

基于小波变换的窗奇异性指数计算及其在故障检测中的应用

何正友, 钱清泉

(西南交通大学电气自动化研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 小波变换能够充分刻画信号的奇异性, 在探讨奇异信号的小波变换特性的基础上, 克服信号局部奇异性指数计算的难点, 定义了一种基于小波变换的窗奇异性指数。理论信号的分析计算表明, 该窗奇异性指数能够既能表征信号的局部奇异特性, 又具有计算简单快捷的特点。对一实际系统的 EMDC 仿真信号的分析表明, 以该指数作为 EHV 输电线路故障检测判据和区内外故障判别指标, 具有较好的可靠性与实时性, 是电网故障检测和继电保护的一种新颖的有效方法。

关键词: 小波变换; 奇异性指数; 故障检测

中图分类号: TM771

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)03-23-04

1 引言

连续小波变换、离散小波变换或小波包变换等原理或者多种变换的结合, 可实现电力系统暂态信号的检测与分类, 因其变换结果包含有大量的小波分解信息和数据, 通常的检测方法中, 特征提取都少不了人工的干预或对特定工况的假设。而分类方法中, 由于小波分解信息的繁多, 使神经网络、模糊判别等智能判别系统变得庞大。因此, 对小波分解的大量信息还需要研究恰当的善后处理和自动特征提取方法, 也是为分类器提供有效的预处理方法, 确定完备特征空间的特征值, 给电力故障诊断、继电保护等应用提供有效的依据。

信号与图像的奇异性是它们的重要特征, 也是信号和图像分类与识别的重要依据。为了精确标识信号的奇异性, 有必要研究其局部性质。数学上, 这些局部性质可以用 Lipschitz 指数来刻画, 它可以应用于信号的分类与识别^[1]。信号的 Lipschitz 指数能够用它的定义来计算, 然而其计算过于复杂和困难, 且没有考虑到信号不可避免的噪声。信号的小波变换能够充分刻画信号的全局和局部奇异性及不规则性, 由各尺度上的模极大值可计算信号的全局和局部奇异性指数, 这是小波分析应用于信号检测与分类的一种有效后处理方法。然而, 由于模极大值在各尺度间存在偏差, 各尺度模极大值不在严格的一点上; 另外噪声产生的模极大值的过滤剔除中, 阈值的选择较为困难。因此准确计算局部奇异指数变得困难和复杂, 基于此, 定义一种奇异点邻域局部窗上的全局奇异性指数-窗奇异性指数, 来表征信号在该点的奇异程度。这为电力暂态信号, 如雷电、开关操作、弧光非线性电阻引起的暂态区内外故障暂态等

的识别提供了一个量化指标。从而为分类与识别提供了定量的判据。

2 奇异信号的小波变换特性

定义 1: 若 $|f(x) - f(y)| \leq c|x - y|^\alpha$, 则称 $f(x) \in C(R)$, ($0 < \alpha < 1$)

设 $\psi(x)$ 是具有紧支撑的允许小波, 且 $\int_{-\infty}^{\infty} (1 + |x|)^{-\alpha} \psi(x) dx < \infty$ 。在此假设下, 有如下定理

定理 1^[1,2] (a) 若 $f(x) \in C(R)$,

$$\text{则 } |w_2^j f(x)| \leq c 2^{-j(1/2+\alpha)}$$

$$(b) \text{ 若 } |w_2^j f(x)| \leq c 2^{-j(1/2+\alpha)},$$

$$\text{则 } f(x) \in C(R)$$

该定理给出了信号小波变换的整体奇异性刻画。定理要求小波函数满足衰减条件、允许条件和有紧支集, 没有对小波本身的正则性作要求, 因而信号的定义 1 的条件能够用它的二进小波变换的绝对值按照尺度衰减来特征化。另外, 函数的高阶可微能力与它的高阶导数连续能够借助于小波系数的衰减类似地特征化(要求小波函数具有更高阶的消失矩)。同时, 小波变换具有良好的局部化能力, 它能更加有效地刻画信号的局部奇异性。对孤立的奇异点, 小波系数绝对值趋于零的速度小于其邻域小波系数绝对值趋于零的速度, 这表明信号小波变换在该点取得局部模极大值。因而小波变换可以确定信号奇异点的位置和定量描述信号局部奇异性大小。可以证明, 对于调和分布, 其小波变换具有相似的性质^[3] ($-1 < \alpha < 0$)。另外, 白噪声是一个几乎处处奇异的随机分布, 它具有负的 Lipschitz 指数 $\alpha = -1/2 - \epsilon$, $\forall \epsilon > 0$, 白噪声引起的小波变换模极大值与信号引起的小波变换模极大值沿尺度具有不同的传播行为, 这正是小波变换具有去噪能力原因所在。

