

基于小波变换的串补输电线路故障选相研究

黄子俊^{1,2}, 陈允平¹

(1. 武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072; 2. 空军雷达学院,湖北 武汉 430010)

摘要: 串补电容及其保护装置 MOV 的应用给常规的故障定位与选相方法带来了困难。然而,串补输电线路发生故障后以及故障期间 MOV 导通时将产生高频暂态电流行波,故障相和非故障相的暂态电流信号的大小及所包含的频率成分不同。本文采用小波分析方法,选择适当的小波函数与变换尺度对相电流进行小波变换,根据故障相和非故障相的暂态电流在此尺度上小波系数能量的差别,形成故障选相判据。大量的 EMTP 仿真结果证实了该方法的有效性。所提出的方法对串补超高压输电线路的故障定位与保护具有实际意义。

关键词: 串联补偿线路; 小波变换; 故障检测; 选相

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)16-0012-04

0 引言

串联补偿用于高压长距离输电线路中可以提高线路传输容量和系统暂态稳定性,它还具有优化输电线路潮流和降低系统损耗的作用,其应用越来越广泛。然而,串联补偿装置的存在给线路的故障定位与继电保护带来了很大的困难,对常规的故障定位方法提出了挑战。其主要原因是串补电容器设计和应用中考虑到串补装置的过电压保护,普遍采用了具有非线性伏安特性的 MOV。由于非线性 MOV 的存在,使得常规的故障定位方法很难适用于串补线路。然而,若能区分故障类型,则可大大降低故障定位与继电保护的难度。一些用于串补线路的故障定位与保护的算法也要求在精确故障定位之前确定故障类型^[1]。所以,探索一种适用于串补线路的快速而准确的故障检测与分类技术具有实用价值。

输电线路故障后产生的高频暂态信号包含丰富的故障信息。正确识别和提取其中的故障信息,可进行故障的分类与定位^[2~4]。电力系统故障暂态信号属于时变非平稳信号,傅里叶变换由于没有时间分辨特性,难以对其进行充分描述。小波变换最显著的特点是它同时具有时域局部化和频域局部化性质,而且具有可变时频窗。在高频部分时窗变窄,频窗变宽,具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率;在低频部分时窗变宽,频窗变窄,具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率。因此,小波变换是一种多分辨分析,能把分析对象“聚焦”到任意细节,被誉为数学上的“显微镜”。同时,小波变换具有基于多分辨分析(MRA)的快速算法——Mallat 算法。本文将小波变换应用于串补线路的故障检测与选

相,提出了判断故障和选择故障相的方法。

1 小波变换及小波函数

设 L^1 L^2 ,且满足允许性条件:

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$$

则信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为^[5,6]:

$$Wf(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

其中: $\psi(t)$ 称为基小波或母小波(mother wavelet), a 为尺度参数(或伸缩因子), $a > 0$, b 为时间参数。 a, b 可连续变化。式(1)相当于信号 $f(t)$ 通过一传递函数为 $\overline{\psi\left(\frac{\cdot}{a}\right)}$ 的带通滤波器。采用不同伸缩因子 a 分析信号时,各 $\psi\left(\frac{\cdot}{a}\right)$ 的中心频率和带宽都不一样,但品质因数 Q (中心频率/带宽) 却不变。即在低频段的带宽窄,高频段的带宽宽,这是传统的傅里叶变换技术与对它加以改进的短时傅里叶变换技术不能达到的。这个特点使得小波变换是提取信号特征与去噪的有力工具。

若尺度参数取离散序列 2^m ($m \in Z$), 时间参数取为离散值 $n2^m$ ($m, n \in Z$), 则离散二进小波变换定义为:

$$Wf(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_k f(k) \overline{\psi(2^{-m}k - n)} \quad (2)$$

