

利用小波分析实现 EHV 输电线路暂态保护初探

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: 介绍了连续小波变换定义、基于多分辨分析的 Mallat 快速小波分解算法, 研究了小波在电力系统应用中的几个关键问题。基于输电线路故障暂态电流的特点和暂态保护基本原理, 建立了基于小波变换的暂态保护启动判据和跳闸判据。仿真分析了一实际电网 EHV 输电线路在不同故障点及不同故障时刻该暂态保护方案的可行性。

关键词: 小波分析; Mallat 算法; 暂态保护; 判据

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)08-0001-05

1 前言

在常规继电保护中, 通常是基于提取故障引起的工频信号, 利用工频或稳态分量作为继电保护的启动、闭锁判据, 而故障引起的工频信号和非工频信号是相关联的, 因此只能通过延时来获得工频分量, 这给超高压 (EHV) 输电线路实现速动带来了困难。故障产生的高频信号富含多于工频信号的信息, 如故障的类型、方向、位置、持续时间等, 这些信息贯穿于信号的整个频域, 利用高频分量来实现线路保护的暂态保护技术的提出和应用, 很好地解决了 EHV 线路速动和可靠之间的矛盾。行波保护就是一种典型的暂态保护, 国内外已有相应的产品, 并已得到应用。90 年代初, Johns 等提出了利用陷波器和调谐器检测两个特定带宽内的高频电压信号的无通道高频保护^[1,2], 后来 Z. Q. Bo 等又提出了暂态保护的新概念, 它通过多通道数字滤波技术检测故障产生的高频电流信号, 实现无通道的单端电气量保护, 不需要昂贵的通信费用, 同时也避免了陷波器和调谐器给保护系统带来的复杂性和费用^[3]。因此, 利用单端量的暂态保护在不断发展的超大规模、超高压输电线路保护中具有较好的应用前景, 也是今后相当长时间内继电保护研究的主要方向之一。

然而, 暂态保护技术的实施关键无疑是暂态特征的提取和暂态保护机理的建立, 行波保护运行效果还不是很理想, 其根本原因是故障信息处理的手段落后。90 年代发展起来的小波分析具有可调的时频窗, 恰好在处理非平稳暂态信号等领域具有它独特的优势^[4]; 同时, 小波变换具有类似于 FFT 的快速算法, 因此, 小波分析可望在暂态保护领域得到较好的应用。本文在分析小波变换特点及应用中的

几个关键问题的基础上, 探讨了基于小波分析的单端暂态保护机理, 目的在于研究基于小波分析这一强有力的数学工具的暂态保护实现方案。

2 小波分析的原理和性质

2.1 连续小波变换

如果 $L^2(R)$ 满足“容许性”条件 $C = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty$, 则称 ψ 为一个基小波, 于是 $L^2(R)$ 的信号 $f(t)$ 的连续小波变换 (CWT) 定义为

$$Wf(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

式(1)中: $a, b \in R, a > 0$ 为与频率对应的尺度参数, b 为与时间对应的位移参数, 将尺度参数 a 和位移参数 b 离散, 可得到离散小波变换。

2.2 多分辨分析及小波分解快速算法^[5]

设 $\{V_j, j \in Z\}$ 为一多分辨分析, $L^2(R)$ 中的一闭子空间 V_j (尺度空间) 可以分解为其子空间的直和形式:

$$V_j = W_{j-1} \oplus V_{j-1} \quad j \in Z \quad (2)$$

其中 $L^2(R)$ 为尺度空间 V_j 的尺度函数, 而 W_j 为小波函数 $L^2(R)$ 生成的小波空间, 若 $L^2(R)$ 中的信号 $f(t)$ 在某个子空间 V_N 内, 或可用函数 $f_N \in V_N$ 近似地逼近, 则 $f(t)$ 可表示为:

$$f(t) = f_N(t) = f_{N-M}(t) + g_{N-M}(t) + \dots + g_{N-1}(t) = \sum_{j=N-1}^{N-M} g_j(t) + f_{N-M}(t) \quad (3)$$

