

小波变换在电能质量分析中的应用

王建赅, 纪延超, 冉启文, 柳焯

(哈尔滨工业大学电气系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

【摘要】 针对电力系统暂态信号分析提出了一种基于小波变换的解析信号分解方法。该方法将小波变换的时频局部性与解析信号关于信号相位及瞬时频率的描述相结合, 可提取暂态信号的奇异点及各尺度分量的幅值包络、相位、瞬时频率等特征信息, 为电能质量分析提供了更加丰富的依据。

【关键词】 电能质量; 小波变换; 解析信号

1 引言

近年来, 电能质量问题逐渐引起了人们的重视。这一方面是由于电力电子器件和非线性设备的广泛应用使得电网中电压和电流波形畸变越来越严重, 造成了电能质量的恶化。另一方面是由于工业自动化水平的提高, 微处理器和 PLC 等智能器件越来越多地应用于工业过程控制, 而这些精细过程控制更容易受到电力系统扰动的影响, 因此对电能质量提出了更高要求。

电能质量问题主要包括两方面的内容, 一是已得到普遍关注的谐波畸变问题, 二是电力系统发生故障及投切操作时所伴随的暂态现象^[1], 如电压瞬变、冲击和中断等。对于谐波的检测方法已有许多文献进行了深入研究, 其中主要是基于快速傅立叶变换(FFT)及其改进算法。另外还包括最小二乘估计、卡尔曼(Kalman)滤波、时间序列分析及神经网络等方法^[2]。但是对于电力系统中的暂态现象至今还没有比较统一有效的方法来描述。

小波变换作为一种新兴的时频分析方法, 已有文献将其应用于电能质量分析, 但并未对小波分解后的结果进行深入研究^[3]。本文提出了一种基于小波变换的解析信号分解方法。该方法采用为改善小波变换分频特性而构造的哈密小波作为小波基函数, 并且将解析信号方法引入小波变换, 使得信号在按尺度参数所对应频带展开的同时可进一步得到信号在该尺度上分量的幅值包络、相位、瞬时频率及信号的奇异点等信息。文中利用该方法对电力系统中投切电容器所造成的暂态电流波形进行分析, 结果表明该方法具有良好的分析效果。

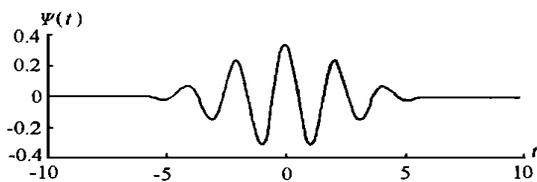
2 哈密小波

基于小波变换的时频局部性已有文献将其应

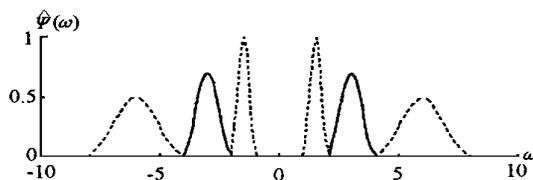
用于电力系统暂态波形分析, 但是对信号进行小波变换时各尺度之间的频域‘混叠’现象, 造成小波变换分频不严格影响分析效果^[4]。为此本文采用哈密小波作为小波基函数以改善小波变换分频特性, 其时域和频域表达式为式(1)、式(2)。波形如图1所示^[5]。

$$\psi(t) = \frac{1}{2} \{ 2.16 \operatorname{sinc}(t) \cos 3t - 0.92 [\operatorname{sinc}(t + \pi) \cos(3t + \pi) + \operatorname{sinc}(t - \pi) \cos(3t - \pi)] \} \quad (1)$$

$$\hat{\psi}(2^{-j} \omega) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos[2(2^{-j} \omega)] & [-2^{j+1}, -2^j] \quad [2^j, 2^{j+1}] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$



(a) 哈密小波的时域波形



(b) 哈密小波的频域波形

图1

由图1可见哈密小波是频域紧支的, 可达到分频严格, 进行二进频带分割时不会出现‘混叠’现象。且此小波具有线性相位, 在通频带内不会产生相位失真。

3 解析信号

现实中的各种信号都是实的, 引入解析信号的

目的主要是为了准确地描述信号的幅值和相位,并且可由相位进一步得到信号的瞬时频率。

设 $x(t)$ 为任意实信号,则其对应解析信号为

$$s(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (3)$$

其中实部为原信号 $x(t)$,虚部 $\hat{x}(t)$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{t} * x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (4)$$

