

李氏指数及其在电力系统暂态信号分析中的仿真应用

李先允^{1,2}, 韩 笑², 毛晓华², 陈小虎², 唐国庆¹

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2. 南京工程学院 电力工程系, 江苏 南京 210013)

摘要:在分析电力系统暂态故障信号的奇异性和小波变换奇异性检测基本原理的基础上,得出电力系统暂态故障信号奇异性的特殊性,提出了利用小波变换进行故障暂态信号奇异性检测的方法,并描述了算法的基本思路以及李氏指数的计算步骤。对实际输电系统进行了仿真,通过对暂态故障信号的多尺度分析及各尺度上的信号重构,得出各尺度下的模极大值,从而计算出李氏指数并判断信号奇异性。

关键词:李氏指数; 奇异性; 暂态信号

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0009-04

1 李氏指数信号奇异性检测基本理论

1.1 信号奇异性的基本定义和性质^[1,2]

信号波形上的突变点往往有可供模式识别的丰富信息,因此突变信号的检测具有重要意义。突变信号大体可分为边缘跳变和峰值跳变两类。其中,边缘跳变可视为信号在跳变时刻叠加了一个阶跃函数,而峰值跳变可视为在突变时刻叠加了一个脉冲函数。一般一个函数的突变点可以用其可微性表示。数学上称无限次可导的函数是光滑的或没有奇异性,若函数在某处间断或在某处某阶导数不连续,则称函数在此处具有奇异性。信号发生突变的时刻对应于信号的奇异点,数学上通常采用 Lipschitz 指数 (Lipschitz Exponent, 简记为 L.E.) α 描述其奇异性。

定义 1 设 $0 \leq \alpha \leq 1$, 若存在常数 A 和 $h_0 > 0$, 当 $0 < h < h_0$ 时, 有

$$|f(t_0+h)-f(t_0)| \leq Ah^\alpha \quad (1)$$

则 $f(t)$ 在 t_0 处具有 Lipschitz α 。

Lipschitz 指数 α 给出了信号 $f(t)$ 在 t_0 可微性的精确信息。设 α 为整数, 若 $n < \alpha < n+1$, 则 $f(t)$ 在 t_0 点 n 次可微, 第 n 阶导数在 t_0 点奇异。对 α 为整数的情况, 当 $f(t)$ 在 t_0 点可微, 导数有界但不连续, 其 $\alpha=1$; 若 $\alpha < 1$, 则 $f(t)$ 在 t_0 点奇异。如果 $f(t)$ 在 t_0 点不连续但有界, 则其李氏指数 $\alpha=0$; 白噪声是一个几乎处处奇异的随机分布, 所以它具有负的李氏指数。

1.2 信号奇异性检测^[3~5]

定义 2 设 $f(t) \in L^2(R)$, 若 $f(t)$ 对于任意给定的 t_0 , 小波 $\Psi(t)$ 为具有 n 阶消失矩且 n 次连续可微和紧支集的小波, 有

$$|Wf(s, t)| \leq Ks^\alpha \quad (K \text{ 为常数}) \quad (2)$$

则称 α 为 t_0 点的奇异性指数。

定义 3 设函数 $f: [a, b] \rightarrow R$ 在 $x_0 \in [a, b]$ 是奇异信号, 若 $\alpha_0 < 0$, 称 f 在 x_0 是剧变奇异信号; 若 $\alpha_0 > 0$, 称 f 在 x_0 是缓变信号。

因此, 根据上述定义可知, 被测信号 $f(t)$ 的小波变换值依赖于信号在临域附近的值, 并且尺度 s 愈小, 临域区间愈小, 因此在合适的尺度 s 上, $Wf(s, t)$ 将提供被测信号在 t_0 附近的局部信息特征。

