

# 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护

李振强<sup>1</sup>, 鲁改凤<sup>2</sup>, 吕艳萍<sup>3</sup>

(1. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011;  
3. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 详细研究了高压直流输电线路发生故障后暂态电压行波的能量分布特征, 利用小波变换对暂态电压进行多尺度分析, 并使用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对直流线路在区外和区内故障、故障性雷击和非故障性雷击等几种典型故障下, 直流线路暂态电压在各个小波分解尺度下的能量分布进行了仿真计算。计算结果表明, 当直流线路发生不同类型故障时, 其暂态电压的低频与高频能量的比值有较大差异。根据这些特征, 构成了一种新的高压直流线路行波保护判据。

**关键词:** 高压直流输电; 暂态电压; 行波保护; 小波变换; PSCAD/EMTDC

## A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform

LI Zhen-qiang<sup>1</sup>, LU Gai-feng<sup>2</sup>, Lü Yan-ping<sup>3</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institution, Wuhan 430074, China; 2. North China Institute of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper researches transient voltage traveling wave energy's distributed characters of HVDC transmission line after faults occur and uses wavelet multi-resolution signal decomposition technique to analyze the various transient voltages. It makes simulations for various faults using electromagnetism emulator PSCAD/EMTDC and calculates its energy distribution by wavelet multi-resolution signal decomposition technique, including faults inside DC lines, fault outside DC lines, fault lightning strike and non-fault lightning strike. The calculation results indicate that when different faults occur on the DC lines, the ratio of low frequency and high frequency energy of transient voltage traveling wave differs largely. Based on these characters, an excellent performance traveling wave protection criterion is put forward.

**Key words:** HVDC transmit electricity; transient voltage; traveling wave protection; wavelet transform; PSCAD/EMTDC

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0040-06

## 0 引言

直流系统发生故障时, 一方面, 可以利用桥阀控制极的控制来快速限制和消除故障电流; 另一方面, 由于定电流调节器的作用, 故障电流增长倍数并不像交流线路那样大。因此, 对直流线路故障的检测, 不能依靠故障电流的大小来判别, 一般需要通过电流的暂态分量或电压的变化量来识别<sup>[1]</sup>。

行波保护应用了故障后线路传播的行波作为保护信息, 避免了工频保护易受电流和电压调节器的影响, 且利用行波速度快的特点保证了保护的速动性。目前, 世界上现有的高压直流线路保护普遍以行波保护作为主保护。然而, 根据已投运的高压直流输电工程的运行情况来看, 普遍存在着行波保护可靠性不高的问题, 例如我国的天广直流工程的线路保护, 存在受 2% 及以上噪声干扰情况下易误

动<sup>[2]</sup>, 以及高阻接地故障时保护灵敏度不够高的问题<sup>[3]</sup>。究其原因, 不是因为行波保护不适合高压直流系统, 而是现有的保护原理存在缺陷。国内外有关行波保护新原理的研究已有不少, 但究竟哪种行波保护原理更能满足高压直流输电的要求, 是我们研究的。随着我国越来越多的高压直流输电工程的建设, 进一步开展这方面的研究工作具有重大的理论和实际应用价值。

本文借助小波变换强大的信号处理功能, 利用多尺度的小波分解准确地提取故障特征, 在此基础上, 提炼出了动作性能优越的新的保护判据。

## 1 直流线路故障行波暂态特征分析

### 1.1 直流线路区内、区外故障特征分析

换流器直流侧出口处(平波电抗器交流侧)与直流线路只隔了一个平波电抗器, 此处发生故障与

直流线路故障较难区分。因此, 分析此处的故障暂态特征更利于辨别区内、区外故障。

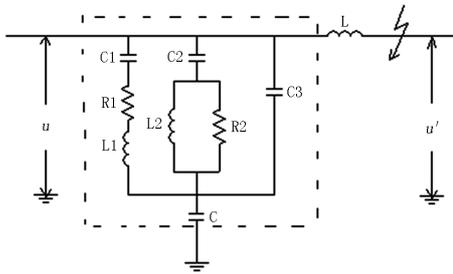


图1 逆变侧直流滤波器

Fig.1 Direct current filter of inverter

在图1中, 直流侧出口处发生接地故障,  $u'$  为故障附加电源,  $u$  为平波电抗器线路侧的对地电压,  $L$  为平波电抗器, 虚线框内表示的是12/24双调谐直流滤波器<sup>[4]</sup>, 为了便于分析, 简记为  $F$ 。将直流滤波器和平波电抗器看作一个整体, 则可以写出其传输函数  $G(\omega)$  如下:

$$G(\omega) = \frac{u}{u'} = \frac{z_F(\omega)}{z_F(\omega) + z_L(\omega)} \quad (1)$$