在一定的精度下, $g_j(t)$ 是信号 $f(t)$ 的小波展开的有限和, 它代表信号的高频细节成分, $f_{N-M}(t)$ 为信号的低频成分, 它是信号的逼近。按 Mallat 算法, 有下列分解公式:

$$\begin{cases} f_j(t) = \sum_k c(j, k) (2^j t - k) \\ g_j(t) = \sum_k d(j, k) (2^j t - k) \end{cases} \quad (4)$$

设 h_k, g_k 为与尺度函数 和小波函数 对应的二尺度关系序列,即对应低通滤波器 H 和带通滤波器 G 的脉冲响应序列, \bar{h}_k, \bar{g}_k 为共轭滤波器 \bar{H}, \bar{G} 的脉冲响应序列。则有如下的快速小波分解算法:

$$\begin{cases} c(j-1, k) = \sum_l \bar{h}_{l-2k} c(j, l) \\ d(j-1, k) = \sum_l \bar{g}_{l-2k} d(j, k) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 应用中的几个关键问题

2.3.1 采样初始化

Fourier 分析中,对带限信号以二倍于信号最高频率的速率进行采样来实现离散化,这时,离散信号包含了带限信号的所有信息。在小波变换的应用中,常采用离散小波变换的 Mallat 快速算法来计算信号的小波分解系数,这样,离散小波变换的结果与信号在小波基上的理论展开系数存在较大的误差,给诸如时频分析作图、特征信号提取带来一定的困难,因此,有必要在采样信号上加一预滤波器,计算信号在尺度空间 V_N 上的测量值,然后进行 Mallat 快速分解。

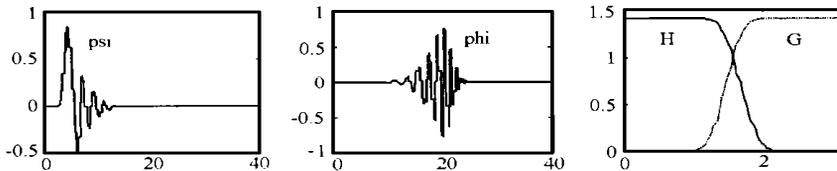


图 1 Db20 小波函数和尺度函数及其对应滤波器

2.3.2 小波基的选择

可用紧支性、对称性、正交性以及正则度等来描述小波基性质,同时,不同的小波基具有不同的时域宽度和频域宽度、时频窗面积等代表局部化能力的性质。在实数域中,紧支、对称、正交的非平凡小波是不存在的,这使得应用中不得不在某些特性上进行折衷,根据不同的应用选用不同的小波基。如小波基的紧支性保证了算法的实时性;对称或反对称小波具有线性相位,用于图像处理可以避免失真,适合于人眼的视觉系统,且边界易于处理;小波基的正交性使小波变换保持能量;小波的正则度越高,其检测信号奇异性的能力越强。小波分析应用于电力暂态信号的特征识别和提取中,暂态信号大多具有非线性相位,可放宽对小波对称性的要求,为尽量减小滤波器产生的混叠,必须采用分频严格的小波,同时小波应具有紧支性。如图 1,本文的分析小波基选

用 20 系数 Daubechies 小波。

2.3.3 小波变换的后处理方法

信号的小波分析包含连续小波变换、离散小波变换、小波包变换等方法,其变换结果包含了信号的各种特征,为实现特征的准确提取和判别,还需要有效的善后处理方法,这是小波分析应用领域必须进一步研究的课题。

