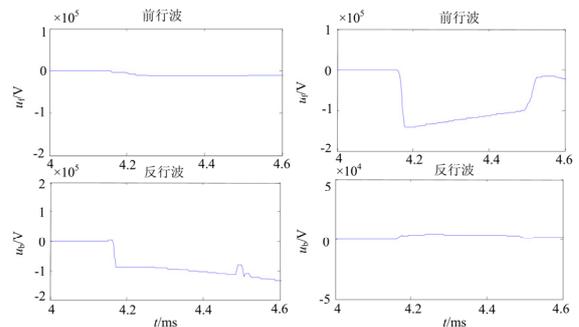


图 3 经递归中值滤波后的方向行波  
Fig.3 Directional traveling-waves via median filtering

### 2.2 方向元件的算法实现

基于递归中值滤波的暂态能量方向元件算法的具体实现步骤如下：

1) 在故障启动后，从启动时刻  $N_s$ ，对数据窗  $[N_s, N_s + N - 1]$  内的电压、电流故障分量进行 clark 相模变换，得到各模量。

2) 计算相应线模量的方向行波;根据式(4)对方向行波进行递归中值滤波。

3) 根据式(2)计算出经递归中值滤波后的模量前行波和反行波数据窗  $[N_s, N_s + N - 1]$  内的时域暂态能量之比  $\lambda_d$ , 若  $\lambda_d < \lambda_0$ , 则可判定为正方向故障; 否则判定为反方向故障。

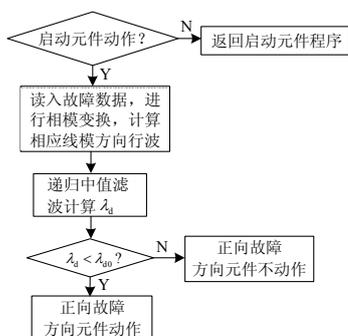


图 4 方向元件的程序流程  
Fig.4 Flow chart of directional element

由于正方向故障时,  $\lambda_d$  基本反映线路边界的反射系数  $\beta$  的大小, 而  $\beta$  的取值范围是  $(-1, 1)$ , 因此阈值应取略大于 1 的数, 为保证方向元件的可靠性, 取  $\lambda_0 = 1.5$ 。

### 3 方向元件的 ATP 仿真

以图 1 所示的 500 kV 超高压输电系统作为仿真对象, 线路参数与结构取自华中电网平武线, 被研究线路为 MN, 考察 M 侧方向元件的动作性能。取中值窗长  $L = 9$ , 数据窗长  $N = 120$  (仿真中采样频率为 400 kHz, 对应的时间窗为 0.3 ms)。

#### 3.1 不同故障位置和类型时方向元件的动作性能

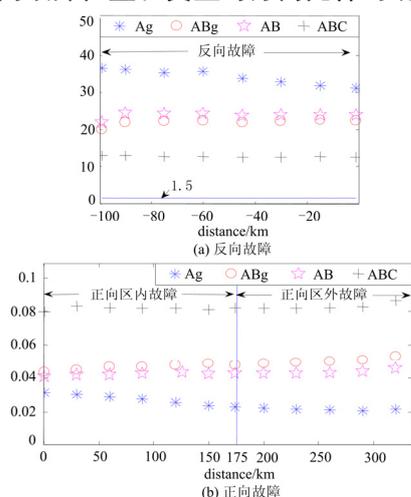


图 5 不同故障位置和故障类型下方向元件的动作性能  
Fig.5 Performance of directional element for different fault location and type

仿真步骤如下: 首先, 设置故障条件为: 初始角  $30^\circ$ , 过渡电阻  $100 \Omega$ ; 其次, 在不同的故障方向不同故障位置分别设置四种类型的故障 (Ag、ABg、AB、ABC)。仿真结果如图 5 所示。

由图 5 的仿真结果可知: 正方向故障时, 四种不同类型的故障下方向元件的判据值均小于 0.1, 因此可靠动作; 反方向故障时, 判据值均大于 10, 可靠不动作。尤其是在母线附近故障时, 仍能明确地判别故障的方向, 不受故障位置、类型的影响, 具有很好的动作性能。

#### 3.2 不同故障初始角和过渡电阻时方向元件的动作性能

表 1 给出了单相接地(Ag)故障时, 方向元件在各故障点不同故障方向时的判别结果。由仿真结果可知: 在不同故障时刻和过渡电阻时, 该方向元件均能够正确判别故障方向, 尤其是在“弱故障”(小初始角和大过渡电阻值)的情形下, 其可靠性及灵敏度并没有降低, 因此该方向元件不受故障初始角和过渡电阻的影响, 具有可靠稳定的方向识别性能。

表 1 不同故障初始角和过渡电阻时方向元件的动作性能  
Tab.1 Performance of directional element for different fault inception angles and path resistances

