

# 基于暂态电压信号的输电线路保护算法研究

夏明超, 黄益庄

(清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 提出了一种基于双端电压暂态信号小波变换的高压输电线路快速保护算法。通过检测出的线路两端的电压信号小波变换模极大值点及其李氏指数的比较, 区分出区内、区外故障或开关操作, 保护动作可靠, 能保护线路的全长, 且对两端采样的同步要求不高。EMTP 仿真对此算法进行了验证, 对不同的故障位置和噪声情况进行了分析。

**关键词:** 暂态保护; 小波变换; 李氏指数; 双端保护

**中图分类号:** TM773      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2003)05-0005-04

## 1 引言

传统的保护装置是利用工频或稳态分量作为启动、跳闸或闭锁判据, 而故障引起的工频信号是同非工频信号相关联的, 因此只能通过延时躲过系统过渡过程以获得工频分量, 这将影响超高压 (EHV) 输电线路保护的速动性和灵敏性。近年来, 基于故障后产生的高频暂态分量的继电保护——暂态保护<sup>[1]</sup> (TBP, Transient Based Protection) 得到广泛的研究。高压长距离输电线路具有明显的分布特性, 其故障时会产生丰富的高频电压和电流信号, 这些信号中含有与故障有关的各种信息, 包括故障地点、故障方向、故障类型、故障程度、故障存在时间等, 有效地提取和利用这些信息可以提高保护性能。暂态保护通过检测故障产生的高频暂态电压电流信号来检测故障的发生, 具有响应快、准确度高的优点, 并且不受工频现象如过渡电阻、系统振荡、TA 饱和的影响, 值得深入研究。

本文利用小波变换对暂态电压波形进行分析, 提取其暂态特征, 并利用线路两端的分析结果进行比较, 以便判断区内、区外故障或开关操作。并通过 EMTP 仿真, 对各种区内、区外故障及开关操作情况进行了仿真分析和算法验证。

## 2 暂态特征提取及小波变换

在本文中, 采用电压暂态波形的故障分量进行判别。电力系统发生故障时, 故障后所产生的暂态信号为工频信号基础上叠加高频暂态信号。参照工频信号故障分量的提取方法, 暂态电压电流信号的故障分量可以利用故障后实测的电压和电流减去故障前对应的电压和电流。本文使用当前采样值同前一周波对应位置的采样值之差获得信号的暂态故障

分量, 并加以分析。

由于高压输电线相间的耦合作用, 使得相间的暂态信号互相影响<sup>[2]</sup>。本文对三相电压暂态信号作模变换获得模分量进行分析以避免三相输电线路间耦合的影响。采用 Clark 变换将相量变换为模量, 使用其线模分量作为分析量:

$$U_m = S^{-1} U_{ph} \quad (1)$$

其中  $U_m$  和  $U_{ph}$  分别为电压信号的模量和相量,  $S$  为 Clark 矩阵:

$$S = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 2 & 0 \\ \sqrt{2} & -1 & \sqrt{3} \\ \sqrt{2} & -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

对于暂态信号特征的提取, 纯时域或纯频域的分析手段都无法完整地获得信号暂态信息。小波变换这一新发展起来的分析手段, 具有良好的时频域分辨率和很强的特征提取功能, 对暂态信号的处理优势明显。由于噪声信号的小波变换和有效暂态信号的小波变换在特征上有明显的区别, 小波变换具有消噪功能; 同时, 基于多尺度分析的小波变换快速算法可以通过滤波器组来实现, 其计算具有较好的实时性。因此, 有效地利用小波变换将更好地提取信号的暂态特征。

在本文中, 使用工程中常用的对于离散信号  $x(n)$  进行分析的二进制小波变换。二进制小波变换可以通过滤波器组来实现多尺度分析, 具有很好的实时性:

$$\begin{cases} x_k^{(s+1)} = \frac{1}{n} h_{0(n-2k)} x_n^s \\ d_k^{(s+1)} = \frac{1}{n} h_{1(n-2k)} x_n^s \end{cases} \quad (2)$$