式中:  $z_F(\omega)$  为直流滤波器的阻抗;  $z_L(\omega)$  为平波电抗器的阻抗。

$G(\omega)$  的幅频特性如图2所示。从图中可以看到, 在低频段 ( $0 \sim 100$  Hz) 传输函数  $G(\omega) \approx 1$ , 在直流滤波器  $F$  和平波电抗器  $L$  的谐振频率附近有  $G(\omega) \gg 1$  (图中尚未显示其最大值), 在高频段特别是在频率  $f > 1000$  Hz 的频段上, 此时的  $G(\omega) \ll 1$ 。

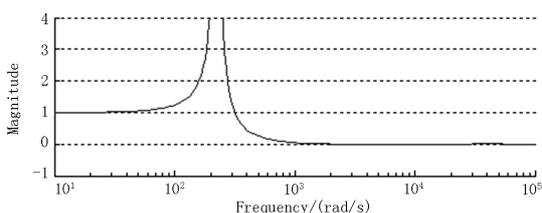


图2  $G(\omega)$  的幅频特性

Fig.2 Amplitude-frequency characteristics of  $G(\omega)$

由于平波电抗器和直流滤波器固有的滤波特性, 对高频信号具有很大的衰减作用, 在一定程度上成了直流线路区外高频信号的阻波器。直流线路区内故障时, 直流线路上的暂态电压含有较高的高频分量; 而区外故障时, 暂态电压含有的高频分量很低; 对于低频分量两者的区别不是很大。

## 1.2 雷电干扰与短路故障的识别

雷击导线或塔顶时, 如果雷电流足够大, 造成绝缘子闪络, 引起稳定的电弧, 为了避免形成永久性故障, 保护应该马上动作跳开线路。而过电压较小, 没有对线路的正常运行造成破坏, 保护不应该动作。对于前者不妨称为故障性雷击, 后者则称为非故障性雷击。从继电保护的角度看, 当线路遭受故障性雷击时, 保护应可靠动作; 非故障性雷击, 保护不应动作。因此有必要将非故障性雷击与线路故障、故障性雷击区别开来<sup>[5]</sup>。

### (1) 输电线路非故障性雷击

输电线路发生非故障性雷击时, 由于雷电波本身为一种高频单极性脉冲波, 其频率主要集中在  $0 \sim 200$  kHz, 而能量则主要集中在  $100$  Hz  $\sim$   $100$  kHz<sup>[6]</sup>, 因此在其产生的暂态量中高频分量含量很大, 而低频分量则很小。

### (2) 输电线路故障性雷击

输电线路故障性雷击时, 暂态附加分量是由雷电流和故障点的附加电压源共同产生的。因此, 其暂态分量同时具备非故障性雷击和线路故障两种情况的特点: 在初始波头部分, 雷电波起主要作用, 高频含量很丰富; 而随后则更多地显示出接地故障的特性, 故中低频分量要远大于高频分量<sup>[5]</sup>。

### (3) 输电线路短路故障

输电线路发生接地短路时, 其产生的暂态量是由故障点的附加电压源产生的。由于附加电压源为一直流源, 其产生的暂态量中高频分量的含量远低于非故障性雷击时的情况。跟非故障性雷击时的情况相比, 线路短路故障时暂态量所含的高频分量所占的比例小, 而低频分量要大得多。

## 1.3 噪声干扰的影响

行波信号和噪声都属于高频量, 当行波信息中含有噪声时, 会给保护的判别带来不利的影响。以图3为例来说明这种情况, 该图是直流线路中点接地故障时暂态电压行波及其多尺度小波分解 (含有5%的噪声)。纵坐标为整流侧暂态电压 (单位 kV), 横坐标为  $20$  ms 内的采样的点数 (采样率  $100$  kHz)。

