

基于 db4 小波的配电网暂态电能质量扰动的检测与定位

关维国, 姚清志, 高阳, 鲁宝春

(辽宁工业大学电子与信息工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 针对暂态电能扰动持续时间短、变化速率快的特点, 给出一种基于小波变换的暂态电能扰动检测方法。该方法使用 db4 小波对暂态电能信号进行采样、多尺度分解进而判断信号突变点, 能精确地对配电网中常见的暂态电能扰动问题检测与定位, 并与其它阶数 db 小波变换结果进行了比较。仿真结果表明, 该方法能够快速、准确地对暂态电能扰动信号检测与定位, 精度较高, 满足实际工程需求。

关键词: 暂态电能质量; 采样; 多尺度分解; 突变点; 检测与定位

Transient power quality detection and location of distribution network based on db4 wavelet transform

GUAN Weiguo, YAO Qingzhi, GAO Yang, LU Baochun

(College of Electronic and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: According to the short duration and fast change rate of transient power disturbance, a transient power disturbance detection method based on wavelet transform is proposed. Using db4 wavelet, the method realizes transient power signal sampling and multi-scale decomposition, and then judges the signal break points. It can accurately detect and locate the common transient power disturbance problems in distribution network and is also compared with other-order db wavelet transform result. The simulation results show that this method can identify and locate transient power disturbance signals quickly and accurately, it has high precision and can meet the actual engineering requirements.

Key words: transient power quality; sampling; multi-scale decomposition; signal break point; detection and analysis

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0102-05

0 引言

在现代配电网中, 随着工业技术和电力电子技术的飞速发展, 各种非线性、冲击性负荷逐渐涌入电网中, 给电网带来了严重的电能质量问题^[1], 如: 谐波、间谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、三相不平衡等。为保证电网中各种设备安全、可靠地运行, 对配电网电能质量进行必要的分析, 进而对其改善和治理是十分必要的^[2]。

在实际工程应用中, 配电网电能质量问题包括稳态问题^[3]和暂态问题^[4], 尤其是暂态电能质量的变坏直接影响到电网的安全性, 检测暂态电能质量问题, 国内外学者提出了众多方法。文献[5]提出使用短时傅里叶变换的分析方法, 检测电压暂降扰动信号, 可以确知电压暂降扰动发生的时刻和受扰程度, 检测较为准确, 但短时傅里叶变换难以同时具

备高时间分辨率和高频率分辨率, 应用存在一定局限性。文献[6-7]利用 S 变换法对电能质量扰动分类, 仿真表明识别率较高, 分类相对准确, 但 S 变换的不足在于: 运算量较大, 实时性难以保证; 文献[8]利用 HHT 变换对电网系统电能质量进行评估分析, 具有良好的自适应性, 但实时性同样不易保证; 文献[9]通过 dq 变换实现三相不平衡电压暂降幅值的检测, 实时性较好; 此外暂态电能质量分析还有 prony 分析法^[10]、神经网络分析法^[11-12]、卡尔曼滤波法^[13-14]等分析方法。

小波变换具有较好的时频局部性和窗口自适应性^[15], 对暂态问题有相对较好地刻画能力, 并且能通过平移和伸缩对信号进行多分辨分析, 同时 db 小波函数又具有正交、时频紧支撑、高正则性和 Mallat 快速算法等特点^[16], 是 Mallat 算法最为常用的小波母函数。因此, 本文采用 db4 小波变换对配电网暂

态电能质量进行分析。仿真结果表明, 应用 db4 小波能有效、准确地检测与定位暂态电能扰动信号, 效果相对较好。

1 配电网暂态电能质量问题

暂态电能质量问题^[17]主要包括电压暂升、电压暂降、电压中断、瞬时脉冲等扰动现象。如表 1 所示, 归纳了几种暂态电能质量问题的定义和相关描述。

表 1 暂态电能质量问题的定义和相关描述

Table 1 Definition and the related description of transient power quality problems

暂态电能质量问题	定义	相关描述
电压暂升	指供电电源提供的工频电压骤然升高	典型电压方均根值为 1.1~1.8 p.u., 持续时间为工频下的半周到 1 min
电压暂降	指电力系统中某点工频电压方均根值突然降低	典型电压方均根值为系统标称电压的 1%(10%)~90%, 持续时间为半周到 1 min
电压中断	指电压方均根值降低接近到零值	长时间中断持续时间大于 3 min 短时间中断持续时间小于 3 min
瞬时脉冲	稳态情况下突发的、非电源频率的变化	引发电网振荡暂态, 造成电网工作不稳定

从表 1 中可知, 暂态电能质量问题的主要特征是电压或电流变化速率较大, 扰动持续时间较短。而小波变换具有较好的时频局部性和窗口自适应性, 并能通过伸缩和平移等运算对信号进行多尺度分析, 所以小波变换比较适合分析暂态电能质量问题。