其中  $h_0, h_1$  分别为低通和高通滤波器系数, 可以通过母小波求出<sup>[3]</sup>。  $x_n^s$  为信号  $x(n)$  在尺度  $s$  下的平

滑逼近,  $d_k^s$  即为信号  $x(n)$  在尺度  $s$  下的小波变换。小波变换后信号的局部极大值点称为模极大值点, 小波母函数如果是某一平滑函数的一阶导数, 则信号经过其变换后的模极大值点对应着信号的突变点, 其正负表示信号突变的方向。小波变换模极大值同尺度之间存在如下关系:

$$|W_{\max} x(t)| \propto K S \quad (3)$$

其中  $W_{\max} x(t)$  为  $x(t)$  的小波变换模极大值,  $K$  为一常数,  $S$  为尺度,  $L$  为信号在该点的李氏(Lipschitz)指数<sup>[4]</sup>。在本文中使用三次 B 样条小波作为母小波, 其低通和高通滤波器系数分别为:  $H_0 = \{0.125, 0.375, 0.375, 0.125\}$ ,  $H_1 = \{0.5, -0.5\}$ 。

### 3 保护算法

图 1 为一简化的 500 kV 输电线路模型, MN 段线路长度为 342 km, NS 段线路长度为 252 km。  $G_1 = 1699$  MVA,  $G_2 = 704$  MVA,  $G_3 = 178$  MVA。  $F_1$  和  $F_2$  为区内和区外两个不同的故障点, MN 线路为保护研究的线路段。本文使用此线路模型, 利用 EMTP 分别对区内和区外的不同位置的单相接地短路、单相经电阻接地、两相接地短路、两相相间短路及三相短路故障进行了仿真。仿真程序使用 PSCAD/EMTDC, 采样频率为 100kHz, 噪声为 2% 白噪声。现结合一组仿真记录的故障电压波形, 阐述本文所提出的保护算法和判据。

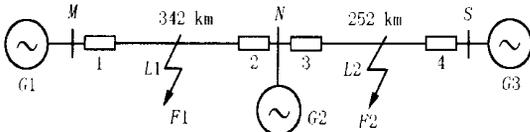


图 1 EMTP 仿真线路模型

Fig. 1 Line model in EMTP simulation

#### 3.1 故障判别

在本文中, 提取电压暂态信号的故障分量后, 进行相模变换, 对得到的模分量利用二进制小波滤波器组进行分析, 采用尺度 2 和尺度 3 的分析结果模极大值及其李氏指数作为判别依据。图 2、3、4、5 分别为  $F_1$  距离  $N$  端母线 10 km 处区内 C 相接地短路时的断路器 2 所检测到的 C 相电压(图 2)、故障分量经过模变换后的线模量(图 3)、模量经过小波变换后尺度 2 和尺度 3 的波形(图 4、5)。根据小波变换模极大值的产生情况可以作出保护判断。