如图3所示, 在前几个尺度上噪声干扰非常大, 几乎淹没了信号的有用信息。在这种噪声的干扰下, 不管是区内还是区外故障, 故障信息已经变得十分混乱, 不能为保护所利用; 另外, 噪声的干扰程度随小波分解尺度的增大而减小, 在第4尺度时, 噪声成分已减少了很多。因此, 可以利用小波的多尺度分析将噪声的干扰降低, 高尺度的分解值仍然能够给出对保护有价值的信息。

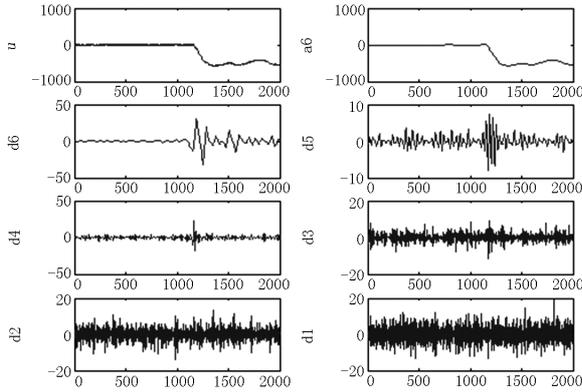


图3 含有噪声的暂态电压及其小波分解  
Fig.3 Transient voltage with noise and its wavelet decomposition

## 2 小波变换及其在信号检测中的应用

小波变换对信号的奇异和突变部分非常敏感，而电力系统故障通常表现为电压、电流信号的某种突变，因此利用小波变换来检测突变点的位置和突变点的时刻是比较有效的。

首先给出小波变换模极大值的定义<sup>[7]</sup>：在  $s$  尺度下，对  $x_0$  的某一邻域内的一切  $x$ ，有  $|W_s f(x)| \leq |W_s f(x_0)|$ ，式中  $W_s f(x)$  为  $f(x)$  的小波变换，则称  $x_0$  为小波变换的模极大值点， $W_s f(x_0)$  为小波变换的模极大值。

如果函数  $f(x)$  ( $x \in \mathbb{R}$ ) 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  $f(x)$  在其定义域内有无限次导数，则称  $f(x)$  光滑，即没有奇异性。于是，对于一个突变信号而言，在其突变点必然是奇异的。小波变换的模极大值点反映了信号的突变点，两者是一一对应的。

信号的奇异度可由函数的正则性 Lipschitz 指数  $\alpha$  表述<sup>[8]</sup>。 $\alpha$  的定义为：设  $n < \alpha \leq n+1$ ，如果存在着两个常数  $A$  和  $h_0 > 0$ ，及  $n$  次多项式  $P_n(h)$ ，使对任意的  $h \leq h_0$ ，均有  $|f(x+h) - P_n(h)| \leq |A(h)|^n$ ，则说  $f(x)$  在点  $x_0$  为 Lipschitz 指数  $\alpha$ 。

如果函数  $f(x)$  的 Lipschitz 指数  $\alpha > 0$ ，则该函数的小波变换模极大值将随着尺度的增大而增大；反之，若  $\alpha < 0$ ，则函数  $f(x)$  的小波变换模极大值将随着尺度的增大而减小。信号的  $\alpha$  一般是大于 0 的，即使是不连续的奇异信号，只要在某一邻域内有界，也有  $\alpha = 0$ 。然而，噪声所对应的  $\alpha$  往往是小于 0 的。所以，信号和噪声在不同尺度的小波变换下呈现的特性是截然相反的。因此通过小波变换高尺度的分解量可以达到减小噪声干扰的目的，能够有效地抑制噪声对故障信息中有效信号的不利影响。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型

本文利用 PSCAD/EMTDC 建立了高压直流系统仿真模型如图 4 所示。

模型中直流线路全长 960 km，额定输送功率 1 000 MW，直流额定电流 2 kA，直流额定电压 500 kV。换流变压器由两个双绕组换流变压器组成，接线方式分别为 Y/ $\Delta$  和 Y/Y。直流线路采用 4 分裂导线，线径 30.35 mm，导线平均对地高度 35 m，分裂间距 457.20 mm；沿线平均土壤电阻率 100  $\Omega \cdot m$ 。