式(1)中的 a 和 b 分别被 2^m 和 $n2^m$ 代替, m 和 n 也称为尺度参数和时间参数。

基于多分辨分析(MRA)的 Mallat 算法^[5]是一种实现离散二进小波变换的快速算法,它把小波函数的构造归结为滤波器系数的设计。Mallat 算法通过一高通滤波器和一低通滤波器将离散序列 $c_0(n)$ 分解为 1 尺度下(对应 $m = 1$) 的小波系数序列

$d_1(n)$ 和逼近系数序列 $c_1(n)$ 。 $c_1(n)$ 又可被分解为 2 尺度下的小波系数序列 $d_2(n)$ 和逼近系数序列 $c_2(n)$, 依此类推。其递推公式如下:

$$c_m(n) = \sum_k \overline{h(k-2n)} C_{m-1}(k) \quad (3)$$

$$d_m(n) = \sum_k \overline{g(k-2n)} C_{m-1}(k) \quad (4)$$

式中 \overline{h} 、 \overline{g} 分别相当于低通滤波器和高通滤波器。每一次分解都将分解信号从零到最高频率的中点划分为小波空间(对应高频段)和尺度空间(对应低频段),每一空间对应一固定频带,利用不同频带的小波变换系数重构不同频带的波形,从而可分析并提取信号特征。

小波函数的选择至关重要,必须根据应用的需要选择合适的母小波。为保障故障处理的实时性,须选择紧支撑小波。本文选择 Coif2 小波,它是紧支撑双正交小波,具有线性相位,其尺度函数和小波函数如图 1 所示。

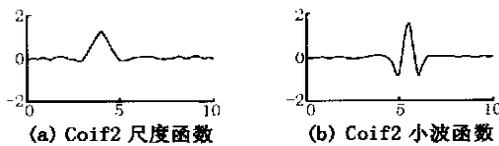


图 1 Coif2 的尺度函数和小波函数

Fig. 1 Coif2 scale function and wavelet function

2 用小波变换判别故障相的基本原理与算法

2.1 基本原理

传输线路发生故障后,线路两端将出现叠加于工频分量之上的高频暂态电压和电流信号。故障期间由于故障相串补电容上电压升高而使 MOV 导通时,也将产生高频暂态电压和电流信号。故障相和非故障相的暂态信号的大小及所含有的频率成分不同。如果能选择适当的小波函数来对某种特定频带进行检测,并分析故障相和非故障相的小波变换在此频率上的不同表现,就可以提取故障特征,获得有效判据。本文的分析信号取单端相电流,采样频率为 1 kHz。利用 Mallat 算法提取各相电流信号在 1 尺度下的小波系数。正常运行时,各相电流中对应该频带的成分很小;发生故障时,非故障相的相电流中,即使其波形在故障时会发生一定程度的畸变,该频带成分也很小,而故障相的相电流中,该频带成分却很大。因此,可据此判别故障相与非故障相。

2.2 故障断定与分类判据

对相电流信号(i_a , i_b , i_c)在固定的时间窗内进行二进小波变换。按下式计算各相电流信号小波变

换 1 尺度下小波系数在固定的时间窗内的小波能量:

$$E_{p1}(n) = \sum_{j=n-N}^n W_{p1}^2(j) \quad (5)$$

式中: $E_{p1}(n)$ 为 p 相电流在 1 尺度下小波系数在时刻 n ,固定的时间窗 $N(N=4)$ 内的能量, p 为相 a, b 或 c, W_{p1} 为 p 相电流在 1 尺度下小波系数。

给定阈值 M 和 k ,则可形成以下判据:

若 $E_{a1}(n)$, $E_{b1}(n)$, $E_{c1}(n)$ 中任一个的值大于给定值 M ,则判断故障发生。

按下式计算电流地模分量:

$$i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3 \quad (6)$$

若地模分量(i_0)的小波变换的模极大值超过给定值,则判断为接地故障;否则为相间故障。

对于接地故障:

a) 若 $E_{a1}(n)/E_{b1}(n) > k$,且 $E_{a1}(n)/E_{c1}(n) > k$,则为 A 相接地故障。

b) 若 $E_{b1}(n)/E_{a1}(n) > k$,且 $E_{b1}(n)/E_{c1}(n) > k$,则为 B 相接地故障。

c) 若 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) > k$,且 $E_{c1}(n)/E_{b1}(n) > k$,则为 C 相接地故障。

d) 若 $E_{a1}(n)/E_{c1}(n) > k$,且 $E_{b1}(n)/E_{c1}(n) > k$,则为 AB 相接地故障。

e) 若 $E_{b1}(n)/E_{a1}(n) > k$,且 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) > k$,则为 BC 相接地故障。

f) 若 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) > k$,且 $E_{c1}(n)/E_{b1}(n) > k$,则为 AC 相接地故障。

g) 若 $E_{a1}(n)/E_{b1}(n) < k$, $E_{b1}(n)/E_{c1}(n) < k$,且 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) < k$,则为三相接地故障。

对于相间故障:

a) 若 $E_{a1}(n)/E_{c1}(n) > k$,且 $E_{b1}(n)/E_{c1}(n) > k$,则为 AB 相间故障。

b) 若 $E_{b1}(n)/E_{a1}(n) > k$,且 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) > k$,则为 BC 相间故障。

c) 若 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) > k$,且 $E_{c1}(n)/E_{b1}(n) > k$,则为 AC 相间故障。

d) 若 $E_{a1}(n)/E_{b1}(n) < k$, $E_{b1}(n)/E_{c1}(n) < k$,且 $E_{c1}(n)/E_{a1}(n) < k$,则为 ABC 相间故障。

3 仿真实验及其结果

3.1 系统模型

仿真系统模型如图 2 所示。MN 为一条 500 kV, 300 km 的输电线路,电路参数如下:

$$\text{首端阻抗 } R_{M1} + jX_{M1} = 1.92 + j191.92$$

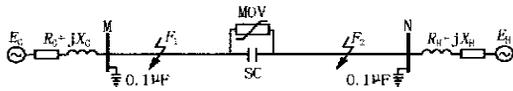


图2 仿真系统模型

Fig. 2 System model for simulation

$$R_{M0} + jX_{M0} = 1.16 + j116.33$$

末端阻抗 $R_{N1} + jX_{N1} = 1.645 + j164.5$

$$R_{NO} + jX_{NO} = 1.33 + j133.33$$

500 kV 线路参数:

$$R_1 = 0.024 \text{ / km}, X_1 = 0.27 \text{ / km}, C_1 = 0.0131 \text{ } \mu\text{F/km}$$

$$R_0 = 0.223 \text{ / km}, X_0 = 0.87 \text{ / km}, C_0 = 0.0081 \text{ } \mu\text{F/km}$$

串补装置位于线路中点,补偿度为 40%, SC = 98 μF, 额定电压为 70.6 kV。MOV 的伏安特性可用以下模型表示:

$$i = (v / v_{ref})^q \quad (7)$$

其中: v_{ref} 是 MOV 的保护电压,指数 q 的取值一般为 30 ~ 50。MOV 保护电压取串补装置额定电压峰值的 2.3 倍,即取 $v_{ref} = 230 \text{ kV}$ 。取 $q = 32$ 。

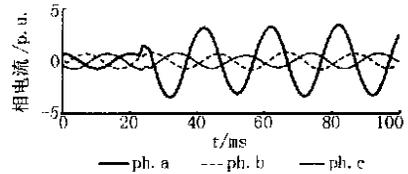
利用上述仿真系统,对各种故障情况以及不同地点短路、不同过渡电阻、不同的初相角等各种短路情况进行了全面的 EMTF 仿真试验。然后,对所取得的相电流数据进行小波变换。限于篇幅,仅给出部分试验结果。