信号经过小波变换后不同尺度下的结果对应着不同的频段, 相应的其李氏指数可以表示两个不同

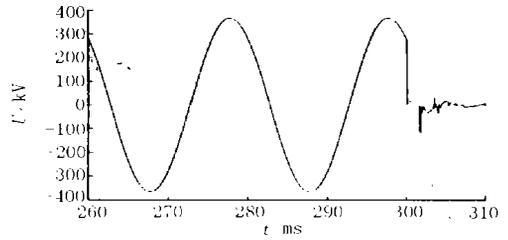


图 2 C 相接地短路时的 C 相电压

Fig. 2 Voltage of phase C on phase C to ground fault

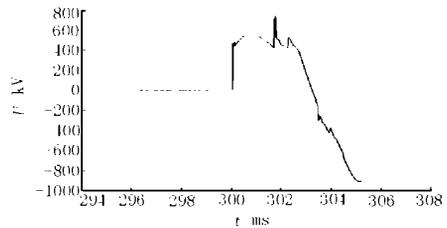


图 3 故障分量经过模变换后的线模量

Fig. 3 Aerial mode of fault components after phase-mode conversion

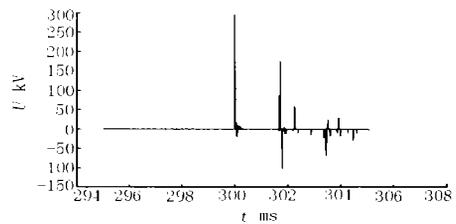


图 4 模量的小波变换尺度 2 的波形

Fig. 4 The wavelet transform of mode component at scale 2

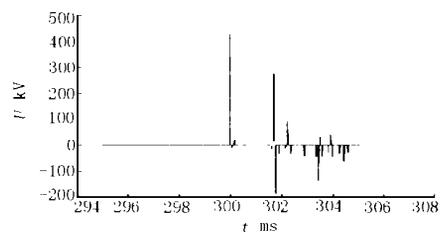


图 5 模量的小波变换尺度 3 的波形

Fig. 5 The wavelet transform of mode component at scale 3

频段的信号的幅值之比。由于高压母线的分布电容在高频下呈现较小的阻抗特性, 因此当区外的故障分量电流流过母线时, 将有大部分的高频电流经分布电容流入大地, 而使得远离故障点的母线端的故障电流中高频成分减少, 相应的该母线上的故障电压中的高频成分也减少, 且频率越高, 减少得越厉害。经过小波变换后其李氏指数将有所不同: 在区外故障时, 远离故障点的母线端的李氏指数将较大; 而接近故障点的母线端其李氏指数同区内故障时相

比变化较小。

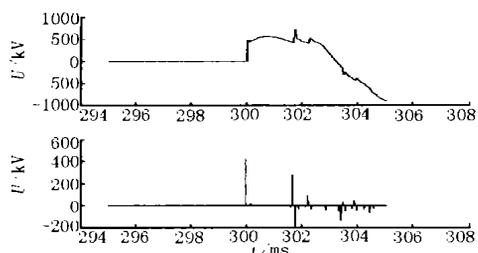


图6 区内故障时N端故障分量波形及小波变换结果

Fig. 6 Fault component at end N and its wavelet transform of in-zone fault

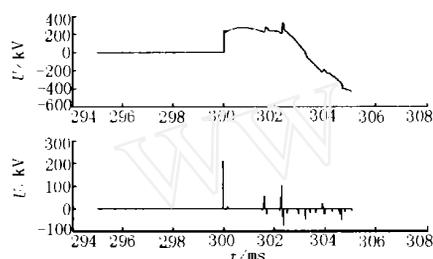


图7 区外故障时N端故障分量波形及小波变换结果

Fig. 7 Fault component at end N and its wavelet transform of out-zone fault

如图6和图7所示为故障点 $F_1$ 距离N端母线10 km和故障点 $F_2$ 距离N端母线10 km单相金属性接地故障时断路器2检测到的电压的故障分量波形及其小波变换尺度3下的结果。在区内故障时,小波变换结果李氏指数为0.54468,区外故障时其李氏指数为0.52466,他们相差很小。由于只使用单端的信息进行分辨,所以在这种情况下难以区分区内和区外故障。为此我们引入对端(M侧)的检测结果进行了故障判别:在区外故障时M侧获得的信号李氏指数较大,而在区内时较小,将其同N侧的李氏指数比较后获得其差异用于保护判别。对图3中两种故障时断路器1处所检测到的电压暂态信号进行相同的处理,在区内故障时,M侧电压李氏指数为0.62627,区外故障时其李氏指数为0.69429。在区内故障时MN两侧的李氏指数相差较小,而在区外故障时则相差较大。为此我们求出两端李氏指数的商 $M/N$ 。在区内故障时 $M/N=1.150$ ,在区外故障时 $M/N=1.323$ 。通过这个比值的差异,可以区分出区内和区外故障。