3 窗奇异性指数定义与计算方法

定义2:对 $f(x) \in C(R)$, 在某一点 x_0 , 定义其加窗奇异指数(窗 Lipschitz 指数)为:以 x_0 为中心, 以 $1/2$ 窗宽 $0.5 \times$ 为半径的窗内信号的全局奇异性指数, 即为 $F(x) = f(x), x \in [x_0 - x, x_0 + x]$ 的全局奇异指数(Lipschitz 指数)。

由奇异信号的小波变换特性可知, 在小波变换域, 信号的光滑程度能够由不同尺度上小波系数绝对值的衰减来估计, 其定量指标即是信号的奇异性指数(Lipschitz 指数)。设小波函数 $\psi(x)$ 满足允许条件、衰减条件, 且具有紧支集, 记 d_k 为在 x_0 点的窗信号离散采样 $c_k^N, (k = 1, 2^N)$ 的小波分解。由定理 1 可知, 求全局奇异性指数的问题变成求最佳的 c 和 α (即最大的 c 和最小的 α), 使得

$$|d_k| \leq c 2^{-j(1/2+\alpha)}, j=1, 2, \dots, M \quad (1)$$

因此, 对 (1) 的求解分以下三个步骤进行:

(1) 求信号的离散小波分解 d_k 及 $d_j^* = \max_k |d_k| > 0$, 问题变为求最佳的 c 和 α , 使

$$|d_j^*| \leq c 2^{-j(1/2+\alpha)}, j=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

(2) 求 $b_j^* = \log_2 d_j^*$, 并记 $b = \log_2 c$, 则不等式组 (2) 变为

$$j(1/2+\alpha) + b_j^* \leq b, j=1, 2, \dots, M \quad (3)$$

(3) 为解不等式组 (3), 令 $j(1/2+\alpha) + b_j^* + \alpha_j = b$, 则 $\alpha_j = b - j(1/2+\alpha) - b_j^*$, 问题变为, 求 α 和 b , 使其满足

$$\min \sum_j \alpha_j^2 = \sum_j [b - j(1/2+\alpha) - b_j^*]^2, j=1, 2, \dots, M \quad (4)$$

运用一次最小二乘法, 可求出

$$\alpha = \frac{\sum_j \sum_j b_j^* - M \sum_j b_j^*}{M \sum_j j^2 - (\sum_j j)^2} - \frac{1}{2}, j=1, 2, \dots, M \quad (5)$$

这就是基于小波变换的信号在 x_0 点的窗奇异性指数。

4 仿真分析

4.1 理论信号分析

实测电力系统及设备故障时, 其电流或电压一般是包含工频基波分量、各次谐波分量、突变暂态分量和一些噪声的混合信号。因此, 为了研究信号奇异性指数在电力设备故障检测中的应用, 首先就电力故障信号中各组成成分的理论信号, 分析计算其基于小波变换的奇异性指数。选择窗内含阶跃信号

$u(t)$, 脉冲信号 $\delta(t)$ 、白噪声信号 $n(t)$ 等奇异信号, 以及电流基波、各整次谐波等理论信号和它们的混合信号作为分析对象, 计算其窗 Lipschitz 指数(局部 Lipschitz 指数有类似的特征和规律)。小波基分别选用了 Haar 小波、Daubechies-4 小波及 B 样条小波等具有不同性质的小波基^[2]。采样频率取为 10kHz, 进行三层小波分解 ($M = 3$)。从分析结果可得出如下几点结论^[4]。

(1) 电流信号的 Lipschitz 指数随谐波次数的增加而减小, 这表明信号变化愈剧烈, 其奇异性指数愈小。但其 Lipschitz 指数始终大于零。

(2) 阶跃信号、脉冲信号以及白噪声信号的 Lipschitz 指数为零或负数, 即信号小波变换的模绝对值随尺度的增加而减小, 这验证了噪声等奇异信号与信号的小波系数随尺度变化具有相反的规律、小波变换具有很好的去噪能力的理论分析结果。

(3) 电流基波及各次谐波信号与噪声混合后、基波与各次谐波混合后, 信号的 Lipschitz 指数均降低, 且高频信号所占的分量愈大, Lipschitz 愈小。

(4) 由于小波分解具有低通滤波器的特性。采样频率为 10kHz, 当进行三层小波分解 ($j = 7$) 时, 滤波后的小波分解已含频率 50Hz 的成分(在不考虑频率混叠的理想情况下), 因此, 实际应用中尺度的选择应保证最大尺度 j 上带通部分的频带在工频以上, 否则在此尺度上与工频的混叠, 影响奇异点的奇异指数的计算。