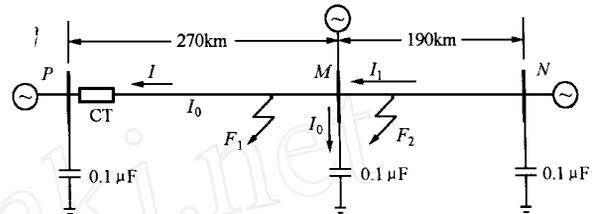


图 2 一实际 EHV 输电线路模型

3 基于小波分析的暂态保护原理

3.1 EHV 线路暂态保护基本原理

如图 2 为一实际的 500kV 输电线路模型,当输电线路发生故障时,系统将产生高频宽带暂态电流行波,电流行波信号从故障点沿线路的正反方向传播,当遇到变电站母线等不连续波阻抗时,部分反射回来,另一部分通过母线传播到下一段,因此,故障电流行波在故障点和母线之间来回反射。目前的研究表明,由于母线对地电容的存在,暂态电流通过母线时将有一定的衰减,且频率越高的成分,衰减越大^[3]。正是基于这一性质,利用单端暂态电流实现暂态保护的区内外故障选择变得可行。如图 2 中,设故障点 F_1 在 $P-M$ 段, F_2 发生在 $M-N$ 段,电流互感器 CT 采集的电流为 I ,当故障发生在 F_2 时,其电流 I_1 通过母线 M 时部分由对地电容流入地,设其为 I_0 ,此时,CT 上检测到的电流为 $I = I_1 - I_0$ 。基于上述原理,故障发生在 $P-M$ 段和 $M-N$ 段,CT 检测到的电流频率成分将会不同,即使是 F_1 点靠近 M 和 F_2 点靠近 M ,其暂态电流也有一定的差别。基于此,我们采用小波分析来检测这种差别,给出保护判据。

3.2 基于小波变换的保护判据

暂态电流的频率受输电线路参数、结构、故障发生时刻、位置、电阻、故障类型等多种因素的影响,用固定频率的滤波器来提取高频成分显然有它的不足,由前面的分析可知,小波变换具有一定的自适应

能力,适合于各频段的信号提取。本文用一固定窗内小波变换系数的平方和对变换结果进行后处理,它表征了某一频带暂态电流在窗内的能量。设小波变换后在 2^{j_1} 和 2^{j_2} 上的能量为 S_{j_1} 和 S_{j_2} ,实际系统中,电流选用模电流 I_m ($I_m = I_a + I_c - 2I_b$) 更能适应故障类型的任意性,则

$$\begin{cases} S_{j_1}(n-T) = \sum_{k=n-M}^n W I_m(j_1, k-T)^2 * T \\ S_{j_2}(n-T) = \sum_{k=n-M}^n W I_m(j_2, k-T)^2 * T \end{cases} \quad (6)$$

$$R = \frac{S_{j_1}(n-T)}{S_{j_2}(n-T)} * k \quad (7)$$

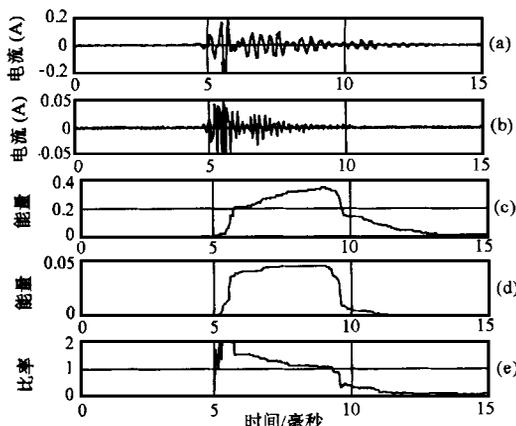
其中 T 为时间步长, k 为衰减系数, M 为窗口采样数。若取 $j_2 > j_1$, 即 S_{j_1} 为高频成分, S_{j_2} 为尺度 j_2 上的低频成分,调整衰减系数 k ,可通过 R 的大小来判别区内和区外故障。由前面的分析,若是区内故障, R 较大,若是区外故障, R 较小。同时,由于故障暂态到达 CT 后,延时一个窗时间 $M \cdot T$, S_{j_1} 和 S_{j_2} 均会有突变,以此可作为暂态保护的启动判据。于是,继电器启动判据和本段保护跳闸判据为

$$\begin{aligned} & \text{启动判据} \{ S_{j_1}(n-T) \geq S_{1set} \} \text{ and} \\ & \{ S_{j_2}(n-T) \geq S_{2set} \} \end{aligned} \quad (8)$$