### 3.2 开关操作与故障的区分

开关操作相对于短路故障来说,在保护装设处检测到的波形变化要相对较平缓,即较高频率成分含量较少,经过小波变换后,其表现在信号的李氏指

数较大。如图8和图9为断路器3由断开至闭合操作时M端和N端的电压故障分量波形及尺度3下的小波变换结果。图中M端和N端的电压故障分量波形小波变换李氏指数分别为 $M=0.97638$ 、 $N=0.90685$ 。在开关操作时,M端和N端检测到的李氏指数要较故障时大。

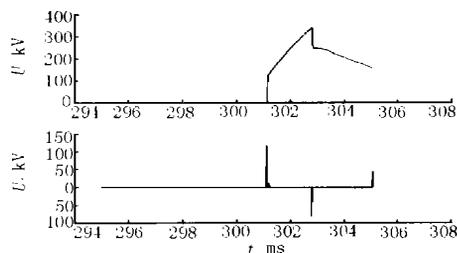


图8 断路器3操作时M侧电压波形及小波极大值

Fig. 8 Voltage at end M and its wavelet modulus maxima when breaker 3 operates

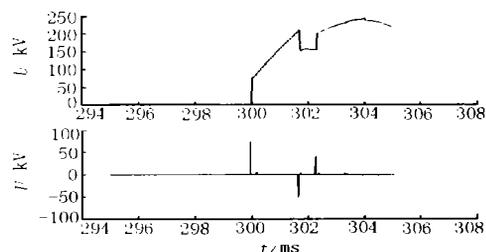


图9 断路器3操作时N侧电压波形及小波极大值

Fig. 9 Voltage at end N and its wavelet modulus maxima when breaker 3 operates

### 3.3 保护判据

根据以上的分析,本文提出的保护判据如下:

设线路两端分别为M端和N端,其检测到信号的李氏指数分别为 $M$ 、 $N$ 。令 $K = \text{Max}(M, N) / \text{Min}(M, N)$ ,其中 $\text{Max}(M, N)$ 、 $\text{Min}(M, N)$ 分别为 $M$ 和 $N$ 中的最大值和最小值。有如下保护判据:

$$0 < M < \text{set} \text{ 且 } 0 < N < \text{set}$$

$$K < K_{\text{set}}$$

检出模极大值后,求其李氏指数,如果不满足,即 $M > \text{set}$ ,则判为开关操作。如果满足,但不满足,则判为区外故障。如果两个原则均满足,则判断为保护区内故障。其中 $\text{set}$ 和 $K_{\text{set}}$ 可以根据线路的参数计算出信号沿线路的衰减情况后配合线路长度以及所选择的信号频率范围估算出,限于篇幅,这里就不对其进行详细分析了。

## 4 仿真结果分析

对图 1 所示系统,区内故障点  $F_1$  距  $M$  端距离为  $L_1$ ,区外故障点  $F_2$  距  $N$  端距离为  $L_2$ 。针对以上保护判据,分别对  $L_1$  和  $L_2$  不同位置 and 不同故障类型进行了仿真,并对区外断路器 3 和断路器 4 由断开至闭合进行了仿真。由于断路器 3 和断路器 4 由闭合至断开操作  $M$  端和  $N$  端信号波动较小,未检测出,故在仿真结果分析中没有列出这两种情况。在本仿真算例中保护判断取  $set = 0.85$ ,  $K_{set} = 1.25$ 。对仿真数据使用 Matlab 进行处理。经过消噪、故障分量提取和小波变换。数据处理结果及保护判断结果举例如下:

表 1 C 相单相经电阻接地(接地电阻 10 ) 仿真结果

Tab.1 Simulation results of C phase to ground fault (fault resistor 10 )