符号‘ $*$ ’代表卷积。在离散情况下可以借助快速傅立叶变换(FFT)来求取解析信号 $s(t)$ [6]。

由式(3)知解析信号可以表示为

$$s(t) = A_s(t) \exp[i\phi_s(t)] \quad (5)$$

其中 $A_s(t)$ 、 $\phi_s(t)$ 分别为解析信号的幅值和相位。并且由解析信号的相位可以定义信号的瞬时频率:

$$\nu_s(t) = \frac{1}{2} \frac{d\phi_s}{dt} \quad (6)$$

即将信号的瞬时频率定义为解析信号相位的导数。应该指出目前瞬时频率的定义并不唯一,而且各种定义方法对信号的解释都存在悖论,这里的瞬时频率定义是一种比较自然和常用的方法,且用这种方法定义瞬时频率,其能量密度的时间平均就是平均频率[3]。可见,解析信号它给出了信号的幅值包络和相位及瞬时频率描述。

4 解析信号的小波变换

应该指出对于多分量的解析信号,其幅值、相位及瞬时频率不再具有良好的物理解释其结论甚至是荒谬的。小波变换具有时频局部化特性,可以将同时包含低频和低频成分的暂态信号按尺度参数所对应的频带依次划分开来,这样将低频成分和高频成分分开处理,再结合解析信号的特点有望得到良好的分析效果,经证明解析信号的小波变换在各个尺度上的结果仍然是一个解析信号。

设信号 $x(t)$ 的解析信号为 $s(t)$,由式(3)可知 $s(t)$ 的小波变换为

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \left[\frac{t-b}{a} \right] dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \left[\frac{t-b}{a} \right] dt + \frac{j}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(t) \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \quad (7)$$

易见,式(7)中第一项为信号 $x(t)$ 关于 a, b 的小波变换记为 $W_x(a, b)$,可以证明第二项为 $x(t)$ 在

尺度 a 下小波分解对参数 b 的希尔伯特变换。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(t) \left[\frac{t-b}{a} \right] dt = \\ & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \frac{1}{\tau-\tau'} d\tau' \right] \left[\frac{t-b}{a} \right] dt = \\ & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau-\tau'} \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \right] d\tau = \\ & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau-\tau'} \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \right] d\tau \\ & \text{令 } t-b = \tau-u \\ & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau-u} \frac{1}{b-u} du \right] d\tau \\ & \text{令 } u = \tau \\ & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau-u} \frac{1}{b-\tau} d\tau \right] d\tau = \\ & \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{b-\tau} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\frac{\tau}{a} \right] d\tau \right] d\tau = \\ & \frac{1}{b-\tau} \left[\frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\frac{\tau}{a} \right] d\tau \right] d\tau \quad (8) \end{aligned}$$

由式(7)和式(8)可知

$$W_s(a, b) = W_x(a, b) + jW_x(a, b) \quad (9)$$

其中 $W_x(a, b)$ 为 $x(t)$ 依赖于参数 a, b 的小波变换, $W_x(a, b)$ 为 $x(t)$ 在尺度 a 下小波变换对参数 b 的希尔伯特变换。由此可见解析信号小波变换的结果仍然是解析信号,因此解析信号的性质对其同样适用。

解析信号的一个重要特点是其频谱呈单边特性,即

$$S(\omega) = \begin{cases} 0 & \omega < 0 \\ 2X(\omega) & \omega > 0 \end{cases} \quad (10)$$

可见解析信号在正频域除了相差常数 2 以外具有和原实信号完全相同的频谱,而在负频域其频谱为零。这一性质保证了对解析信号进行小波变换划分频域的结果与对原实信号的结果是一致的,这也是我们采用解析信号的主要原因之一。

5 仿真分析

图 2 给出了投切电容器组所产生的暂态电流信号的波形,将其转化为解析信号后利用哈明小波进行小波变换。

图 3、4 分别给出了信号在尺度 $a=2^{-4}$, $a=2^{-2}$ 上分解结果的实部波形和幅值包络,由图可见,幅值包络避免了小波函数本身的振荡性所带来的影响,与实部波形相比更加准确地反应了信号的奇异点,

