

采用小波变换检测和定位电能质量扰动

耿云玲^{1,2}, 何怡刚¹, 王群^{1,2}, 杨东根³

(1. 湖南大学电气与信息学院, 湖南 长沙 410082; 2 国防科大炮兵学院, 湖南 长沙 410112;

3. 汨罗电力局, 湖南 汨罗 414400)

摘要: 从小波变换能够突出信号局部特征的特性出发, 探讨了多尺度小波变换模极大值与信号突变点之间的关系, 分析了对电网电压跌落及周期脉冲等典型电能质量扰动进行检测与定位的方法。为验证方法的有效性, 进行了相应的仿真研究。结果证实了小波变换能更精确地检测和定位电能质量扰动。

关键词: 电能质量; 小波变换; 多尺度; 检测与定位

中图分类号: TM714; TN911.4 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)08-0038-03

0 引言

上世纪 80 年代以来, 电网电能质量 (power quality) 问题已引起广泛关注。究其主要原因, 一是随着非线性电力电子装置的大量使用, 电网中的谐波水平有所增长; 二是各种现代精密生产工艺流程和高精度工业设备对电网中的各种扰动 (信号) 敏感度的提高, 再加上用户对诸如断电、电压跌落等电能质量问题越来越深入的了解, 所有这一切就促使人们对电能质量提出了更高要求。而对引起电能质量下降的各种扰动进行及时、准确地检测和定位, 是改善电能质量的重要前提。

长期以来, Fourier 变换在电能质量问题中的谐波检测起着重要的作用。但由于它是一种纯频域方法, 在时空域中没有任何分辨性^[1]。尽管短时 Fourier 变换对此有所改进, 但由于单一分辨率, 也限制了其在电能质量短时扰动检测方面的应用。相反, 近年发展起来的小波变换 (wavelet transform), 以其良好的时频局部化及多分辨率特性赋予了它优于 Fourier 变换来刻画瞬态和突发性问题的分析能力, 因此它很好地弥补了 Fourier 变换在电能质量短时扰动检测和定位方面的不足而获得了广泛的应用。

1 小波变换原理

小波变换与窗口 Fourier 变换都属于时-频域分析, 本质上都是考察信号与所用窗口函数或小波函数在波形上的局部相似程度, 但两者在性质上仍存在着很大差异。主要区别在于后者窗口大小一旦选定就固定不变, 而前者的窗口大小可根据所分析

信号的频率高低自动调节, 从而能不断地聚焦到对象的任意微小细节。

对平方可积函数; $x(t) \in L^2(R)$ 、 $\psi(t) \in L^2(R)$, 有 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换 $\Psi(\omega)$ 满足

$$c = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则

$$WT_a x(t) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) d\tau = x(t) * \psi_a(t) \quad a > 0 \quad (2)$$

这称为 $x(t)$ 的连续小波变换^[2]。其中

$$\psi_a(t) = a^{-1} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (3)$$

称为基本小波或小波母函数, a 为尺度因子。从压缩数据及节约计算的角度出发, 通常需将连续小波变换离散化。实际应用中, 一般取 $a = 2^j$, j 为整数。在这种二进离散情况下, 由基于多分辨分析的 Mallat 快速算法, 有以下分解公式

$$c_{j+1, k} = \sum_n c_{j, n} h_{n-2k} \quad (4)$$

和

$$d_{j+1, k} = \sum_n d_{j, n} g_{n-2k} \quad (5)$$

对应的重构公式为:

$$c_{j, k} = \sum_n c_{j+1, n} p_{k-2n} + \sum_n d_{j+1, n} q_{k-2n} \quad (6)$$

其中: h, g 为分解滤波器系数, p, q 则为重构滤波器系数。 $c_{j, k}$ 称为低频小波系数, $d_{j, k}$ 称为高频小波系数。整个信号的波形特点由小波系数的概貌部分 $c_{j, k}$ 决定, 而信号的局部特征则由细节部分 $d_{j, k}$ 刻画。概貌部分反映的是基波和一些低频段谐波信号, 而细节部分则反映的是变换后高频段信号和信号突变点的情况。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50277010)