跳闸判据 $\text{delay}(R > 1)$, delay 表示延时 x ms (9)

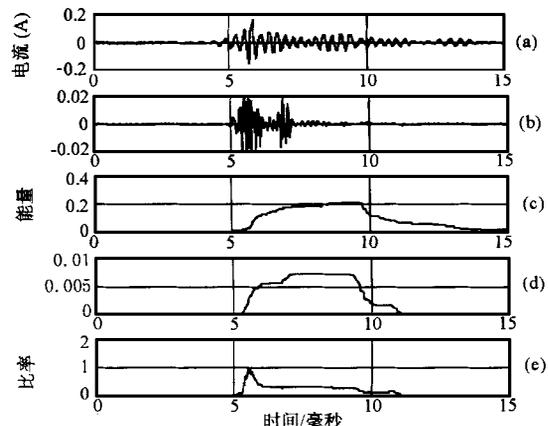
可以看出,与别的保护相比,该保护原理充分利用了小波变换的性质和 CT 可以传变高频电流的特点,无需在线路两端增加任何设备,能够实现全段速动,具有较高的灵敏度和自适应性。

4 仿真分析



(1) 距母线 M13km 的 F_1 点故障

(a) j_1 尺度上分解; (b) j_2 尺度上分解; (c) j_1 尺度上能量; (d) j_2 尺度上能量; (e) 比率 R



(2) 距母线 M13km 的 F_2 点故障

图3 电压峰值 A 相接地故障(故障电阻 200)

图2中输电线路参数为:正序阻抗 $Z_1 = 0.0262 + j0.2862 / \text{km}$,零序阻抗 $Z_0 = 0.1724 + j1.03772 / \text{km}$,线路对地正序电容 $c_1 = 0.0124 \mu\text{F}/\text{km}$,线路对地零序电容 $c_0 = 0.069 \mu\text{F}/\text{km}$,假定母线 P, M, N 对地电容均为 $0.1 \mu\text{F}$ 。仿真分析 A 相单相接地故障,采样频率为 $f_s = 20 \text{kHz}$,取时间窗 $M \cdot T = 2.5 \text{ms}$ 。大量的仿真验证了式(8)和式(9)判据的可行性,图3~6为几组代表性的仿真结果。

图3代表电压峰值时 A 相接地故障,此时产生的暂态电流较大,无论是 F_1 点故障还是 F_2 点故障,在 j_1 和 j_2 尺度上的小波分解系数,延时一分析时间窗 2.5ms 后能量均有一突变,以此可以判定故障的发生。另外,当故障发生在区内 ($P-M$ 段) 时,在相当长一段时间内,两尺度上能量的比值 R 大于 1,当故障发生在区外 ($M-N$ 段) 时, R 值小于 1,由此,式(9)可作为线路保护的跳闸判据,可以判别故障是否发生在本保护区内。图4、图5和图6分别为故障电阻 0.5 、电压过零 0.5ms 、电压过零 0.1ms 以及 F_1 和 F_2 分别为 PM 和 MN 的中点等情况下, A 相接地故障时模暂态电流的小波变换及窗能量。可见,不同的短路时刻、不同的故障点,其窗能量幅值差别较大,但区内、区外故障的区分仍可由 R 值判别。值得注意的是,在个别故障情况下,区外故障初期,仍有一小时间段内 R 大于或接近于 1,故在式(9)的跳闸判据中加入 x ms 的延时,可有效判别区内和区外故障。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^[1,2,3],基于弧光短路模型,该保护机理在电压过零时故障的情况也是有效的,它的仿真研究是我们接下来的研究工作。