为了检测缓变奇异信号的奇异性, 需选用具有紧支称和足够阶数的消失矩的小波函数, 其定义如下。

定义 4 小波 $\Psi(x)$ 称为具有 n 阶消失矩, 如对所有正整数 $k, 0 \leq k \leq n$ 均有

$$\int_R x^k \Psi(x) dx = 0 \quad (3)$$

由文献[1]得以下 Lipschitz 性质与小波变换的关系、定理。

若小波具有紧支称和 n 阶消失矩, 且 n 次连续可微, n 是一个正整数。设函数 $f \in L^2(R)$, $[a, b] \in R$ 及 $a < n$, 则 f 在 $[a, b]$ 上一致 Lipschitz 的充要条件为: 对任意 $\zeta > 0$ 存在 $A > 0$, 使得对任意 $x \in [a + \zeta, b - \zeta]$ 和 $s > 0$, 总有

$$|Wf(x, s)| \leq As^\alpha \quad (4)$$

设小波 $\Psi(x)$ 具有紧支称和 n 阶消失矩, 且 n 次连续可微, n 是一个正整数, 且若 f 在 x_0 是 Lipschitz, 则存在 $A > 0$, 使得:

$$|Wf(x, s)| \leq A(s^\alpha + |x - x_0|^\alpha) \quad (5)$$

存在 $B > 0$, 使得:

$$|Wf(x, s)| \leq B(s^\alpha + |x - x_0| / |\log |x - x_0||) s > 0 \quad (6)$$

成立, 则 f 在 x_0 是 Lipschitz 的。

由此得出对缓变奇异信号的奇异点的判定方法。

定理 1 设 n 是一个正整数,小波 Ψ 具有紧支的 C^n 函数和 n 阶消失矩,且 n 次连续可微,那么,如果有尺度 $s_0 > 0$ 使得对所有 $s < s_0$ 及 $t \in [a, b]$, $|Wf(x, s)|$ 无局部极大值,则对任意 $\varepsilon \gg 0$ 及 $\alpha < n$, 函数 f 在区间 $[a + \varepsilon, b - \varepsilon]$ 上一致 Lipschitz α 。

该定理说明如果小波变换无局部极大值,在该区间信号非奇异。进一步可以推论, $f(t)$ 非 Lipschitz 的点 t 的闭包,包含在 $f(t)$ 的小波变换模极值点的闭包之内,说明 $f(t)$ 的所有奇异点均可沿小波变换模极值链定位,实际应用中便是用考查小波变换的模极值点得到信号奇异点。从奇异信号在小波变换下的特征分析,可以得出结论:信号小波变换模极值点即是信号的奇异点,而描述信号奇异性 Lipschitz 指数是由沿小波变换尺度的衰减计算。

1.3 奇异点的检测与 Lipschitz 指数计算^[6-8]

对缓变奇异信号 $f(x)$ 在尺度 j 和点 $\{x_0^j\}$ 取得模极大值 $\{W_2^j f(x_0^j)\}$, 奇异点位置的检测算法的基本思想描述如下。

首先,对信号 $f(x)$ 利用小波作离散小波变换,利用 Mallate 算法求出 $\{W(x, j, s, \Psi) | j = 1, 2, \dots, N\}$, 然后求出数据 $\{W(x, j, s, \Psi) | j = 1, 2, \dots, N\}$ 的模极大值 $\{W_2^j f(x_0^j)\}$, 并记录相应的极大值点,则极大值点就是所求的缓变奇异信号奇异点。文献[5]中证明了采用反对称小波时,信号的奇异点较相应模极大值对的过零点在 $2^j (j < 4)$ 尺度上延迟约 $(2^j - 1)/2$ 。这样在尺度 1 上延迟约 0.5 个点,可近似忽略不计。