2 模极大值与信号突变点的关系

电网中,电压一般可认为是标准的正弦信号,而影响电网电能质量的各种扰动通常则表现为标准电压的突变。如:电压跌落、断电、过电压以及暂态等电能质量问题。

设 $\psi(t)$ 是一低通平滑函数^[3],且积分为 1,无穷远处衰减为 0,记

$$\psi^{(1)}(t) = \frac{d}{dt} \psi(t) \quad (7)$$

由 Fourier 变换的微分原理可知, $\psi^{(1)}(t)$ 必定是带通函数,满足小波的可容许条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^{(1)}(t) dt = 0 \quad (8)$$

所以 $\psi^{(1)}(t)$ 可用作小波变换的基本小波。由式(2),此时对应的小波变换为:

$$WT_a x(t) = x(t) * \psi_a^{(1)}(t) = x(t) * \left(a \frac{d}{dt} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \right) = a \frac{d}{dt} [x(t) * \psi\left(\frac{t}{a}\right)] \quad (9)$$

且

$$\psi_a(t) = a^{-1} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (10)$$

即信号经平滑后再求导,等效于直接用平滑函数的导数对信号进行处理^[4]。这样,小波变换 $WT_a x(t)$ 就是信号 $x(t)$ 在尺度 a 下由平滑函数 $\psi_a(t)$ 平滑后的一阶导数。而函数一阶导数的绝对值(模)为极值时所对应的点即为函数的拐点,为极大值时所对应的点即为函数的突变点。也即,当小波取为平滑函数的一阶导数时,其变换在各尺度下系数的模极大值对应于信号突变点的位置,从而为利用小波变换进行电能质量扰动的检测提供了理论依据。

3 仿真研究

从以上的分析可看出,当尺度 a 较小时, $\psi_a(t)$ 的平滑区域也较小,因此小波系数模极大值点与突变点位置的对应就较为准确,但由于小尺度下噪声对小波系数影响非常大,这样就会产生许多伪极值点,导致测量的准确性受到影响。随着尺度 a 的增大,噪声对应的小波系数减小,也就是说在大尺度下,对噪声进行了一定的平滑,相应的极值点就比较稳定,但此时由于平滑作用又使其定位产生了偏差。因此,在利用小波变换模极大值来检测信号突变点时,通常需把多尺度结合起来综合观察^[1]。为节省篇幅,这里利用 db4 小波对两种典型电能质量扰

动进行两个尺度的分解,通过用 Matlab 软件仿真来观察小波变换对扰动的检测和定位效果。信号的采样频率定为每周期 256 个样点。

3.1 电压跌落的检测和定位

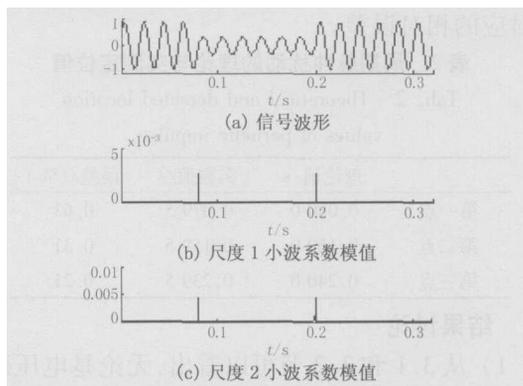


图 1 电压跌落

Fig 1 Voltage sags

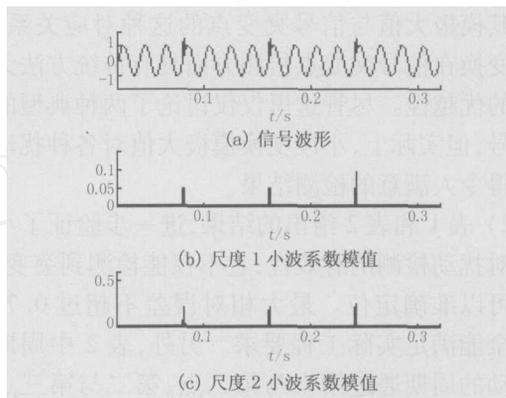


图 2 周期脉冲扰动

Fig 2 Periodic impulse disturbance

电网中电压跌落是指电压有效值降至标准值的 0.1~0.9,持续时间在 0.5 个周期到 1 min 的电磁扰动,通常是电网断电的先兆表现。图 1 为电压跌落信号及对应两尺度小波变换系数模值的波形图,而表 1 给出了电压跌落信号在理论和实际检测中所得定位值的结果以及对应的相对误差。

