

# 基于小波变换的 EHV 输电线路单端暂态电压保护算法的探讨

陈茂英, 杨明玉, 张新国, 胡巨

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 讨论了信号李氏指数的小波变换特性, 提出了一种基于暂态电压信号小波变换的超高压输电线路单端量保护算法。利用单端暂态电压信号的小波变换模极大值, 对电压信号的李氏指数进行最小二乘法估计, 以便判断故障线路。仿真表明, 在各种故障情况下该保护算法都足以提取和放大故障线路和非故障线路的差异, 可靠、准确地动作。

**关键词:** 单端暂态量保护; 小波变换; 最小二乘法; 李氏指数

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0017-04

## 0 引言

传统保护基于提取故障引起的工频信号, 这给超高压 (EHV) 输电线路实现速动造成困难。故障产生的高频信号富含多于工频信号的信息, 贯穿于信号的整个频域。所以, 利用高频分量来实现线路保护的技术, 能很好地解决 EHV 线路保护速动性和可靠性之间的矛盾。近年来, 基于故障后产生的高频暂态分量的继电保护—暂态保护得到广泛的研究<sup>[1]</sup>。目前, 研究最多的是暂态电流保护<sup>[2~5]</sup>。这是因为普通电流互感器传变高频分量的特性优于普通电压互感器。随着光电互感器的发展, 光电电压互感器的高频传变能力的提高, 构造简单的单端暂态电压保护是可以实现的, 和暂态电流保护相配合, 能很好地提高暂态保护的可靠性。

实施暂态保护的关键是暂态特征的提取和暂态保护机理的建立。本文在分析故障线路和非故障线路的暂态电压信号特征的基础上, 利用小波变换提取其特征, 并运用最小二乘法对暂态电压波形的李氏指数进行估计, 从而可以实现单端暂态电压保护。

仿真表明, 该保护算法是可靠、准确的。

## 1 信号李氏指数的小波变换特性<sup>[6,7]</sup>

### 1.1 李氏指数

这是数学上表征信号局部特征的一种度量, 其定义是, 设信号  $x(t)$  在  $t_0$  附近具有下述特征:

$$|x(t_0+h) - p_n(t_0+h)| \leq A|h|, \quad n < \infty < n+1 \quad (1)$$

则称  $x(t)$  在  $t_0$  处的李氏指数 (Lip schitz 指数) 为  $n$ , 式中  $h$  是一个充分小量,  $p_n(t)$  是过  $x(t_0)$  点的  $n$  次多项式 ( $n \in \mathbf{Z}$ )。

如果  $x(t)$  为  $n$  次可微, 但  $n$  阶倒数不连续, 因此  $n+1$  次不可微, 则  $n < n+1$ ; 如果  $x(t)$  的 Lip schitz 指数为  $n$ , 则  $x(t) dt$  的 Lip schitz 指数必为  $n+1$ , 即每积分一次, Lip schitz 指数增 1。

李氏指数定义是对  $x(t)$  上的一点  $t_0$  而言的, 若扩展到一段区间  $[a, b]$ , 则要求当区间  $[a, b]$  内的任意两点  $t_0$  和  $t_0+h$  都满足条件 (1) 时, 称  $x(t)$  在此区间为均匀 Lip schitz。

## Application of evolutionary game theory in power supply bidding strategies

ZENG Ci-ling<sup>1</sup>, ZHANG Bu-han<sup>1</sup>, XIE Pei-yuan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hunan Electric Power Control & Communication Centre, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Evolutionary game theory is a theory of combining the game theory analysis with the dynamic analysis of the evolutionary process. Evolutionary game theory and its developing process are introduced, and the model about the bidding process in power market is established and solved by using evolutionary game theory. The proposed model is illustrated by a case study, and the results show that the proposed model can perfectly describe market response and the dynamic process of power suppliers' bidding.

