

# 基于 FWT 的在线检测介损角的计算

胡学军, 谈宏华

(武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**基于多分辨分析的快速小波变换(FWT)原理,及其在电力系统在线检测装置计算绝缘介质损耗时的检测数据的分析原理和方法,并将小波变换和FFT这两种分析方法进行了比较,仿真结果表明对瞬时干扰和白噪声有很好的滤波效果,其误差也较为平滑。

**关键词:**多分辨分析;FWT;介质损耗;相关分析

**中图分类号:**TM 835.4 **文献标识码:**A

## 0 引言

状态检测在电力系统中得到了越来越广泛的重视和应用,电力设备绝缘在线检测装置就是其中的一种。该装置通过检测设备的电流和电压,计算出设备绝缘的介质损耗角。其数据的处理方法经过过零比较法,发展到快速傅立叶变换FFT。

经过多年的实际运行表明,FFT处理数据的准确性和稳定性不尽人意。考虑到现场的电磁和其他干扰,所采集的信号含有大量的噪声。因此,为确保测量的准确度,文献[1]和文献[2]采用小波变换对信号的消噪处理进行了研究。本文采用多分辨分析,选用DB小波对测量数据进行处理,并将之与FFT滤波进行比较。

## 1 小波变换

信号的消噪处理是小波变换的一个重要应用。电力检测装置所采集的电流、电压多为50 Hz的低频分量,高频分量为噪声,故采用小波变换对信号进行多层次分解,得出小波系数进行阈值处理后再进行信号的重构,既可去除信号中的噪声而保留真实信号。

### 1.1 小波分解

基于多分辨分析的理论,MATLAB给出了快速小波变换(FWT)的算法。对于一个多分辨分析 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ , $\varphi$ 和 $\psi$ 分别为相应的尺度函数和小波函数,函数 $f$ 属于由尺度函数 $\varphi$ 生成的基本子空间 $V_0$ 。它可表示为:

$$C_k^0 = \langle f, \varphi(\cdot - n) \rangle = f_k \quad (1)$$

$$d_n^m = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_{k-2n} C_k^{m-1} \quad (2)$$

$$C_n^m = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{k-2n} C_k^{m-1} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

其中:

(1) $h_k$ 是多分辨分析的尺度函数, $g_k$ 是多分辨分析的小波系数,两者的关系是 $g_k = (-1)^n h_{2k+1-n}$ , $k \in \mathbb{Z}$ 。

(2) $d_n^m$ 和 $C_n^m$ 分别是函数 $f$ 在第 $m$ 层尺度上的小波分解系数和尺度逼近系数。

(3)在实际应用中,取离散采样系列 $f_k$ 为展开系数 $C^0$ 。

分解过程如图1所示。

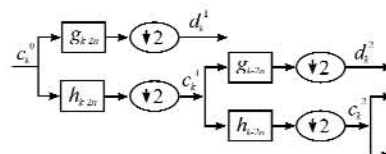


图1 小波分解图

Fig. 1 Wavelet decomposition

### 1.2 小波分解高频系数的阈值量化

图1的分解过程中, $d^1, d^2, \dots$ 和 $C^1, C^2, \dots$ 对应信号小波分解的高频系数和低频系数。信号中的噪声通常包含在高频部分,而有用信号则处在低频部分。因此,将各尺度上由噪声产生的小波谱分量选择一个阈值就可进行量化处理。本文将高频系数的阈值设置为0,即将 $d^1 \dots d^m$ 全置0,用以消除高频分量。

### 1.3 信号的重构

在将高频系数置0处理后,保留的小波谱基本上基波分量为低频 $\sim 50$  Hz的有用信号的小波谱。在此基础上,再利用小波变换的重构算法重新构造原信号,就可得到去噪后的信号。重构算式如

下:

$$C_n^{j-1} = \sum_k p_{n-2k} C_k^j + \sum_k q_{n-2k} d_k^j \quad (4)$$

信号重构示意图如图2所示.

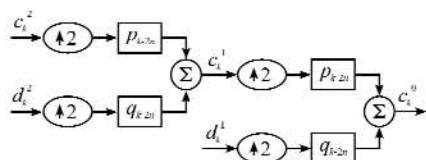


图2 小波重构示意图

Fig. 2 Wavelet reconstruction

Smy小波是db小波的一种改进,使之具有近似对称的特性,而且它的分解和重构滤波器具有近似线性相位特性,并且介损损耗的测试在理论上最终可以归结为计算电压信号和电流信号的相位差,即所谓的介质损耗角,所以本文选择Smy小波.

## 2 介质损耗角的计算方法

### 2.1 傅立叶变换

若信号 $x(n)$ 的采样点数为 $N$ ,则它的离散傅立叶变换为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jkn(2\pi/N)} = a_k + ib_k \quad (5)$$

这里, $x(1)$ 为信号的基波分量,它的初相为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (6)$$

则电压和电流的初相之差既为介质损耗角(考虑到在角度很小的情况下, $\tan\delta = \delta$ ).

### 2.2 相关分析

基于不同信号不相关原理,若两信号的噪声频谱不重叠,则信号中的噪声对测量结果不会产生影响;否则,会带来误差.

经小波去噪后的电压、电流信号为 $\sim 50$  Hz的有用信号,即有:

$$U_1(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) \quad (7)$$

$$I_1(t) = B \sin(2\pi ft + \theta + \delta) \quad (8)$$

其中, $U_1(t)$ 、 $I_1(t)$ 分别为基波电压和电流信号.