表 1 电压跌落扰动的理论与实测定位值

Tab 1 Theoretical and detected location values of voltage sag

	理论值 /s	实测值 /s	误差 / (%)
开始点	0.080 0	0.079 6	0.50
结束点	0.200 1	0.200 5	0.20
持续时间	0.120 1	0.120 9	0.67

3.2 周期脉冲扰动的检测和定位

电网脉冲扰动是指电网电压在其稳态情况下一个突发的、非电源频率的变化。其危害在于它有可

能激发电网的固有频率从而引发振荡暂态,造成电网工作的不正常。图 2 为周期脉冲扰动及对应两尺度小波变换系数模值的波形图,而表 2 给出了周期脉冲扰动在理论和实际检测中所得定位值的结果以及对应的相对误差。

表 2 周期脉冲扰动的理论与实测定位值

Tab 2 Theoretical and detected location values of periodic impulse

	理论值 /s	实测值 /s	误差 / (%)
第一点	0.080 0	0.079 5	0.63
第二点	0.160 0	0.159 5	0.31
第三点	0.240 0	0.239 5	0.21

3.3 结果讨论

1) 从 3.1 和 3.2 节可以看出,无论是电压跌落还是周期脉冲扰动,其开始点、结束点以及持续时间在相应小波变换的模极大值上都可清晰地检测到。正是其模极大值与信号突变点的这种对应关系,使小波变换在信号突变点检测方面具有传统方法无法比拟的优越性。尽管这里仅仅讨论了两种典型的扰动信号,但实际上,小波变换模极大值对各种扰动都能获得令人满意的检测结果。

2) 表 1 和表 2 给出的结果,进一步验证了小波变换对扰动检测的有效性;它不仅能检测到突变点,而且可以准确定位。最大相对误差不超过 0.7%,这完全能满足实际工程要求。另外,表 2 中周期脉冲扰动的周期通过第一与第二点、第二与第三点之间的时间差可获得。本例中理论值和实测值所获得的周期相同,均为 0.08 s。

3) 小波变换与传统 Fourier 变换不同点之一就是其没有固定的核函数。因此,在利用它分析问题,选择不同的小波在分析结果上会有较大的差异,如在 3.1 节中电压跌落的定位时,对开始点和结束点来说,相同算法下用小波 db8 比选用小波 db4 相对理论值有 14 个采样点的偏差 (db4 为 6 个采样点的偏差),而采用 db40 小波所带来的偏差分别达到 78 和 73 个采样点,这是由于序号较高的 daubechies 小波,其对应的滤波器的长度也较长,相应小波的光滑性也更好。尽管小波的光滑性是小波性能很重要的一个指标,但在突变点定位时,这种高的光滑性在对扰动信号平滑的过程中也会造成突变点的偏移,在实际

工作中需特别注意。针对特殊的扰动,还可以构造相应的小波,以求获得更好的检测和定位结果。

4 结束语

小波变换是近年来在调和分析的基础上发展起来的新兴学科,是调和分析这一数学领域半个世纪以来的工作结晶,它很好地克服了传统 Fourier 变换、窗口 Fourier 变换的不足,在时-频两域同时具有良好的局部化性质,从而在信号处理、故障诊断等许多方面获得了广泛的应用。而利用小波变换模极大值与信号突变点的对应关系,可以有效地对电网的各种电能质量扰动进行检测和定位,为进一步提高电能质量提供依据。

参考文献:

- [1] 刘贵忠,邱双亮.小波分析及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,1997.
L U Gui-zhong, D I Shuang-liang Wavelet Analysis and Its Application [M]. Xi an: Xidian University Press, 1997.
- [2] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,2003.
PENG Yu-hua Wavelet Analysis and Its Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] Stephane M, Wen L H. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. IEEE Trans on IT, 1992, 38 (2): 617-643.
- [4] 胡铭,陈珩.基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J].电网技术,2003,27(3):12-16.
HU Ming, CHEN Heng Detection and Location of Power Quality Based on Modulus Maxima of Wavelet Transform [J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 12-16

收稿日期: 2004-07-17; 修回日期: 2005-01-29

作者简介:

耿云玲(1962-),女,副教授,博士研究生,研究方向为小波变换及其应用、电网电能质量分析; E-mail: yun_g@126.com

何怡刚(1965-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电路故障诊断、小波变换和神经网络应用;