**Key words:** power market; evolutionary game theory; bidding

一般来讲,函数在某一点的李氏指数表征了该点的奇异性大小,越大,该点的光滑度越高;越小,该点的奇异性越大。并且如果函数  $x(t)$  在某一点可导,它的  $D_x = 1$ ;如果  $x(t)$  在某一点不连续但其值有限,则  $0 < D_x < 1$ 。对于脉冲函数,  $D_x = -1$ ;而对于白噪声,  $D_x = 0$ 。另外,信号频率越高,其李氏指数越小。

### 1.2 小波奇异性检测理论及李氏指数估计方法

小波变换理论的发展,为信号处理领域的研究开辟了新途径和方法。在信号的奇异性分析中,信号奇异程度在各点常常是不同的,有强或弱的区分。信号的李氏指数能够用它的定义来计算,然而其计算过于复杂和困难,且没有考虑信号不可避免的噪声。Fourier变换是研究函数奇异性的基本工具,但它只能确定信号是否具有奇异和奇异性的强弱,而不能确定奇异点的分布情况及奇异点的位置。小波变换不仅使信号在频域内和在时域内有较好的分辨率,而且也有很好的去噪能力,因此用小波变换进行信号的奇异性检测更具完备性。

假设小波函数  $\psi(t)$  是连续可微的,并且在无限远处的衰减速率为  $O\left(\frac{1}{1+t^2}\right)$ , Mallat证明:当  $t$  在区间  $[a, b]$  中时,如果  $f(t)$  的小波变换  $W_s f(t)$  满足:

$$|W_s f(t)| \leq k s \quad (2)$$

其中:  $k$  是一个常数,则  $f(t)$  在区间  $[a, b]$  中的李氏指数均匀为  $D_x$ 。

当  $s = 2^j$  时,上式变成

$$|W_{2^j} f(t)| \leq k (2^j) \quad (3)$$

由上述可知,在小波变换域,信号的光滑程度能够由不同尺度上的小波系数绝对值的衰减来估计。

令  $\max_n |W_{2^j} f(n)|$  为  $f(t)$  在尺度  $j$  下的模极大值,由式 (3) 可知

$$\max_n |W_{2^j} f(n)| \leq k (2^j) \quad (4)$$

从式 (4) 可以看到,由白噪声引起的小波变换模极大值将随着尺度的增大而减小,这是由于它的李氏指数小于 0。这正是小波变换具有去噪能力的原因。

式 (4) 两边取对数,得

$$\log\left(\max_n |W_{2^j} f(n)|\right) \leq \log k + j \quad (5)$$

记  $d_j = \log\left(\max_n |W_{2^j} f(n)|\right)$ ,  $b = \log k$ , 则得到不等式组

$$d_j \leq b + j, \quad j=1, \dots, J \quad (6)$$

问题可以转化为求  $b$ , 使

$$\sum_j (b + j - d_j)^2$$

最小,这是一种一次最小二乘问题。尺度  $j$  的个数取得越多,李氏指数估计得越精确。

### 1.3 小波函数的选择

在文献 [8] 指出,当小波的消失矩不够高时,将使暂态信号奇异性检测失败;但高阶小波对应的滤波器较长,计算量大。基于上述两点的考虑,本文采用 Daubechies4 阶小波 (db4),可以快速、正确地判别故障线路和非故障线路。

## 2 保护算法

### 2.1 基本原理

采用图 1 所示的一简化的 500 kV 输电线路,简单介绍单端暂态电压保护原理。线路两端三相均装有阻波器。MN 为被保护线路。这里对故障电压信号进行相模变换,采用两种方式:  $U_2 = U_a - 2U_b + U_c$  和  $U_3 = U_a - U_c$ , 由于前者不能反映 AC 相间短路,后者不反映 B 相接地短路,所以将两种方式结合起来,两者的故障判别输出构成“或”的逻辑关系。下面只以模 2 方式说明保护算法。

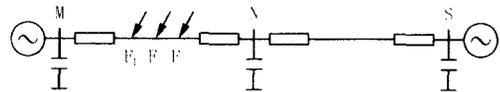


图 1 典型的 500 kV 输电线路

Fig 1 A typical 500 kV transmission line

两端系统参数:

$$Z_{m1} = 1.2857 + j5.6377, \quad Z_{m0} = 2.8764 + j37.1267; \quad Z_{n1} = 1.6714 + j35.5391, \quad Z_{n0} = 4.7 + j37.9784.$$

线路参数:

$$Z_1 = 0.01808 + j0.27747 \text{ /km}, \quad C_1 = 0.012917 \text{ } \mu\text{F/km}; \quad Z_0 = 0.23084 + j0.9728 \text{ /km}, \quad C_0 = 0.0081161 \text{ } \mu\text{F/km}.$$

线路发生故障时,由于在高频下,高压母线的杂散电容呈现较小的阻抗特性,线路阻波器呈现较大的阻抗特性,因此在故障线路测得的电压行波波头较陡,而非故障线路测得的电压行波波头较平缓;另一方面,故障时,杂散电容和阻波器把故障电压中的高频部分限制在故障线路中,流入非故障线路的高频成分大大减少。如图 2(b) 所示,在 MN 中部 A 相电压过峰值发生 AB 两相接地故障时,在故障线路和非故障线路测得的电压频谱图,可见,频率越高,