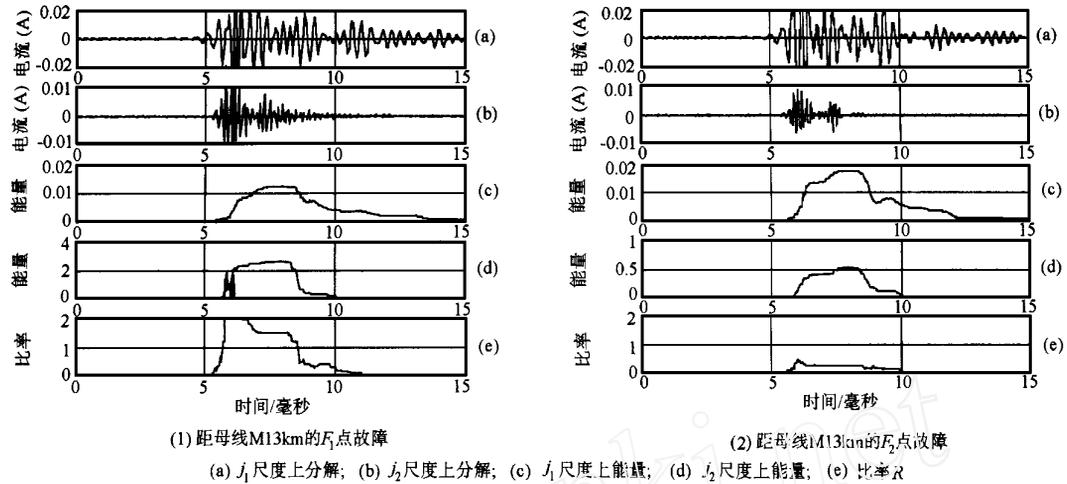


图4 电压过零0.5ms时A相接地故障(故障电阻0.5)

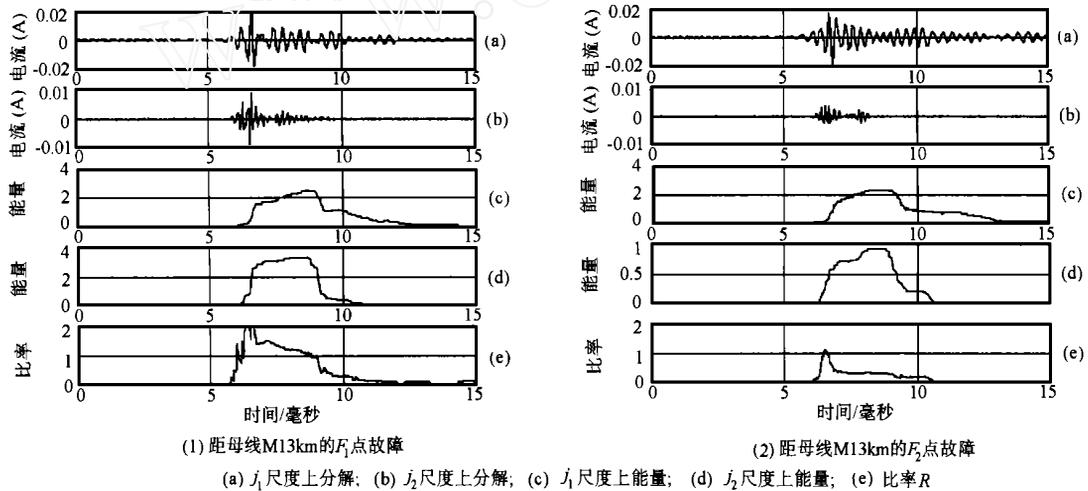


图5 电压过零0.1ms时A相接地故障(故障电阻0.5)