设信号小波变换在各尺度 j 相应位置处的模极大值可构成序列 $\{\beta_j\} (j = 1, \dots, J)$, 根据 $|Wf(s, t)| \leq A s^\alpha$, 当 $s = 2^j$ 时,

$$\log_2 |Wf(s, t)| \leq \log_2 A + j\alpha \quad (7)$$

式中 $j\alpha$ 项把小波变换的尺度特征 j 与 Lipschitz 指数 α 联系起来。由式(7)建立的小波变换的对数值随尺度 α 或 j 的变换规律可以得出:当 $\alpha > 0$ 时,小波变换的极大值将随尺度 α 的增大而增大;当 $\alpha < 0$ 时,小波变换的极大值将随尺度 α 的增大而减小。

在 j 较小时可近似为

$$\beta_j = |W_{2^j} f(x_0)| \approx A 2^{j\alpha}$$

$$\log_2 \beta_j = \log_2 A + j\alpha, \quad \log_2 \beta_{j+1} = \log_2 A + (j+1)\alpha$$

所以

$$\alpha = \log_2 \beta_{j+1} - \log_2 \beta_j \quad (8)$$

由式(8)可计算出 Lipschitz 指数 α , 其步骤如下所述。

a. 首先,应取得正常情况下的标准信号,计算各尺度下小波变换值,求出标准信号奇异点处 Lipschitz 指数的最小值 $\text{Lip}_{\min}$, 并把 Lipschitz 指数的平均值 Lip_{ave} 作基准值。

b. 求出待测信号奇异处 Lipschitz 指数。

c. 比较 a 与 b 的结果:如果待测值大于基准值,则待测信号正常;如果待测值小于基准值,则说明待测信号在该奇异点处发生异常;如果待测值小于 $\text{Lip}_{\min}$,

则说明信号严重失稳或发生故障。在找出异常点或故障点后,还可进行模式识别。对不同种类的异常和故障,其小波变换模极大值沿各尺度传播情况不同, Lipschitz 指数也会有差别,这些差别需要经过反复实验计算才能求得。

2 故障暂态信号奇异特性检测仿真

为表现电力系统的暂态过程,并突出零序参数对暂态过程的影响,本文利用电力系统仿真模块 (PSB) 对阳城—淮阴 500 kV 输电系统进行数学建模,并进行仿真研究分析。

输电线路接线见图 1, M 侧为阳城侧, N 侧为淮阴侧。假设输电线路的最大传输容量为 600 MW, 串补电容装设于 N 侧, 串补度为 40 %。

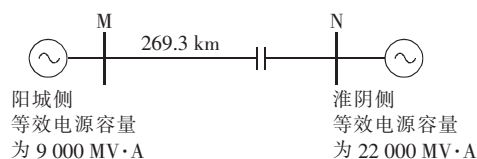


图 1 500 kV 输电系统接线示意图

Fig.1 The wiring diagram of 500 kV transmission system

串补电容的保护回路中金属氧化锌非线性电阻 (MOV) 的伏安特性由一段指数曲线 $I = (U/U_{\text{ref}})^n$ 拟合, U_{ref}, n 根据设计要求由系统参数计算得到。本文取串补电容的保护电压水平 (即保护间隙的击穿电压) $U_{\text{plc}} = 2.3 U_{\text{Nc}}$, 其中 U_{Nc} 为串补电容额定电压峰值, 按满足最大运行方式单回线运行要求确定。取 $U_{\text{ref}} = (3/4) U_{\text{plc}}$, 根据实际参数的计算得 $U_{\text{plc}} = 224 \text{ kV}$, $U_{\text{ref}} = 168 \text{ kV}$ 。根据系统要求, 在故障时, 故障电流应被可靠地限制在 10~24 kA 以下, 本文取保护电流为 10 kA, 从而计算得 $n = 32$ 。

N 侧电源阻抗为

$$Z_{\text{IN}} = 0.816 + j23.60 \Omega, \quad Z_{\text{ON}} = 11.86 + j40.27 \Omega$$

M 侧的电源阻抗为

$$Z_{\text{IM}} = 2.11 + j56.41 \Omega, \quad Z_{\text{OM}} = 28.16 + j134.46 \Omega$$