王群(1960-),男,博士,教授,现主要研究方向为电源技术与应用、电网电能质量分析。

Detection and location of power quality disturbances by wavelet transform

GENG Yun-ling^{1,2}, HE Yi-gang¹, WANG Qun^{1,2}, YANG Dong-gen³

(下转第 51 页 continued on page 51)

的精度。本文提出的混合仿真技术可扩展应用于含 HVDC和其它 FACTS器件的电力系统混合仿真。

致谢:

感谢香港理工大学赠送 DCG版 EMTF仿真软件,使该项目研究得以开展,对此深表谢意。

参考文献:

- [1] Heffeman M D, Tumer K S, Arrillaga J, et al Computation of AC-DC System Disturbance, Part I, II and III [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100, (11): 4341-4348
- [2] Reeve J, Adapa R. A New Approach to Dynamic Analysis of AC Networks Incorporating Detailed Modeling of DC Systems, Part I Principles and Implementations [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2005-2011.
- [3] Anderson G W J, Watson N R, Arnold C P, et al A New Hybrid Algorithm for Analysis of HVDC and FACTS Systems [A]. Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1995, 2: 462-467.
- [4] Sultan M, Reeve J, Adapa R. Combined Transient and Dynamic Analysis of HVDC and FACTS Systems [J]. IEEE Trans on PD, 1998, 13(4): 1271-1277.
- [5] Woodford D A. PSCAD User's Guide [M]. Manitoba HVDC Research Centre, 2003
- [6] Woodford D A. EMTDC User's Guide [M]. Manitoba HVDC Research Centre, 2003.
- [7] SU Hong-tian, CHAN K K W, Snider L A. Interfacing

- an Electromagnetic SVC Model into the Transient Stability Simulation [A]. Proceedings of the International Conference on Power, 2002, 3: 1568-1572
- [8] 王立伟,房大中,钟德成.含静止无功补偿器的电力系统混合仿真新算法研究 [J]. 电力系统自动化学报, 2004, 16(1): 74-77.
- WANG Liwei, FANG Da-zhong, ZHONG De-cheng A New Hybrid Simulation Algorithm for Power System with Static var Compensator [J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2004, 16(1): 74-77.
- [9] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析 [M].北京:清华大学出版社, 1996
- ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun Higher Power Network Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996
- [10] 黄家裕,陈礼义,孙德昌.电力系统数字仿真 [M].北京:中国电力出版社, 1995.
- HUANG Jia-yu, CHEN Li-yi, SUN De-chang Digital Simulation of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2004-07-30; 修回日期: 2004-08-11

作者简介:

鄂志君(1977-),男,硕士研究生,主要从事电力系统仿真和 FACTS方面的研究; E-mail: ezj1977@hotmail.com

房大中(1946-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析、仿真、稳定和控制方面的研究。

Research of hybrid simulation algorithm based on EM TDC

E Zhi-jun, FANG Da-zhong, WANG Liwei, SONG Wen-nan
(Automation College, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To the problem of current hybrid simulation algorithm lacking feasibility and commonality, a new hybrid simulation approach using commercial software PSCAD /EM TDC is presented in this paper. Using the elements of the PSCAD master library, the new hybrid simulation approach can construct the simulation model of FACTS and its controller to carry out precise electromagnetic transient simulation, and call the inserted TSP to simulate the outside AC power system and realizes the whole system's hybrid simulation in the following. The new approach greatly simplifies the simulation process by constructing simulation project under graphical user interface, and has improved the reliability of hybrid simulation.

Key words: transient stability simulation; hybrid simulation; PSCAD /EM TDC; FACTS

(上接第 40 页 continued from page 40)

- (1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
- 2 National University of Defense and Technology, Changsha 410112, China;
- 3 Miluo Electric Power Bureau, Miluo 414400, China)

Abstract: Based on the property of wavelet transform on stressing local characteristics, the relationship between the modulus maximum of multi-scale wavelet transforms and the sudden-change points of a signal is studied, and the detection and the location of voltage sags and periodic impulses, which are the typical disturbance signals of power quality in power network are analyzed. The simulations show the feasibility of the approach, and the results show that wavelet transforms can more accurately detect and locate power quality disturbances.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277010).

Key words: power quality; wavelet transform; multi-scale; detection and location