故障线路和非故障线路的电压频谱差别越大,前者的高频部分比后者的高频部分衰减要慢。

从上面分析可知,故障线路和非故障线路的暂态电压波形的李氏指数有明显差异,前者比后者要小。

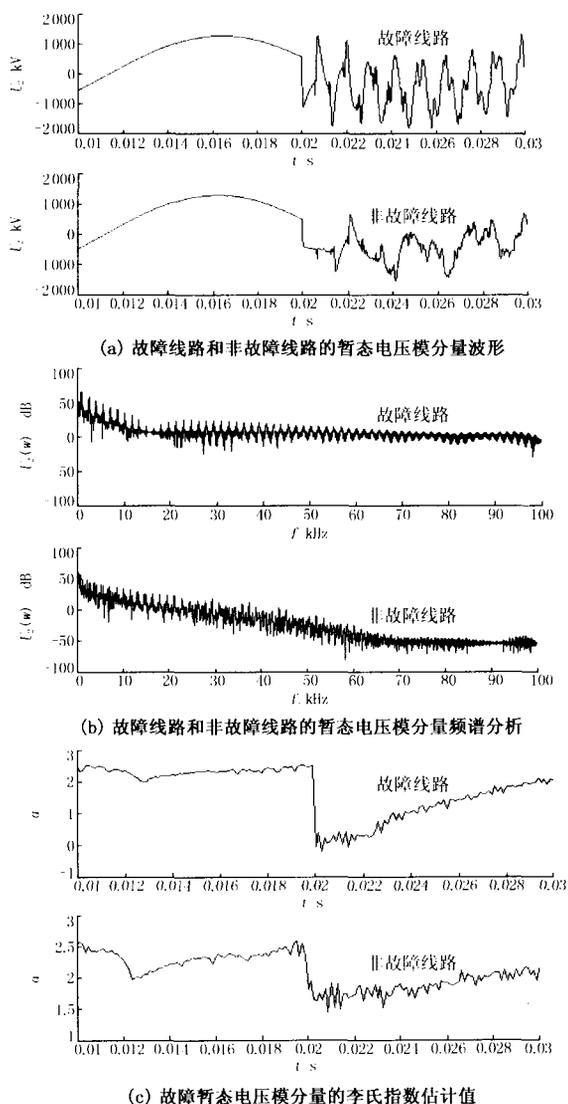


图 2 故障暂态电压模分量的分析  
Fig 2 Analysis of fault transient voltage model components

## 2.2 故障线路判别方法

取故障电压模分量的第 1、2、3 尺度下的模极大值进行电压波形李氏指数估计。实质上这只是对暂态电压模分量的高频部分的奇异性进行估计。图 2(c)显示,故障发生时,故障线路和非故障线路的李氏指数都变小,但故障线路的李氏指数减小到 1 以下,而非故障线路的仍大于 1;随着电压高频暂态分

量的衰减,故障线路电压的李氏指数逐渐上升到 1 以上。

取 1 ms 内电压李氏指数估计值的平均数  $\bar{L}$ ,若  $0 < \bar{L} < 1$ ,则为故障线路,否则为非故障线路。

## 3 仿真结果分析

本文使用图 1 的线路模型进行 ATP 仿真,用 Matlab 进行数据处理。图中 MN 段线路长度为 180 km,NS 段线路长度为 200 km,线路两端均装有阻波器,其中心频带为 [80 kHz, 500 kHz],母线上的杂散电容估计为  $0.1 \mu\text{F}$ 。采样频率为 200 kHz。对线路 MN 不同位置发生单相接地故障、两相接地故障、三相接地故障和相间故障进行仿真,同时对 MN 线路的 M 端保护和 NS 线路的 N 端保护所测得的电压进行李氏指数估计,并进行比较。下面只给出电压的模 2 变换方式的仿真结果。

仿真结果表明,故障线路和非故障线路的暂态电压李氏指数估计值差别很大,而且故障点越远,过渡电阻越大,算法越灵敏。但在初相角接近零点时发生单相接地时,灵敏度有所下降,不过仍能准确判别。

表 1 不同故障类型的仿真结果

( $F_3$  处,过渡电阻为 150  $\Omega$ )