每回线路的参数为

$$Z_{\text{IL}} = 6.34 + j72.76 \Omega, \quad Z_{\text{OL}} = 57.3 + j222.68 \Omega$$

$$C_1 = 0.0131 \mu\text{F}/\text{km}, \quad C_0 = 0.0081 \mu\text{F}/\text{km}$$

线路的长度为 $l = 269.3 \text{ km}$

电容器的阻抗为 $Z_c = -j29.2 \Omega$

为体现普遍性, 假设故障点离母线 M 的距离为 133 km (线路中段), 选取采样频率为 $f = 200 \text{ kHz}$, 采样计算起始时间为故障前 20 ms, 终止时间为故障后 80 ms。仿真研究时, 存储流过母线 M 侧保护安装处故障电流采样值, 通过计算得到模量电流 $I_m = I_a + I_b - 2I_c$ (I_a, I_b, I_c 分别为 A, B, C 相电流采样值), 然后编制小波变换计算程序对 I_m 进行小波分析。本文选用 Dabuechies (db 5) 小波分析, 它具有正交、紧支以及高阶消失矩, 滤波效果较好。采用 db 5 对超高压输电线路进行仿真, 采用 26 ms 数据窗截取模量电流

I_m ,分析窗内包括故障前 1 ms 和故障后 25 ms 的数据,仿真得出暂态故障信号如图 2(a)所示;对该仿真信号采用 db5 正交小波进行五层分解和重构,图 2(b)为 d_5 尺度上的重构信号。

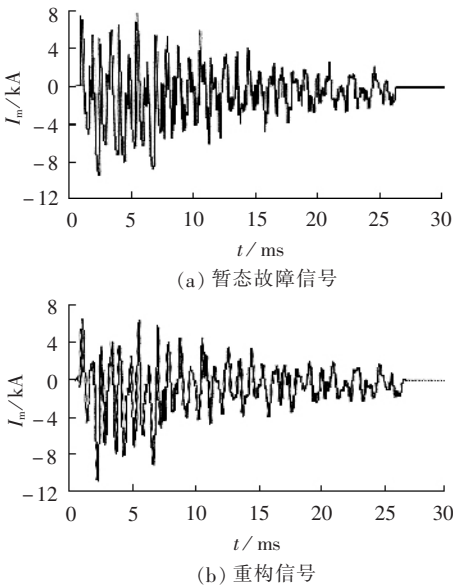


图 2 三相短路时的 I_m 采样波形及重构信号
Fig.2 The sampling signals and reconfigured signals of I_m during three-phase short-circuit fault

图 3 为小波变换后各尺度上的重构信号。由图 3 可以看出故障暂态信号奇异点和小波变换系数极值之间的关系即小波变换系数的模极大值点对应于故

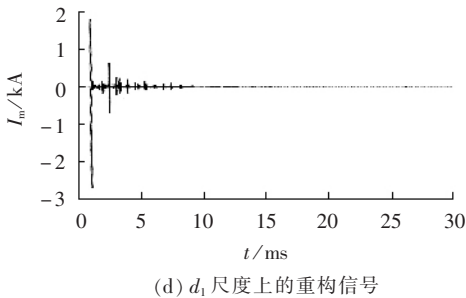
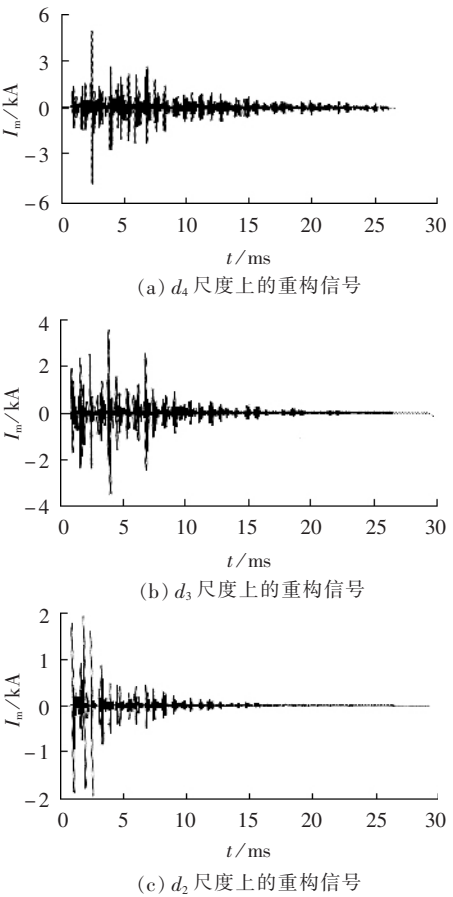