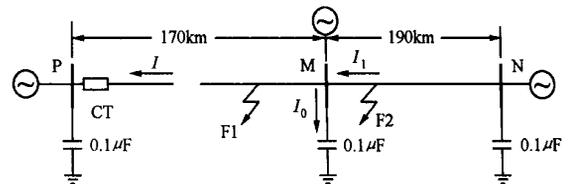


图1 EHV 输电线路简化模型

4.2 EHV 输电线路故障暂态信号分析

在不考虑故障电弧的情况下, 应用 EMTP 对图 1 中 500kV 输电线路进行暂态仿真分析, 且假定母线 P、M、N 对地电容均为 $0.1\mu F$ 。仿真分析 A 相单相接地故障, 采样频率为 $f_c = 20kHz$, 取时间窗 $M/T = 64 \times 0.05 = 3.2ms$, 取该三相线路的零序电流为小波分析对象。大量的仿真验证了本文提出的窗奇异性指数不但能够显著检测故障的发生、定位故障发生时刻, 而且能够分类和识别不同的故障暂态信号, 如区内、区外故障信号。图 2 ~ 图 5 为几组代表性的仿真结果。

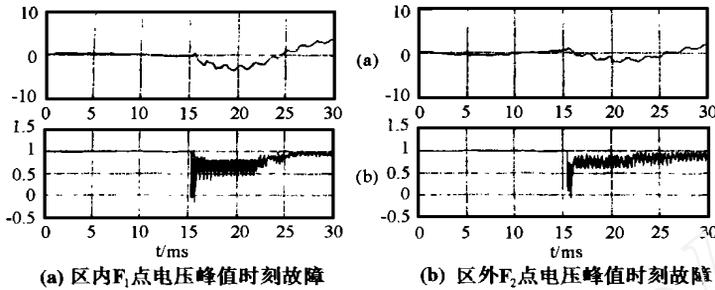


图2 区内/外故障电流奇异性指数计算

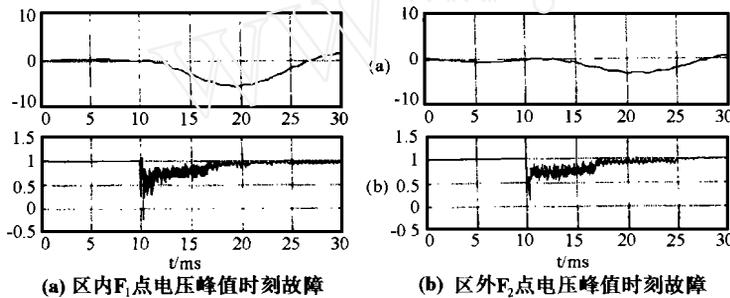
(F_1 、 F_2 距M母1km,故障电阻 $R=0.5$)

图3 区内/外故障电流奇异性指数计算

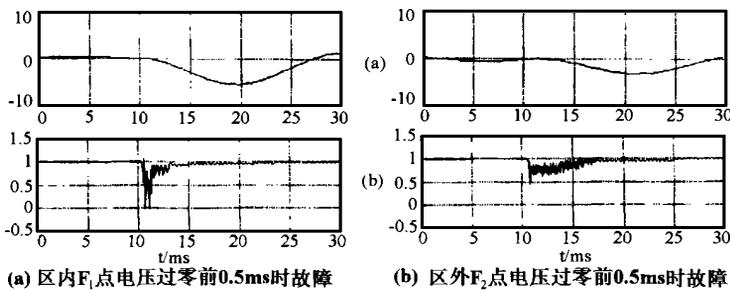
(F_1 、 F_2 距M母1km,故障电阻 $R=200$)

图4 区内/外故障电流奇异性指数

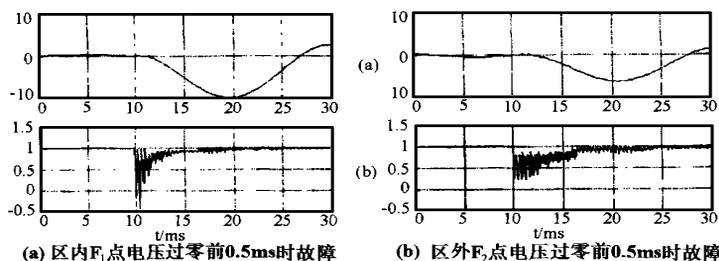
(F_1 、 F_2 距M母1km,故障电阻 $R=0.5$)

图5 区内/外故障电流奇异性指数

(F_1 、 F_2 为线路中点,故障电阻 $R=0.5$)

图2代表电压峰值时A相接地故障,此时产生的电流高频成分较大,无论是 F_1 点故障还是 F_2 点故障,延时一分析时间窗3.2ms后窗奇异性指数均有一突变,以此可以判定故障的发生。另外,从图