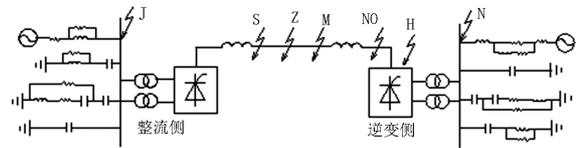


图4 HVDC 系统仿真示意图  
Fig.4 HVDC system simulation sketch

### 3.2 仿真分析

本文对线路区内、区外故障以及雷击故障分别作了仿真。各种暂态电压波形及其多尺度小波分解如图 5 所示，分析中采用了 db3 小波。

图 5 (a)、(b)、(c)和(d)分别给出了直流线路区外、区内故障、故障性雷击和非故障性雷击时整流侧暂态电压及其小波分解。仿真采样频率 100 kHz。另外，为了进一步了解各种情况下的故障特征，本文对故障初始行波到达行波检测装置开始 5 ms 内的暂态电压在各个分解尺度下的谱能量进行了计算。计算结果如表 1 所示。

表 1 暂态电压在各个分解尺度下的能量

Tab.1 Energies of transient voltage at each scale

故障类型	暂态电压在对应分解尺度下的能量 ( $\times 10^3 \text{ kV}^2$ )						
	a6	d6	d5	d4	d3	d2	d1
J3	34 782	0.511 0	0.013 2	0.002 0	0.000 54	0.000 15	0.000 03
Z0	116 542	47.513	1.784 8	2.996 1	3.218 1	0.105 1	0.002 5
L15	181.30	127.61	11.620	322.38	767.15	393.14	133.838
L50	135 190	370.30	280.84	426.09	1 016.0	2 244.1	2 716.5
Z1000	2 860.6	0.911	0.030 7	0.059 4	0.007 1	0.002 1	0.000 5
J3x	14 546	0.406 0	0.315 1	0.848 3	2.262 5	3.590 2	6.191 9

表 1 中 Z0、Z1000 分别表示直流线路中点经 0  $\Omega$ 、1 000  $\Omega$  过渡电阻接地；J3 表示整流侧交流母线三相短路；J3x 表示加入 5% 噪声后的结果；L15、L50 分别表示线路首端非故障性雷击和故障性雷击。