Tab 1 Simulation results of different fault types

( $F_3$  point,  $R_g = 150 \Omega$ )

项目	AG	BCG	ABCG	BC
故障线路	0.148 76	0.054 20	0.060 39	0.045 98
非故障线路	1.855 8	3.081 3	3.114	2.114 3

表 2 不同故障位置的仿真结果

(ABCG,过渡电阻为 150  $\Omega$ )

Tab 2 Simulation results of different fault locations

(ABCG,  $R_g = 150 \Omega$ )

项目	$F_1$	$F_2$	$F_3$
故障线路	0.329 25	0.010 38	0.060 388
非故障线路	2.712	2.121 1	3.114

表 3 不同故障时刻的仿真结果

( $F_1$  处,AG,过渡电阻为 0  $\Omega$ )

Tab 3 Simulation results of different fault time

( $F_1$  point, AG,  $R_g = 0 \Omega$ )

项目	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
故障线路	0.886 67	0.454 7	0.455 23
非故障线路	2.478 7	2.715 9	2.662 3

表 4 不同过渡电阻的仿真结果 ( $F_1$  处, ACG)

Tab 4 Simulation results of different fault resistances

(  $F_1$  point, ACG)

项目	0	150	300
故障线路	0.563 71	0.079 8	0.018 442
非故障线路	2.723 2	2.595 3	2.548 6

#### 4 结论

故障线路和非故障线路的暂态电压奇异性的不同,主要原因是线路阻波器 and 母线杂散电容。本文对故障电压进行小波变换,利用小波模极大值对故障电压的李氏指数进行最小二乘法估计,从而实现单端暂态电压保护。仿真表明,该算法所求得的故障线路和非故障线路的电压李氏指数,在各种故障情况下都有明显差异,动作可靠、准确。

#### 参考文献:

- [1] 薄志谦. 新一代电力系统继电保护——暂态保护 [J]. 电网技术, 1996, 20(3): 34-36  
BO Zhi-qian Transient Based Protection—— A New Generation of Power System Protection [J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 34-36
- [2] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Non-unit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault-generated Noise, Part One: Signal Measurement [J]. IEE Proceedings—— Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 133-140
- [3] Aggarwal R K, Johns A T, Bo Z Q. Non-unit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault-generated Noise, Part Two: Signal Processing [J]. IEE Proceedings—— Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 141-147.
- [4] 哈恒旭,张保会,吕志来. 基于暂态量超高压输电线路无通信保护的研究 [J]. 电力自动化设备, 2000, 20

(4): 4-7.

HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, L ü Zhi-lai Super-pressure Power Transmission Line Non-communication Protection Based on Transient Component [J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 4-7.

- [5] 哈恒旭,张保会,吕志来. 利用暂态电流的输电线路单端量变换新原理探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 56-61.  
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, L ü Zhi-lai 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.
- [6] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998  
CHENG Zheng-xing Arithmetic and Application of Wavelet Analysis [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1998
- [7] 彭玉华. 小波变换与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
PENG Yu-hua Transform and Engineering Application of Wavelet [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [8] 张兆宁,毛鹏. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测 [J]. 继电器, 2000, 28(4): 24-27.  
ZHANG Zhao-ning, MAO Peng Singularity Detection of Fault Transient Signals in Power System with Wavelet Transform [J]. Relay, 2000, 28(4): 24-27.

收稿日期: 2004-05-12; 修回日期: 2004-07-02

#### 作者简介:

陈茂英 (1979 - ), 女, 硕士, 从事微机继电保护方面的研究; E-mail: chenmaoying515@163.com

杨明玉 (1965 - ), 女, 汉族, 从事微机继电保护的教學与研究工作;

张新国 (1954 - ), 男, 副教授, 从事微机继电保护的教學与研究工作。

### Study of a wavelet transform based one-terminal transient voltage signals protection algorithm for EHV transmission line

CHEN Mao-ying, YANG Ming-yu, ZHANG Xin-guo, HU Ju  
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Signal Lipschitz exponent based on wavelet transform is introduced, and a one-terminal transient protection algorithm for EHV transmission lines based on wavelet transform of transient voltage is presented. With the wavelet modulus maxima of one-terminal transient voltage, the Lipschitz exponent of transient voltage signals is estimated by using least square method, then the fault line and non-fault line are distinguished. The simulation results prove that the algorithm can extract and amplify the differences between fault line and non-fault line, and it is reliable and accurate.

**Key words:** one-terminal transient protection; wavelet transform; least square method; Lipschitz exponent