2~5中可以看出,对不同的短路时刻、不同的故障点以及高阻故障(200),当故障发生在区内(P-M段)时,故障后奇异性指数值均较小;当故障发生在区外(M-N段)时,故障后奇异性指数比区内故障大,这是由于故障发生在区外时,由于母线对地电容对高频行波暂态的衰减作用,CT检测到的电流高频成分较小,因而奇异性指数较小,这与理论信号的分析结论一致。由此,可以判别故障是否发生在本保护区内。由于实际的超高压线路短路都含有电弧,非线性电弧短路将产生高频暂态电流,基于弧光短路模型,该后处理方法在电压过零时故障的情况对故障的检测和识别也是有效的^[7]。

5 结论

信号的小波变换能够充分刻画信号的奇异性及不规则性,由各尺度上的模极大值可计算信号的局部奇异性指数。由于模极大值的位置在各尺度间存在偏差,以及噪声产生的模极大值的过滤剔除中,阈值的选择较为困难,因此准确计算局部奇异性指数变得困难和复杂,基于此,本文定义了一种奇异点邻域局部窗上的全局奇异性指数,来表征信号在该点的奇异程度。该指数的计算具有简单、快捷的特点,能提取信号局部奇异性,是信号分类识别的重要依据。该指数在超高压输电线路区内与区外故障判别应用中展示了其潜力,具有很好的实时性和有效性,因此基于小波分析的窗奇异性指数作为电力设备或电网故障检测的定量判据或保护判据,是电网故障检测和继电保护的一种新颖的有效方法。

参考文献:

- [1] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1997.
- [2] Daubechies I, Ten lectures on wavelets[M]. CBMS NSF Series in Appl Math. SIAM, Philadelphia, 1991:1~288
- [3] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and procession with wavelets[J]. IEEE Trans On Information Theory, 1992, 38(2):617~643.
- [4] 何正友,钱清泉. 基于小波变换的奇异性指数计算方法及其应用[J]. 电力自动化设备, 2000, (3).

- [5] 郑崇, 韦巍. 基于小波分析的发电机匝间短路故障的智能诊断研究[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(4): 431 ~ 435.
- [6] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [7] 何正友. 电力暂态信号的小波分析方法及其在 EHV 输电线路暂态保护中的应用研究[M]. 西南交通大学博士学位论文, 2000.

收稿日期: 2000-09-05; 改回日期: 2000-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(59977019)

作者简介: 何正友(1970-), 男, 博士研究生, 研究方向为小波分析在继电保护中的应用, 调度综合自动化; 钱清泉(1936-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 牵引动力国家重点实验室主任, 研究领域为信息理论与信号处理、监控及综合自动化。

Wavelet transform based window singularity exponent computation method and its application in fault detection

HE Zheng-you, QIAN Qing-quan

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Wavelet transform can well describe the singularity of signals. Based on the character of wavelet transform for studying singularity signals, a window singularity exponent is defined by overcoming the difficulty of local singularity exponent computation. The theory signals analysis indicated this exponent can describe the local singularity of signals, and its algorithm is fast and simple. By virtue of EMIDC software, the analysis result for the EHV transmission line fault indicated that this window singularity exponent can be a criterion of power system fault detection and discrimination, this is a new and efficient method for fault detection and protection.

Key words: wavelet transform; singularity exponent; fault detection

(上接第 22 页)

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [2] 史世文. 大机组继电保护. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 李鹏, 陆于平. 大型发电机微机式失步保护的研究. 电力系统自动化, 1999(11): 24 ~ 27.
- [4] 李国庆. 电力系统暂态稳定预测控制的研究. 电力系统自动化, 1994: 25 ~ 31.

- [5] Brown R D, McClymont K R. A Power Swing Relay for Predicting Generation Instability. IEEE Trans on PAS, 1965, 84(3): 219 ~ 223.

收稿日期: 2000-08-21

作者简介: 严伟(1975-), 男, 硕士研究生, 目前主要研究方向为电力系统继电保护; 陆于平(1962-), 男, 教授, 主要从事电力系统继电保护, 尤其是主设备保护教学和研究工作; 李鹏, (1975-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护研究和开发工作。

A study on microprocessor-based predictive out of step protection for large generator units

YAN Wei, LU Yurping, LI Peng

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to avoid the problems caused by traditional predictive out of step protection, this paper presents a method to measure the power-angle directly and bring forward an algorithm to predict the variety of power angle. Based on these, a complete microprocessor based predictive out-of-step protection scheme is put forward. The accuracy of the algorithm and the analysis of the error is simulated by using digital simulation. The result shows that the method is more accurate and simpler than those traditional methods. Its clear concept and high accuracy will do good to the predictive out of step protection. Now, the new predictive out of step protection is under developing.

Key words: predictive out-of-step; oscillation; power-angle; autoregression model; protection scheme

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告