对图 5 和表 1 进行分析，可知：

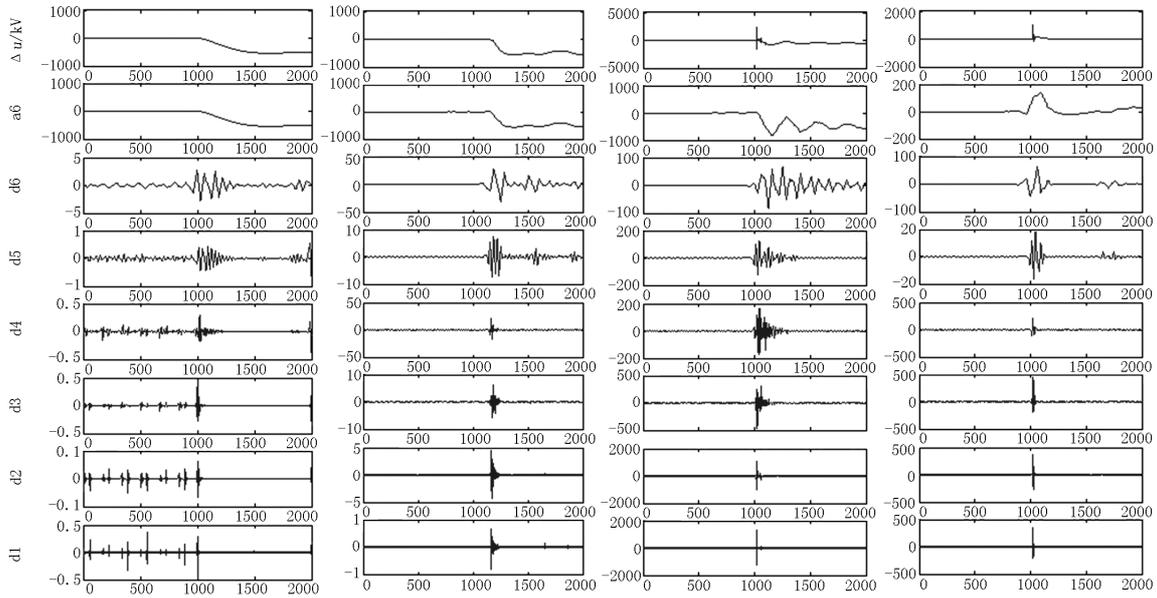


图5 暂态电压故障波形及其小波分解

Fig.5 Waveform of transient voltage and its wavelet decomposition

- 1) 直流线路区外故障时, 整流侧测得的电压行波中暂态低频分量较大, 而高频分量很小;
- 2) 直流线路故障时, 电压行波具有很大的低频分量, 但其高频分量较大, 且明显大于区外故障;
- 3) 发生非故障性雷击和故障性雷击时, 整流侧暂态电压都有很高的高频分量和低频分量, 但总的来说非故障性雷击时的低频分量要低于故障性雷击和区内故障;
- 4) 线路经高阻接地时, 电压行波的幅值和陡度都下降了许多, 暂态高频分量和低频分量均大为减小, 尤其是高频段, 但在 d4 到 d6 这个频段的高频分量仍然比区外故障时的大;
- 5) 在噪声的干扰下, 区外故障的暂态电压高频分量大幅增加, 已完全远离了本来值, 特别是在高频段更加明显; 不过, 在高尺度的小波分解层, 噪声干扰的影响已显著减小。

## 4 基于小波变换的行波保护判据

### 4.1 判据的内容

#### 1) 保护的启动判别量

采用暂态电压行波的小波变换模极大值作为故障判别元件, 检测整流侧的暂态电压行波, 利用 db3 小波将其进行多尺度分解, 判断在尺度 3 下的模极大值  $W_3u(t)$  是否大于阈值  $W_{Th}$ , 即

$$W_3u(t) > W_{Th} \quad (2)$$

由式 (2) 构成保护的启动元件。

#### 2) 动作判据

由于直流线路区内故障时暂态电压的高频能量较区外故障时大, 故保护的判据如下:

$$E_H > E_{H,Th} \quad (3)$$

式中:  $E_H = \sum_{n=1}^N W_6 U_d^2(n)$  (4)

为暂态电压行波在第 6 尺度上的高频能量;  $E_{H,Th}$  为整定值;  $N$  是算法的数据窗长度。在通常情况下该式可用于判别区内、区外故障。

然而, 单凭判据式 (3) 并不能可靠区分区内、区外故障以及非故障干扰, 需要增加辅助判据提高保护的可靠性。

首先, 对于非故障性雷击, 暂态电压的低频能量相对高频能量来说含量较小, 因此可利用暂态电压的低频能量构成辅助判据, 如式 (5) 所示。另外, 考虑到雷电参数和故障条件对低频能量影响较大, 比如: 雷电流的幅值越高或波头、波尾时间常数越长, 低频能量越高; 故障的过渡电阻越大, 短路点越远, 低频能量就越小。因此, 仅靠辅助判据式 (5) 仍然难以保证判据的可靠性。进一步分析发现, 利用低频、高频的能量比作为判别指标, 可以有效地削弱雷电参数和故障条件的影响, 见式 (6), 可识别非故障性雷击 (这里利用了  $K_{Th1} < K$ )。

其次, 尽管小波变换具有良好的消噪作用, 但

当噪声过大时并不能将之完全消除, 此时一些区外故障的暂态电压高频能量将比原值增大很多, 若不加以处理将引起式 (3) 的误判。如前所述, 区外故障暂态电压的低频能量较大, 高频能量相对较小, 故低频与高频能量之比将会很大, 因此可利用低、高频的能量比作为判别指标 (这里利用了  $K < K_{Th2}$ ) 来解决噪声干扰的问题。加上判别式 (5) 可防止某些区外故障低频能量较低使得  $K$  值落在  $K_{Th1} < K < K_{Th2}$  的范围, 造成保护的误判, 可进一步提高保护判据的可靠性。