3.2 故障选相仿真结果

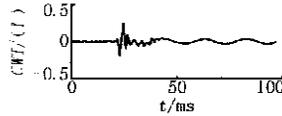
图 3 为距 M 端 50 km 处发生 A 相接地故障(接地电阻为 100 Ω)时的仿真结果。图 3(a)为三相电流波形,纵坐标为标么值,本文的运算全采用标么值。图 3(b)为电流地模分量的小波变换结果。图 3(c)为 A 相电流 1 尺度小波系数的能量。图 3(d)为各相电流的小波能量之比。图 4 表示在不同初相角发生 A 相短路故障时各相电流的小波能量之比的最大值。仿真结果表明,故障期间各相电流的小波能量的比值有明显的差别。由仿真结果确定的阈值分别为 $M = 0.1, k = 50$ 。根据仿真结果可得: $E_{a1} > M, CWT(I_0) > M$, 且 $E_{a1}(n) / E_{b1}(n) > k, E_{a1}(n) / E_{c1}(n) > k$, 所以,判断为 A 相接地故障。由于采用标么值进行运算,运算结果不受系统参数的影响,阈值的选取不依赖于仿真系统。

表 1 接地电阻不同时小波能量的比值

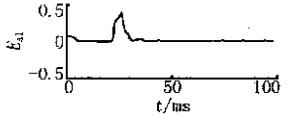
接地电阻/	0	10	20	50	100
E_{a1} / E_{b1}	129.8	139.1	147.5	166.5	235.5
E_{a1} / E_{c1}	123.6	133.6	143.5	171.3	208.9
E_{b1} / E_{c1}	5.3	5.3	5.3	5.9	7.7



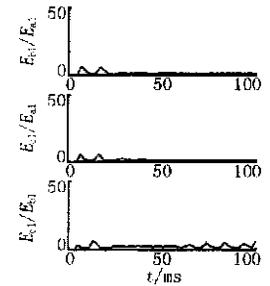
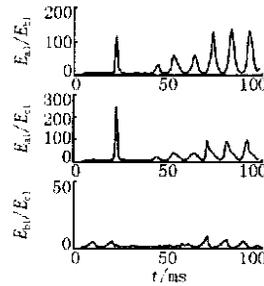
(a) 三相电流波形



(b) 电流地模分量的小波系数



(c) A 相电流 1 尺度小波系统的能量



(d) 各相电流的小波能量之比

图 3 A 相接地故障的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of a A-g fault

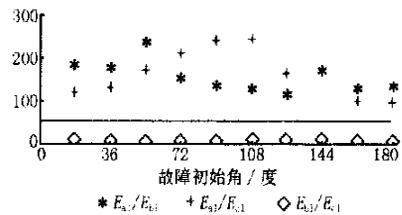


图 4 故障初始角不同时各相电流的小波能量之比值

Fig. 4 Ratios of wavelet energies with inception angle influence in A-g faults

表 1 给出了 A 相分别经接地电阻为 0, 10, 20, 50, 100 Ω 短路接地时各相小波能量的比值。从表中可以看出,选相结果不受接地电阻的影响。

图 5 为距 M 端 150 km 处发生 AB 相间短路故障(短路电阻为 50 Ω)时的仿真结果。图 5(a)为电流地模分量的小波变换结果。图 5(b)为 A 相电流 1 尺度小波系数的能量。图 5(c)为各相电流的小波能量之比。根据仿真结果可得: $E_{a1} > M, CWT(I_0) < M$, 且 $E_{a1}(n) / E_{c1}(n) > k, E_{b1}(n) / E_{c1}(n) > k$, 所以,判断为 AB 相间短路故障。

表 2 给出在不同初相角发生 AB 短路故障时各相电流小波能量的比值的峰值。从表中可以看出,相电流小波能量的比值对不同初相角不很敏感。因此,可以认为相电流小波能量的比值基本不受初相角的影响。