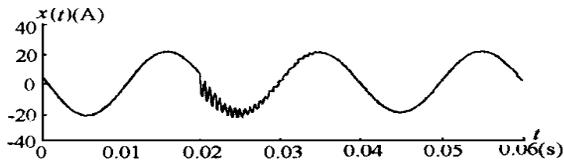
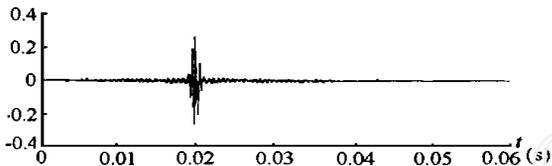
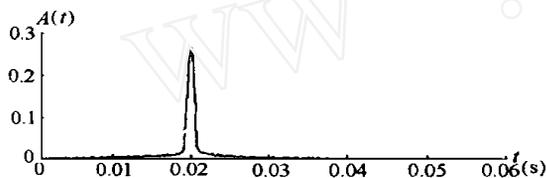


图2 暂态信号波形

由奇异点的位置可知电容投入的时刻为 $t = 0.02s$ ，从而实现了对瞬变发生时刻的精确定位。

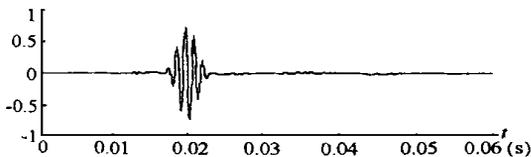


(a) 尺度 $a=2^{-4}$ 上的实部波形

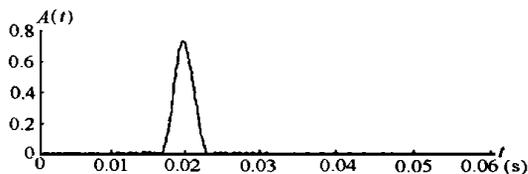


(b) 解析信号的幅值

图3



(a) 尺度 $a=2^{-2}$ 上的实部波形

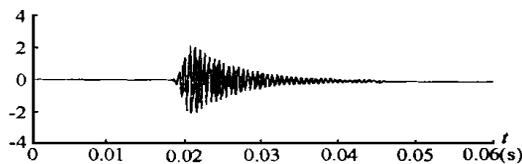


(b) 解析信号的幅值

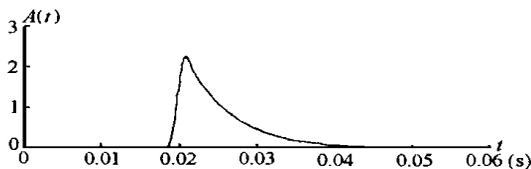
图4

图5(a)给出了尺度 $a = 2^{-3}$ 上分解结果的实部波形,可见这是暂态信号中的高频振荡部分,图5(b)是该尺度分解结果的幅值包络,它清晰地反应了高频振荡的幅值变化情况,图5(c)给出了该尺度分解结果的相位变化曲线。图5(d)是该尺度分量的瞬时频率曲线。由瞬时频率在其时间范围内的平均值可得该分量的平均频率为 $f = 1612.4Hz$ 。

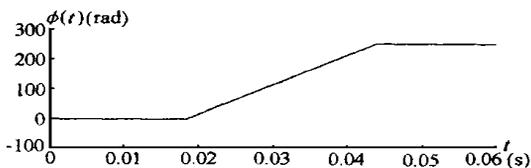
图6(a)给出了尺度 $a = 2^2$ 上分解结果的实部波形,可见这是暂态信号中的低频成分,图6(b)是该尺度分解结果的幅值包络,它反应了低频成分的



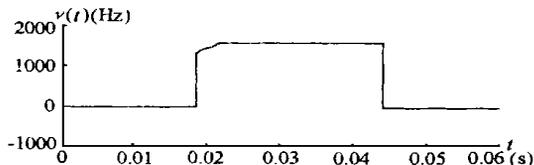
(a) 尺度 $a=2^{-3}$ 上的实部波形



(b) 尺度 $a=2^{-3}$ 上的幅值包络



(c) 尺度 $a=2^{-3}$ 上的信号相位



(d) 尺度 $a=2^{-3}$ 上的瞬时频率

图5

幅值变化情况。图6(c)给出了该尺度分解结果的相位变化曲线。图6(d)是该尺度分量的瞬时频率曲线。进一步可得该分量的平均频率为 $f = 50.112$ ，可见该低频成分正是信号中的基波分量。

由上面的仿真结果可见,采用解析信号后,小波变换的结果不仅给出了各尺度上信号分量的幅值,而且提供了信号的幅值包络、相位变化、瞬时频率(平均频率)等更加丰富的信息,另外,还使某些问题表现得更加清晰,如信号奇异点的位置。这些信号特征无论在电力系统故障分析或继电保护中都是非常重要的。采用解析信号的方法同样适合于其它小波函数,因此将解析信号与小波变换相结合的方法可望在电力系统中取得广泛的应用。