序号	仿真内容	$M$	$N$	$K$	判断结果
1.1	$L_1 = 10\text{km}$ 故障	0.50528	0.62437	1.236	区内故障
1.2	$L_1 = 60\text{km}$ 故障	0.47766	0.57513	1.204	区内故障
1.3	$L_1 = 171\text{km}$ 故障	0.5342	0.5429	1.016	区内故障
1.4	$L_1 = 282\text{km}$ 故障	0.55603	0.45032	1.235	区内故障
1.5	$L_1 = 332\text{km}$ 故障	0.62657	0.54487	1.150	区内故障
1.6	$L_2 = 10\text{km}$ 故障	0.74489	0.54479	1.367	区外故障
1.7	$L_2 = 60\text{km}$ 故障	0.67594	0.42035	1.608	区外故障
1.8	$L_2 = 126\text{km}$ 故障	0.71996	0.49547	1.453	区外故障

表 2 两相接地短路仿真结果

Tab.2 Simulation results of two phase to ground fault

序号	仿真内容	$M$	$N$	$K$	判断结果
2.1	$L_1 = 10\text{km}$ 故障	0.50339	0.60497	1.202	区内故障
2.2	$L_1 = 60\text{km}$ 故障	0.50139	0.59506	1.187	区内故障
2.3	$L_1 = 171\text{km}$ 故障	0.55467	0.56581	1.020	区内故障
2.4	$L_1 = 282\text{km}$ 故障	0.57682	0.47424	1.216	区内故障
2.5	$L_1 = 332\text{km}$ 故障	0.64662	0.55428	1.167	区内故障
2.6	$L_2 = 10\text{km}$ 故障	0.70559	0.53423	1.321	区外故障
2.7	$L_2 = 60\text{km}$ 故障	0.63335	0.47425	1.335	区外故障
2.8	$L_2 = 126\text{km}$ 故障	0.67986	0.51867	1.311	区外故障

表 3 开关操作仿真结果

Tab.3 Simulation results of switching operation

序号	仿真内容	$M$	$N$	判断结果
3.1	断路器 3 操作	0.97638	0.90685	开关操作
3.2	断路器 4 操作	1.1306	1.026	开关操作

本文分别对  $L_1$  为 10 km、60 km、171 km、282 km、332 km 和  $L_2$  为 10 km、60 km、126 km 的 C 相单相金属性接地故障、C 相单相经不同阻值电阻接

地、两相相间短路、两相接地短路以及三相短路的情况进行了仿真,仿真分析结果证明,本文所提出的保护算法在线路不同位置的各种类型故障时均能正确判断,并能区分区外故障。算法采样率使用 100 kHz,而对两侧采样的同步并无特殊要求,这使得该算法的硬件实现更加简单。

对噪声为 10% 的强干扰情况进行分析,对 C 相单相金属性接地短路,  $L_1 = 332\text{ km}$  和  $L_2 = 10\text{ km}$  两种情况进行仿真分析,结果如下:

表 4 10% 噪声情况下 C 相单相金属性接地仿真结果

Tab.4 Simulation results of C phase to ground fault with 10% noise

序号	仿真内容	$M$	$N$	$K$	判断结果
4.1	$L_1 = 332\text{km}$ 故障	0.61875	0.5407	1.120	区内故障
4.2	$L_2 = 10\text{km}$ 故障	0.70633	0.53287	1.325	区外故障

在 10% 噪声强干扰情况下,保护判据仍能正确判别。当然,以上算法只是利用仿真数据进行初步的研究,还很不深入,算法的性能及实际应用还有待进一步的研究和探讨。

## 5 结论

由以上仿真结果分析可以看出,利用双端电压暂态信号波形的模极大值检测进行判断,并比较两端模极大值处李氏指数的差异,采用本文所提出的判据可以区分区内、区外故障及开关操作,能保护线路的全长,且本算法对两端的同步数据采集并无特殊要求,值得进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] Bo Z Q. Transient based protection for transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998: 1067-1071.
- [2] Hedmen D E. Propagation on overhead transmission lines, Part I-Theory of modal analysis[J]. IEEE Transactions PAS, 1965, 84: 489-493.
- [3] Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: The wavelet transform [J]. IEEE Trans., 1989, PAMF11 (7): 674-693.
- [4] Meyer Y. Wavelet and operators. Advanced mathematics, Cambridge University press, 1992.