图 3 小波变换分解后各尺度上的重构信号
Fig.3 The reconfigured signals of each scale after wavelet transform

障暂态信号奇异点。与快速傅里叶变换相比较,小波分析可以正确提取出故障时刻,而且边缘效应小得多。

3 结论

a. 通过对故障暂态信号的多尺度分析和在各个尺度上的重构信号,可得出各个尺度下的模极大值 $d_5=64.204\ 9, d_4=47.779\ 4, d_3=35.113\ 0, d_2=19.688\ 8, d_1=18.564\ 3$ 。由此可以得出故障暂态信号李氏指数 $0<\alpha<1$ 。函数的光滑性降低,甚至不连续,则称函数在 t_0 点是奇异的。 α 越小, $f(t)$ 在 t_0 处的奇异性程度越高。lipschitz 指数 α 给出了信号 $f(t)$ 在 t_0 点奇异性即光滑度的精确信息。

b. 基于小波分析的信噪分离可分成两种情况处理,一种是确定性噪声的处理,噪声频率或频率范围可预先确定,这时利用小波变换的滤波特性即可;另一种是不确定性噪声的处理,噪声频率或频率范围不可预知,此时就需要利用小波变换的模极大值特性,它代表了重要信号的特征。

噪声和信号在小波变换下的表现如下:噪声几乎是处处奇异的,在小波变换下,噪声的平均幅值与尺度因数 2^j 成反比,平均模极大值个数与 2^j 成反比,即噪声的能量随尺度的增大迅速减小;信号多数情况下光滑性要好一些,在较小的若干个尺度上,信号的小波变换随尺度的增大幅值不会减小。因此,在不同尺度上设置一定的阈值,阈值以下的小波系数的模极大值可以认为是由噪声引起的,将其置零。本文设定上下浮动的阈值,随着尺度 j 的变大,阈值变成原来的一半,仅用阈值以上的数据重构原始信号,这样既去掉了大部分的噪声,又不至于引起重构结果的明显失真。

c. 如果分解尺度选择不正确,则不能正确提取出故障时刻。由于小波变换对信号的奇异点非常敏感,当信号在某一时刻发生突变时,该信号的小波变换在一定的尺度范围内均会在信号突变处出现峰值,且呈现出与噪声信号截然不同的特性。因此,通过选择合适的尺度范围,可以在强噪声背景下,准确地检测到突变信号。尺度范围的选择与故障暂态信号中所含的频率成分以及采样频率的高低有关系。

如果尺度范围选择太小,则受噪声的影响较大;如果尺度范围选择太大,则信号突变点所对应小波变换的模极大值的幅值衰减较厉害,将使故障点的突变特征不明显甚至消失。

参考文献:

- [1] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643.
- [2] MALLAT S, ZHONG S. Characterization of signals from multiscale edges[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 710-732.
- [3] 张兆宁. 电力系统故障暂态信号分析中的新数学方法研究[D]. 天津: 天津大学, 1998.
ZHANG Zhao-ning. Study on new mathematical methods for power system fault transient signal analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 1998.
- [4] 喻文焕, 金振东, 刘 峡, 等. 信号奇异特性的检测及其应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 20(3): 125-129.
YU Wen-huan, JIN Zhen-dong, LIU Xia, et al. On character detection of a signal and its application [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000, 20(3): 125-129.
- [5] 董新洲, 耿中行, 葛耀中, 等. 小波变换应用于电力系统故障信号分析初探[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(6): 421-424.
DONG Xin-zhou, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong, et al. The application of wavelet transform to power system fault signal analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(6): 421-424.
- [6] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用[J]. *继电器*, 1998, 26(5): 1-4.
DONG Xin-zhou, HE Jia-li, GE Yao-zhong. Application of wavelet transform in detection of fault travelling waves [J]. *Relay*, 1998, 26(5): 1-4.
- [7] 任 震, 黄雯莹, 石志强. 小波分析及其在电力系统中的应用(三)工程应用技术[J]. *电力系统自动化*, 1997, 21(3): 9-12.
REN Zhen, HUANG Wen-ying, SHI Zhi-qiang. Wavelet analysis and applications to power systems Part three: En-

gineering application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, 21(3): 9-12.

- [8] 张兆宁, 毛 鹏, 孙雅明. 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, SUN Ya-ming. Singularity detection of fault transient signals in power system with wavelet transform[J]. *Relay*, 2000, 28(4): 24-27.
- [9] 齐泽锋, 赵瑞娜, 谈顺涛, 等. 基于短时李氏指数的电能质量扰动检测仿真研究[J]. *电力自动化设备*, 2002, 22(1): 29-31.
QI Ze-feng, ZHAO Rui-na, TAN Shun-tao, et al. Detection of power quality disturbance using short-duration Lipschitz exponent [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2002, 22(1): 29-31.
- [10] 胡国胜, 任 震, 黄雯莹. 小波变换在电力系统中应用研究[J]. *电力自动化设备*, 2002, 22(3): 71-78.
HU Guo-sheng, REN Zhen, HUANG Wen-ying. Application of wavelet transform to electric power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2002, 22(3): 71-78.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

李先允(1964-), 男, 安徽亳州人, 副教授, 高级工程师, 博士研究生, 从事电力系统保护与控制、电力电子技术 in 电力系统中的应用、小波分析在电力系统中的应用等领域的教学与研究工作(E-mail: alixy@sohu.com);

韩 笑(1969-), 男, 江苏扬州人, 讲师, 硕士, 从事电力系统继电保护研究;

毛晓华(1957-), 女, 江苏南京人, 副教授, 从事电力系统运行与控制、电力电子技术 in 电力系统中的应用、小波分析在电力系统中的应用等领域的教学与研究工作;

陈小虎(1962-), 男, 河北保定人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事电力系统运行与控制、电力电子技术 in 电力系统中的应用、小波分析在电力系统中的应用等领域的教学与研究工作;

唐国庆(1937-), 男, 上海人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统运行与控制、电力电子技术 in 电力系统中的应用等领域的教学与研究工作。

Lipschitz exponent and its application in simulation of power system transient fault signals analysis

LI Xian-yun^{1,2}, HAN Xiao², MAO Xiao-hua², CHEN Xiao-hu², TANG Guo-qing¹

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: Based on the singularity analysis of transient fault signals in power system and the principles of its detection with wavelet transform, the particularity of the singularity is deduced. An approach to singularity detection for transient fault signals using wavelet transform is put forward, and the idea of the algorithm and the steps of Lipschitz exponent calculation are described. A practical transmission system is simulated. According to the multi-scale analysis of transient fault signals and the signal reconfiguration for each scale, the modulus maximum of each scale is obtained. The Lipschitz exponent is thus achieved to distinguish the singularity.

This project is supported by Natural Science Research Project Foundation of Higher Education of Jiangsu Province(02KJD470006).

Key words: Lipschitz exponent; singularity; transient fault signal