6 与傅立叶方法的比较

傅立叶变换(FFT)是一个强有力的数学工具,并且具有明确的物理意义,即信号的傅立叶变换表示信号的频谱。正是傅立叶变换的重要的物理意义,决定了傅立叶变换在信号分析中的独特地位,特别是作为平稳信号分析的最重要的工具。但是对于

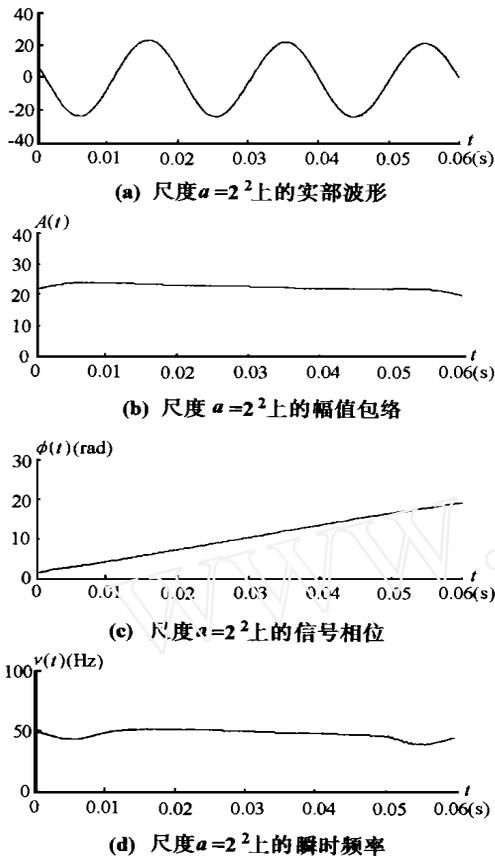


图 6

非平稳信号傅立叶分析的局限性就逐渐表现出来了。图 7 给出了电容投切产生的暂态信号的傅立叶变换的结果。从图中可见,首先,傅立叶变换可以给出信号整体的频谱分布,但是它不能回答某一时段内信号的频谱是怎样分布的,从频谱的变化上无法标定发生变化的时间位置和发生变化的剧烈程度。其次,信号在某一小的时段内发生了变化,其整个频谱都要受到影响,这使我们无法认清信号到底是由哪些频率成分组成。

短时傅立叶变换(STFT)是通过将信号加一滑动的时窗,然后对加窗截取后的每一小段分别取其傅立叶变换,因此短时傅立叶变换克服了傅立叶分析不具有时间局部性的问题,同时保留了信号‘频谱’的物理解释。图 8 是选取时间窗为 20ms 的短时傅立叶变换的结果,可见它可以比较清楚地反映低频信号的频谱随时间变化的情况,然而对于高频信号频谱的变化反映不敏感,只能粗略地判断其变化的趋势。这是由于短时傅立叶变换对信号所加的时频窗在窗函数选定后其窗口的大小及形状是固定不变的,这个固定的窗口不可能同时满足分析高频和低

频信号的要求。

另外,无论是傅立叶变换还是短时傅立叶变换对信号的奇异点都不能清晰地刻画。

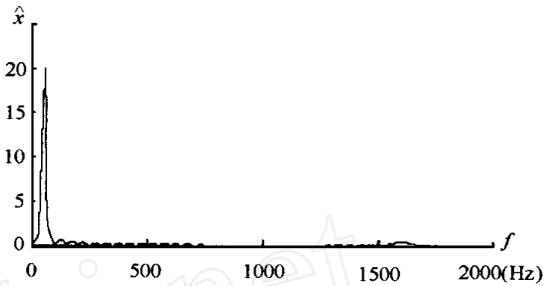


图 7 暂态信号傅立叶变换的结果

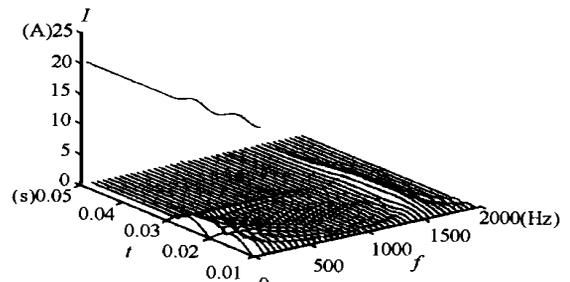


图 8 暂态信号短时傅立叶变换的结果

7 结论

本文针对电力系统暂态信号分析提出了一种基于小波变换的解析信号分解方法。该方法将小波变换的时频局部性与解析信号的特点相结合,可提取暂态信号中各分量的幅值包络、相位、瞬时频率等特征信息,而且对信号的奇异点定位更加准确,该方法的应用可为电能质量分析提供更加丰富的依据。