辅助判据具体表达式为:

$$E_L > E_{LTh} \quad (5)$$

$$K_{Th1} < K < K_{Th2} \quad (6)$$

式中: 
$$E_L = \sum_{n=1}^N W_6 U_a^2(n) \quad (7)$$

为暂态电压对应于第 6 尺度的低频能量;

$$K = E_L / E_{H\Sigma} \quad (8)$$

$K$  为低频能量与高频能量之比, 其中

$$E_{H\Sigma} = \sum_{i=5}^6 E_{Hi} \quad (9)$$

为暂态电压在尺度 5 与尺度 6 上的高频能量之和;

$E_{LTh}$ 、 $K_{Th1}$  和  $K_{Th2}$  均为整定值。

#### 4.2 保护的逻辑

上述保护判据的动作逻辑可描述为:

1) 检测电压行波, 若满足式 (2), 则启动保护并记录故障时刻, 转入下一步; 否则保护不动作。

2) 根据式 (4) 计算  $E_H$ , 若式 (3) 成立, 则转入下一步; 否则判断为区外故障, 保护不动作。

3) 根据式 (7)、(9) 分别计算  $E_L$  和  $E_{H\Sigma}$ , 进而根据式 (8) 计算出  $K$  值, 若式 (5) 和式 (6) 同时成立, 则判断为直流线路区内故障, 保护动作; 否则判断为区外故障或干扰, 保护不动作。

#### 4.3 保护动作的快速性

该保护方案从启动保护到判据判别结束需要计算的式子有 (2)、(4)、(7)、(8) 和 (9)。这几个式子并不复杂, 且计算程序结构简练、语句简单, 再加上现在的处理器速度很快, 完全能够满足保护快速动作的要求。

### 5 仿真验证

对图 4 所示的系统进行了大量的仿真计算, 以验证本文所提保护判据的正确性。

各种故障条件下 (加 5% 噪声) 保护判据的计算结果如表 2 所示, 表中 S、Z、M 分别表示直流线路始端、线路中点和线路末端经不同的过渡电阻

接地故障, 非故障性雷击的雷电流幅值 15 kA, 故障性雷击的雷电流幅值 50 kA。

对表 2 进行分析可知: 直流线路发生接地短路或雷击故障时高频能量较大, 相应的  $K$  值介于 150 和 4 000 之间; 区外故障时,  $W_3u(t)$  较小, 低于门槛值, 不会启动保护判据; 若由于某种原因, 如整定值过小或者故障信号中含有较大噪声时, 部分区外故障的  $W_3u(t)$  将大于  $W_{Th}$ , 且高频能量  $E_H$  也比无噪声时的大, 可能出现超过整定值的情况。不过其对应的  $K$  值会很大, 最小的为 25 072, 远大于区内故障的最大值 3 736; 非故障性雷击时, 高频能量较大, 且有时低频能量也很高, 且大于门槛值, 然而, 它的  $K$  值很小, 最大的为 64, 小于区内故障时的最小值 192, 判据仍能可靠判别。

表 2 暂态电压在不同分解尺度下的能量

Tab.2 Energies of transient voltage at each scale

故障情况		$E_H$	$E_L$	$E_{H\Sigma}$	$K$
条件	类型	$\times 10^3 \text{kV}^2$	$\times 10^6 \text{kV}^2$	$\times 10^3 \text{kV}^2$	$\times 10^2$
区内故障	S 0 $\Omega$	418.46	152.96	447.46	3.42
	S 100 $\Omega$	44.83	57.62	46.23	12.45
	S 500 $\Omega$	7.11	7.08	7.59	10.28
	S 1000 $\Omega$	2.06	3.00	2.52	11.90
	Z 0 $\Omega$	46.81	116.55	49.30	23.64
	Z 100 $\Omega$	16.92	48.43	17.77	27.25
	Z 500 $\Omega$	2.83	8.24	3.44	23.93
	Z 1000 $\Omega$	1.15	2.58	1.59	16.24
	M 0 $\Omega$	38.06	75.20	40.75	18.45
	M 100 $\Omega$	14.67	34.76	16.28	21.35
	M 500 $\Omega$	3.08	7.77	3.52	22.11
	M 1000 $\Omega$	1.39	2.75	2.00	13.75
雷击故障	S 1.2/50 $\mu\text{s}$	369.17	135.99	682.30	1.9
	S 4/100 $\mu\text{s}$	400.27	140.50	731.77	<b>1.92</b>
	Z 1.2/50 $\mu\text{s}$	93.84	97.38	111.53	8.73
	Z 4/100 $\mu\text{s}$	92.52	98.76	110.53	8.94
	M 1.2/50 $\mu\text{s}$	23.67	76.23	24.81	<b>30.73</b>
	M 4/100 $\mu\text{s}$	23.29	76.79	25.08	30.62
区外故障或非故障干扰	J1	0.305	—	—	—
	J3	0.851	29.80	1.19	<b>250.72</b>
	N1	0.369	—	—	—
	HN	0.406	—	—	—
	N0	0.633	34.89	1.11	313.44
	S 1.2/50 $\mu\text{s}$	141.19	1.79	—	—
非故障性雷击	S 4/100 $\mu\text{s}$	506.59	7.80	571.24	0.14
	Z 1.2/50 $\mu\text{s}$	15.61	1.50	—	—
	Z 4/100 $\mu\text{s}$	43.88	6.38	100.81	0.63
	M 1.2/50 $\mu\text{s}$	5.13	1.03	—	—
M 4/100 $\mu\text{s}$	55.41	4.71	73.56	<b>0.64</b>	