收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2003-03-05

作者简介:

夏明超(1976-),男,博士研究生,主要从事电力系统自动化及继电保护的研究;

黄益庄(1938-),女,教授,主要从事电力系统自动化、变电站自动化及电力系统继电保护方面的研究。

(下转第 13 页)

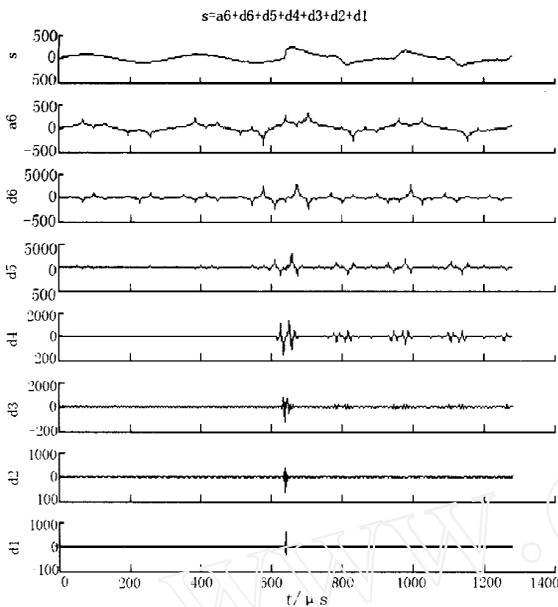


图2 故障信号的多尺度逼近

Fig. 2 Multi-scales approach of fault signal

联系。在此基础上,总结了具有线性相位的紧支撑双正交小波的构造方法。实例计算和仿真证明该方法具有较高实用性,可应用于电力系统的相关问题。

也可以作为高阶滤波器设计时,计算机算法的依据。将两尺度符号与小波构造结合的方法对电力系统其他不同性质的小波的构造也有很高的借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] 李建平. 小波分析与信号处理—理论应用及软件实现[M]. 重庆:重庆出版社,1997.
- [2] 徐长发,李国宽. 实用小波分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [3] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [4] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.

收稿日期: 2002-08-20; 修回日期: 2002-09-19

#### 作者简介:

胡海安(1975-),男,硕士研究生,主要从事小波在电力系统中的应用研究;

向铁元(1953-),男,副教授,主要从事电力系统运行与控制,电力系统分析计算方面的研究;

谢锋(1972-),男,硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方面的研究。

### Two-scale symbol and the construction of wavelet applied in power system

HU Hai-an, XIANG Tie-yuan, XIE Feng, ZHANG Peng

(Dept. of Electrical Engineering Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Basing on the construction of wavelet, discuss the close relation between the scaling function and wavelet function's two-scale symbol and wavelet construction. The analyse begin with the two-scale symbol, then the immanent relation between two-scale symbol and the direct sum decomposition of  $L^2(\mathbb{R})$  space; the structure of dual wavelet; the structure of compactly supported wavelet. Late present the method that how to construct the compactly supported biorthogonality wavelet with linear phase or generalizing linear phase, and take an example.

**Key words:** two-scale symbol; construction of wavelet; wavelet analysis

(上接第8页)

### Research on transient voltage signals based protection criterion for transmission line

XIA Ming-chao, HUANG Yi-zhuang

(Department of Electrical Engineering, TsingHua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A new high-speed protection criterion for high voltage transmission line based on the wavelet transform of transient voltage signals from the two ends of the line is presented. By comparing the Lipschitz exponent and time of the wavelet modulus maxima of voltages of both ends, in-zone faults and out-zone faults and switching operations can be distinguished, protection operates more reliably and can protect the whole line, and there is no strict request for synchronous sampling. Simulations are carried out using EMTP for testing the criterion, and there is the influences of fault locations and noises are discussed.

**Key words:** transient based protection; wavelet transform; lipschitz exponent; two-end protection