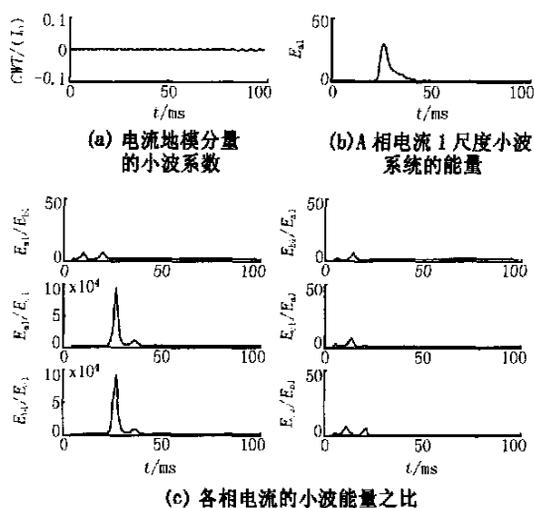


图5 AB相短路故障的仿真结果

Fig.5 Simulation results of a AB fault

表2 不同初相角时的小波能量比值

Tab.2 Ratios of wavelet energies at different initial phase angles

初相角/ (°)	36	72	108	144	180
E_{a1}/E_{c1}	1.2×10^4	1.4×10^4	8.7×10^4	2.4×10^4	2.5×10^4
E_{b1}/E_{c1}	1.1×10^4	1.3×10^4	8.7×10^4	2.4×10^4	2.5×10^4
E_{a1}/E_{b1}	5.8	2.8	5.7	5.8	5.8

4 结论

本文提出了一种基于故障暂态电流信号与小波变换的故障检测与选相的方法。该方法直接利用相电流信号进行小波变换,并提出了一种新判据。经仿真试验证明,此新判据基本不受故障类型、过渡电阻、初相角和故障点位置的影响,可以即时判明故障相别。此外,本文提出的方法具有算法简单、检测准确、抗干扰能力强、易于实现的优点,具有较好的应用前景。该方法对普通线路和串补线路同样适用。

Study of fault phase selection for series compensated transmission lines based on wavelet transform

HUANG Zi-jun^{1,2}, CHEN Yurping¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Air Force Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract: The application of series compensated capacitors and their MOVs cause difficulties for conventional methods of fault location and phase selection. However, high frequency transient currents will appear in the lines when a fault occurs and the MOV conducts. The fault phases differ from nonfault phases on the amplitudes and frequencies of the transient currents. In this paper, wavelet analysis method is used to analyse phase currents with the proper wavelet function and proper scale. The criteria of fault phase selection are made based on the differences in energies of wavelet coefficients of all phase currents. Plenty of EMIP simulations proved that the method is effective. The scheme given in this paper has practical value in the fault location and relay protection of series compensated transmission lines.

Key words: series capacitor compensation; wavelet transform; fault detection; fault phase selection

参考文献:

- [1] Saha M M, Izykowski J, Rosolowski E, et al. A New Accurate Fault Locating Algorithm for Series Compensated Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 789-797.
- [2] 危韧勇,刘春芳(WEI Rennyong, LIU Churfang). 基于小波理论的超高压输电线路故障定位与选相方法(A Approach of Fault Location and Fault Phase Selection in UHV Power Transmission Line Based on the Wavelet Theory) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(5): 85-88.
- [3] HUANG Zi-jun, CHEN Yong-ping, GONG Qing-wu. A Protection and Fault Location Scheme for EHV Line with Series Capacitor Based on Travelling Waves and Wavelet Analysis [A]. IEEE-PES/ CSEE International Conference on Power System Technology Proceeding, Kunming:2002. 290-294.
- [4] Fernando H M, Abur A. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [5] Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [6] Mallat S, HWANG Werr-liang. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

收稿日期: 2003-12-10; 修回日期: 2004-03-24

作者简介:

黄子俊(1964-),男,副教授,博士研究生,研究方向为故障定位,小波分析在电力系统中的应用; E-mail: zjhuang555@163.com

陈允平(1945-),男,教授,博士生导师,从事电力系统运行与控制、柔性电力系统、继电保护的理论与应用研究。