### 6 结语

利用高压直流输电线路区内、区外故障电压行

波的暂态信息, 提出了一种基于小波变换的直流线路行波保护。该保护方案主要利用了暂态电压行波的高、低频能量在区内、区外故障以及雷电干扰等故障情况下呈现出大小不同的特性构成保护判据。

通过大量仿真计算表明: 对于直流线路区内的不同位置、不同的接地电阻的故障情况下, 本文的保护判据均能准确判断, 保护能够快速动作; 对于区外故障、雷电干扰能够可靠识别, 且具有很强的抗干扰性。

### 参考文献

- [1] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.  
AI Lin. Research on HVDC line wave traveling protection, thesis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002.
- [2] 何智江. 发展中的中国高压直流输电事业[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 460-463.  
HE Zhi-jiang. Chinese developing HVDC transmit electricity project[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 460-463.
- [3] 刘东, 吴泽辉. 天广直流线路高阻抗接地故障保护分析[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(5): 57-60.  
LIU Dong, WU Ze-hui. Protection analysis of Tian-Guang direct current line grounding through large resistance[J]. China Southern Power Technology Research, 2005, 1(5): 57-60.
- [4] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
ZHAO Wan-jun. HVDC transmit electricity engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 王钢, 李海锋, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.  
WANG Gang, LI Hai-feng, ZHAO Jian-cang, et al. Identification of transient on transmission lines caused direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.
- [6] 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布[J]. 高电压技术, 1995, 21(1): 85-86.  
LUO Shi-qian. The spectrum and energy distribution of lightning wave[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(1): 85-86.
- [7] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
DONG Chang-hong. Matlab theory and application of wavelet analysis toolbox[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [8] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Electricity power relay protection theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2009-04-25; 修回日期: 2009-06-04

作者简介:

李振强(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统过电压研究工作; E-mail: zhen\_268@163.com

鲁改凤(1963-), 女, 本科, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全运行与保护等;

吕艳萍(1955-), 女, 教授, 主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化研究工作。

(上接第 39 页 continued from page 39)

- [7] 夏凌. 基于Pareto边界的多目标调度研究(硕士学位论文)[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
XIA Ling. Pareto boundary based multicriteria scheduling, thesis [D]. Shanghai: SJTU, 2008.
- [8] Wan Y H. On local Pareto optima[J]. Journal of Mathematical Economics, 1975, 2: 35-42.
- [9] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. //Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. 1995: 39-43.
- [10] HU Xiao-hui, Eberhart R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C]. //Proceedings of the Evolutionary Computation on 2002. CEC '02. Proceedings of the Congress. 2002: 1677-1681.
- [11] 毕荣山, 杨霞, 谭心舜, 等. 基于动态Pareto解集的微粒群优化算法及其在多目标规划中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(32): 85-88.  
BI Rong-shan, YANG Xia, TAN Xin-shun, et al. Dynamic Pareto warehouse-based particle swarm optimization algorithm for multi-objective programming[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(32): 85-88.

收稿日期: 2009-08-24; 修回日期: 2009-10-09

作者简介:

李啸虎(1986-), 男, 研究生, 主要研究方向为电力市场。E-mail: goldtime1997@sina.com