故障位置 /km	初始角	过渡电阻 /Ω	$\lambda_d$	判别结果
1	$3^\circ$	0	0.030 2	正方向
		300	0.031 3	正方向
		0	0.030 0	正方向
		300	0.033 8	正方向
80	$3^\circ$	0	0.028 2	正方向
		300	0.028 7	正方向
		0	0.030 3	正方向
		300	0.030 4	正方向
174	$3^\circ$	0	0.022 1	正方向
		300	0.022 3	正方向
		0	0.022 6	正方向
		300	0.023 3	正方向
200(正向区外)	$3^\circ$	0	0.021 6	正方向
		300	0.021 6	正方向
		0	0.022 3	正方向
		300	0.022 3	正方向
-50(反向)	$3^\circ$	0	31.118 4	反方向
		300	34.122 0	反方向
		0	34.116 8	反方向
		300	34.079 2	反方向

### 4 结束语

综合方向元件原理算法及仿真结果, 基于递归中值滤波的暂态能量方向元件具有以下特点:

(下转第 41 页 continued on page 41)

- [6] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法在电力系统中的应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.  
XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Genetic Algorithm & Its Application in Power Systems[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [7] 王克文, 张建芬, 杨海晶, 等. 用灵敏度法确定变电站电容器组的在线投切[J]. 继电器, 2003, 31(9): 15-19.  
WANG Ke-wen, ZHANG Jian-fen, YANG Hai-jing, et al. Sensitivity-based On-line Adjustment of Shunt Capacitors in Substation[J]. Relay, 2003, 31(9): 15-19.
- [8] 万盛斌, 陈明军. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2005, 33(15): 37-40, 81.  
WANG Sheng-bin, CHEN Ming-jun. Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Relay, 2005, 33(15): 37-40, 81.
- [9] YU Jian-ming, DU Gang, YAO Li-xiao. Application of Genetic Algorithm Combining Sensitivity Analysis to Optimized Planning of Reactive Power Compensation for Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(7).
- [10] ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [11] LIU Xi-chun, YU Shou-yi. A Genetic Algorithm with Fast Local Adjustment[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(1): 100-105.
- [12] CHEN Yan-qiu, ZHANG Yao, WEI Ying-hua. Application of Improved Genetic Algorithm Combining Sensitivity Analysis to Reactive Power Optimization for Power System[A]. in: IEEE Transactions on Restrictions Apply[C]. Nanjing(China): 2008.798-803.
- [13] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Analysis of Advanced Power Network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [14] Kenji Iba. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994.

收稿日期: 2009-05-13; 修回日期: 2009-11-11

作者简介:

周晓娟 (1982-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统经济运行; E-mail: zhouxiaojuan0371@163.com

蒋炜华 (1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制保护;

马丽丽 (1982-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统经济运行与控制。

(上接第 31 页 continued from page 31)

1) 该方向元件实现原理及算法简单, 门槛的整定简单, 方向判别的灵敏度高。

2) 计算量仅存在于 0.3 ms 内对方向行波进行递归中值滤波后的能量计算, 因此, 计算复杂度较低, 具有超高速的动作特点。

3) 不受故障位置、类型、初始角、过渡电阻等的影响, 具有可靠稳定的方向识别性能。

4) 正方向故障时方向元件受母线接线方式的影响, 但母线反射系数值小于 1, 在极端情况下, 最低灵敏度也有 1.5, 满足动作可靠性的要求。

#### 参考文献

- [1] 董杏丽, 董新洲, 张言苍. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 24(14): 11-15.  
DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, ZHANG Yan-cang. Directional Protective Relaying Based on Polarity Comparison of Travelling-wave by Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 24(14): 11-15.
- [2] Aggarwal R K, Johns A T, Tripp D S. The Development and Application of Directional Comparison Protection for Series Compensated Transmission System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(4): 1037-1045.
- [3] DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Research on Ultra-high-speed Directional Relay of EHV/UHV Transmission Lines Using Wavelet Trans[J]. WSEAS Transaction on Circuits and System, 2004, 4(3): 896-901.
- [4] 段建东, 张保会, 周艺. 超高速暂态方向继电器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 7-12.  
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study on Altra-high-speed Transient-based Directional Relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 7-12.
- [5] 罗四倍, 张保会, 曹瑞峰, 等. 基于中值滤波的超高速暂态量方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 64-69.  
LUO Si-bei, ZHANG Bao-hui, CAO Rui-feng, et al. Altra-high-speed Transient Directional Unit Based on Median Filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 64-69.

收稿日期: 2009-04-21; 修回日期: 2009-06-01

作者简介:

王寅 (1976-), 男, 工程师, 从事继电保护及变电站自动化方面的工作;

潘佩芳 (1980-), 女, 本科, 从事继电保护及变电站自动化方面的工作;

孔凡坊 (1984-), 男, 硕士, 从事继电保护及变电站自动化方面的工作。E-mail: kongfanfang2002@126.com