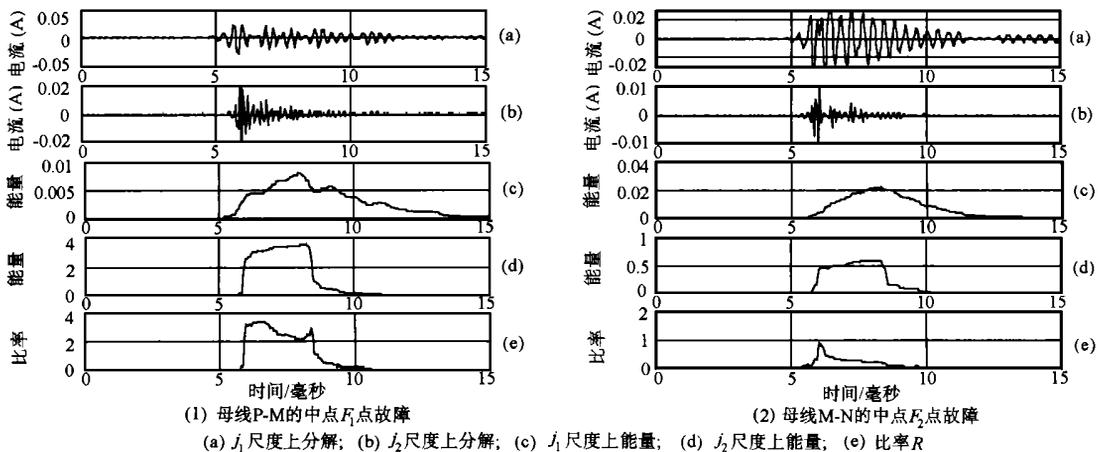


图6 电压过零0.5ms时A相接地故障(故障电阻0.5)

5 结论

结合 EHV 输电线路故障暂态电流的特点,充分

利用小波变换的变焦、滤波、去噪等优良性质,探讨应用小波分析提取暂态电流的宽带高频成分方法的基础上,本文提出了一种利用小波分析实现 EHV 输

电线路暂态保护的思想。基于小波分析的暂态保护判据既能实现故障的检测,又能对区内、区外故障作出选择,该保护机理的实现算法简单,实时性好,它不需要通信通道,既节省了费用,又降低了保护系统的复杂度,提高了可靠性,因而具有较好的实用性。进一步探讨多相故障和非线性弧光短路条件下,该保护机理的可实现性以及更广泛的仿真和实验,是我们将继续的研究工作。

参考文献:

- [1] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. A novel non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise, part 1: signal measurement[J]. IEE Proc - Gener Transm Distrib, 1994, 141(2): 133 ~ 140.
- [2] Aggarwal R K, Johns A T, Bo Z Q. A novel non-unit protection technique for EHV transmission systems based on fault-generated noise, part 2: signal processing[J]. IEE Proc - Gener Transm Distrib, 1994, 141(2): 141 ~ 147.

- [3] Bo Z Q. A new non-communication protection technique for transmission lines[J]. IEEE Trans On Power Delivery, 1998, 13(4): 1073 ~ 1078.
- [4] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. CBMS - NSF Series in Appl. Math. SIAM. Philadelphia, 1992: 129 ~ 214.
- [5] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans On PAMI, 1989, 11(7): 674 ~ 693.
- [6] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76 ~ 80.

收稿日期: 1999-12-28; 改回日期: 2000-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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; 钱清泉(1936-),男,教授,博导,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。

A study about EHV transmission line transient protection based on wavelet analysis

HE Zheng-you, QIAN Qing-quan

(Inst. of Electrification and Automation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The continuous wavelet transform, Mallat fast decomposition algorithm based on multiresolution analysis are introduced. Some key issue about wavelet analysis in application filed are studied. According as the character of transmission line fault transient current, a new transient protection criterion based on wavelet analysis are established. The simulation study of a real system declared the feasibility of protection scheme.

Key words: wavelet analysis; mallat algorithm; transient protection; criterion