设 $k$ 为信号整数倍周期内的采样点数,则 $U_1(t)$ 和 $I_1(t)$ 的互相关函数 $R_{U_1 I_1}(\tau)$ 当 $\tau=0$ 时的离散计算式为

$$\hat{R}_{U_1 I_1}(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} U_1(n) I_1(n) = \frac{AB}{2} \cos\delta \quad (9)$$

当 $\tau=0$ 时 $U_1(t)$ 自相关函数 $R_U(\tau)$ 的离散计算式为

$$\hat{R}_U(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} U_1^2(n) = \frac{A^2}{2} \quad (10)$$

同样, $I_1(t)$ 有

$$\hat{R}_I(0) = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} I_1^2(n) = \frac{B^2}{2} \quad (11)$$

从而可得:

$$\tan\delta = \sqrt{\frac{\hat{R}_{U_1 I_1}(0) \hat{R}_I(0)}{\hat{R}_{U_1}(0)^2}} - 1 \quad (12)$$

$$\delta = \arccos\left[\frac{2\hat{R}_{U_1 I_1}(0)}{(\sqrt{2\hat{R}_U(0)} \cdot \sqrt{2\hat{R}_I(0)})}\right] \quad (13)$$

## 3 仿真分析

### 3.1 小波滤波

小波选用sym8小波,分解层次为6层.设原信号为

$$x(t) = \sin(2\pi ft) + 0.6\sin(6\pi ft) + 0.1\text{randn}() \quad (14)$$

信号毛刺为

$$x(\pi/2) = x(\pi/2) | 1 \quad (15)$$

$$x(3\pi/2) = x(3\pi/2) - 1 \quad (16)$$

若一个周期的采样点数为1024个点,则采用小波滤波后的情况如图3所示.

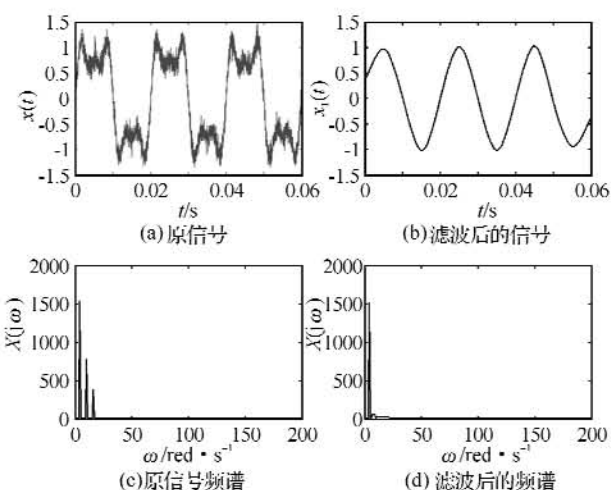


图3 小波滤波仿真图

Fig. 3 The simulation of wavelet filter

由图3可见,小波变换对瞬时干扰和白噪声有很好的滤波效果.

### 3.2 FWT与FFT的比较

设电压、电流信号为:

$$\begin{aligned} u(t) &= \sin(2\pi ft) + 0.5\sin(6\pi ft) + \\ &\quad 0.25\sin(10\pi ft) + m * \text{randn}() \\ i(t) &= \sin(2\pi ft + \theta) + 0.5\sin(6\pi ft + \theta) + \\ &\quad 0.25\sin(10\pi ft + \theta) | m * \text{randn}() \end{aligned}$$

取 $\theta = 0.01\pi$ ,  $m = 0.5$ ,按上述两种计算方法仿真如图4所示.

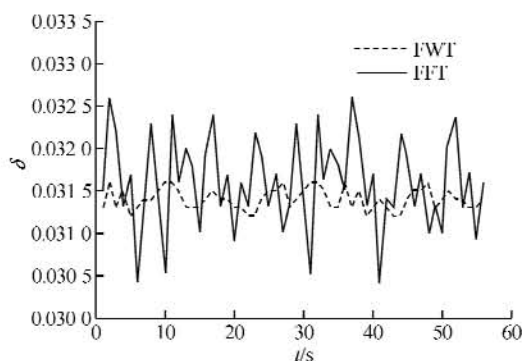


图 4 FFT 与小波计算介损角的比较

Fig. 4 Comparison between FFT and wavelet for dielectric loss angle

由图 4 可见:

- (1) 采用小波变换, 介质损耗角的误差较小.
- (2) 采用小波变换, 介质损耗角的波动也较小.

#### 4 结 语

采用基于小波变换的数据处理技术, 对在线电力检测装置所测数据进行滤波处理, 提高了测

量的准确度和稳定性, 克服了采用傅立叶变换的介质测量仪准确性低的缺点. 该技术非常适用于工作在强干扰环境下的测量装置的数据处理.

参考文献:

- [1] 覃华, 刘云鹏, 律方成. 小波变换在局部放电在线检测抗干扰中的应用[J]. 电力科学与工程, 2003, (3): 45-46.
- [2] 刘金琪, 李玉华, 伊和斌. 基于小波变换的脉冲信号在线检测器设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, (5): 62-63.
- [3] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [5] 胡昌华. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [6] 徐国庆, 张彦铎, 王晖. 基于多分辨率分解的乐音水印算法实现[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(2): 91-93.

## Calculation of dielectric loss angle for on-line measurement based on FWT

HU Xue-jun, TAN Hong-hua

(School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This article introduces the principle of fast wavelet transformation (FWT) based on multi resolution analysis and discusses how to use its principle to deal with the data of dielectric loss angle measured by the on-line power monitoring device. On these bases, a comparison between wavelet transformation and FFT was made. The results of simulation show that the wavelet transformation has a better filtering effect on the instantancous disturbance and white noise. Besides, the error is also comparatively smooth.

**Key words:** multi-resolution analysis; FWT; dielectric loss; correlation analysis

本文编辑: 陈晓革