[参考文献]

- [1] Arora A, Chan K and Jauch T etc. Innovative System Solutions for Power Quality Enhancement. ABB Review 1998, (3): 4 - 17.
- [2] Morl H, Itou K and Uematsu H etc. An Artificial Neural - Net Based Method for Predicting Power System Voltage Harmonics. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 402 - 409.
- [3] Santoso S, Powers E J, Grady W M. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 924 - 930.
- [4] 王建隼,冉启文,纪延超. 谐波检测中小波变换频域特性分析. 电力系统自动化, 1998, 22(7).
- [5] 王建隼,纪延超,冉启文. 新小波的构造(下转第 19 页)

采用 EMTP 暂态仿真法对算法进行了检验,仿真结果见表 1。

表 1

	实际值	0.8	0.5	0.2
$R_f = 50$	测量值	0.8000674	0.4999768	0.1999785
$R_f = 100$	测量值	0.8000273	0.500025	0.2000842

从仿真结果看出,本算法的测距精度较高。

6 结论

本文提出的单相接地故障的测距方案,经仿真计算证明,其测距精度很高,测距不受过渡电阻的影响。实际使用时比较繁琐,但是,本方案可以克服传统故障测距中,由于无法知道对侧的系统阻抗而引起的误差。在采用单端测量时,完全消除过渡电阻对测距的影响。当然,本方案的计算量较大,由于测距一般是离线进行的,所以,此方案具有一定的使用

价值。

[参考文献]

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安交通大学出版社, 1993.
- [2] 任立, 刘沛. 故障测距算法探索. 湖北电机工程学会, 1992 年年会论文集.
- [3] 徐启峰, 魏孝铭. 高压输电线路故障测距的解微分方程算法中的零序电流相位修正. 电力系统自动化, 1990, (1).
- [4] 蔡得礼. 高压输电线路故障点定位的一种新计算方法. 重庆大学学报, 1982, (2).

收稿日期: 1999-03-30

作者简介: 范春菊(1967-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护及综合自动化; 郁惟庸(1940-), 男, 教授, 博导, 主要从事继电保护及自动化研究工作。

FAULT LOCATION SCHEME FOR THE SINGLE LINE TO GROUND

FAN Chun-ju, YU Wei-yong

(Electric Engineering Department of Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract According to the characteristic of the transmission line of less length, namely, less line loss, which can be ignored, the paper takes advantage of the voltage and current that is measured during the normal running type, calculating the synthesized impedance of the remote end. At the same time, the paper makes use of the sequence networks and the relationship of the positive sequence current and the zero sequence current, calculating the synthesized impedance of the locating end and the zero synthesized impedance of the remote end, calculating the distance between the fault and the fault locating equipment. The scheme overcomes the conventional fault location error because of having no idea of the information of remote end. It is proved by simulation by EMTP, if the plan is used to transmission line of less length, the accuracy of the fault locating is very high, being not subjected to the high transition resistance.

Key words fault location; transmission line; single line to ground

(上接第 16 页) 造及其在电力系统中的应用. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十四届学术会议, 1998, 10. 95 - 99.

- [6] [美] 科恩. 时-频分析: 理论与应用. 西安交通大学出版社, 1998, 3.

收稿日期: 1999-01-12

作者简介: 王建贻(1972-), 男, 博士在读, 研究方向为小波变换在电力系统中的应用; 纪延超(1962-), 男, 教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; 冉启文(1963-), 男, 副教授, 研究方向为小波变换及分数 Fourier 变换。

WAVELET TRANSFORM IN THE APPLICATION OF POWER QUALITY ANALYSIS

WANG Jian-ze, JI Yan-chao, RAN Qi-wen, LIU Zhuo

(Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract This paper presents a decomposition method of analytic signal based on wavelet transform to analyze electronic power transient signal. This method combines the localization in time-frequency domain of wavelet transform with the description of phase and instantaneous frequency of analytic signal. This method can collect singular point of transient signal and magnitude envelope, phase, instantaneous frequency of scale components, and provide rich information for power quality analysis.

Key words power quality; wavelet transform; analytic signal