2 小波变换与暂态检测方法

小波变换是一种常见的时频域分析工具, 在低频率范围内, 频率分辨率高, 在高频率范围内, 时间分辨率高^[18]。

2.1 小波变换的基本思想

通过某一函数表示或逼近分析的信号 $f(t)$, 而这一函数是由基本小波函数 $\psi(t)$ 经过不同尺度的伸缩和平移所构成的。具体如下。

设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换为 $\psi(\omega)$, 当 $\psi(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_\psi = \int \frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|} < \infty \quad (1)$$

则可称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波函数。将其伸

缩和平移后得到小波序列:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中, a, b 分别为伸缩参数和尺度参数。则对于任意信号 $f(t) \in L^2(R)$, 连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = f(x) \cdot \psi_a(x) \quad (3)$$

其重构公式为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint \frac{W_f(a,b)}{a^2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

2.2 扰动起止时刻与模极大值点

暂态电能质量扰动定位的目的是确定扰动的起止时刻。由于扰动的起止时刻通常对应着信号的突变点, 而信号的突变点就是小波变换模极大值点对应的点, 因此可以通过小波变换模极大值点来确定扰动时刻。证明如下。

可设定一个光滑低通函数 $\theta(x)$, 并且满足积分为 1, 无限远处衰减为 0 的条件, 则其一阶导数为

$$\varphi(x) = \frac{d\theta}{dx} \quad (5)$$

则 $\varphi(x)$ 一定是带通函数, 符合小波的可容许条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 0 \quad (6)$$

因此 $\varphi(x)$ 可作为小波变换的母小波。若用

$\theta_a(x) = \frac{1}{a} \theta\left(\frac{x}{a}\right)$ 表示函数 $\theta(x)$ 对尺度因子 a 的伸缩, 则尺度因子 a 的小波函数为

$$\varphi_a(x) = \frac{\varphi\left(\frac{x}{a}\right)}{a} = \frac{d\theta\left(\frac{x}{a}\right)}{dx} = a \frac{d\theta_a(x)}{dx} \quad (7)$$

由式(3)可知, 此时信号 $f(x)$ 在尺度 a 上的小波变换为

$$W_f(a,x) = f(x) \cdot \varphi_a(x) = f(x) \cdot \left(a \frac{d\theta_a(x)}{dx}\right) = a \frac{d[f(x) \cdot \theta_a(x)]}{dx} \quad (8)$$

对于固定尺度 a 下, $W_f(a,x)$ 就是信号 $f(x)$ 经过函数 $\theta_a(x)$ 平滑后的一阶导数, 即 $W_f(a,x)$ 模极大值时所对应的点就是信号的局部突变点。所以, 可以利用各尺度下的小波变换的模极大值点的位置来对应信号的突变点。

2.3 方法步骤

设小波变换多分辨率分解的高频系数为 CD_n , 低频系数为 A_n , 其中 n 代表分解层数。高频系数能反

映小波的细节部分，而低频系数反映小波的整体概貌。则具体检测与定位方法步骤如下：

(1) 采样。为满足采样定理，同时确保精确度，采样频率取 5 kHz，即对工频正弦波每周期采样 100 个点，得到采样序列。

(2) 选取小波基和分解尺度。Db 系列小波函数满足正交性、时频紧支撑性、高正则性，又具有 Mallat 快速算法等特点，所以选取 db4 小波对采样序列进行 5 层分解，得到第一层和第二层高频系数 CD_1 、 CD_2 。

(3) 判断突变点。求出第一层高频系数 CD_1 和第二层高频系数 CD_2 的模极大值及其位置，即模极大值位置为信号的突变点。

(4) 确定扰动时刻。记录模极大值点对应的时刻，即为暂态扰动发生和结束的时刻，时间间隔即为扰动持续时间。

(5) 判断暂态扰动类型。信号经过 db4 小波五层分解后得到第五层低频小波系数 A_5 ，通过 A_5 的幅值信息可以估测扰动信号的幅度，进而判断暂态电能质量的类型。

3 仿真验证

为验证本方法的有效性，在 Matlab7.0 中，首先对比了不同阶数 db 小波检测暂态电能的差异，然后利用 db4 小波对配电网中几种典型的暂态电能质量问题进行仿真验证。图 1~图 3 中纵坐标为电压幅值，横坐标为时间。

3.1 对比 db 系列小波检测电压暂降的差异

Db 系列小波在电能质量分析中被广泛应用，但由于 db 系列小波在性能上存在差异，因此在利用小

波变换时，选择不同的 db 小波，分析的结果也存在着差异。图 1(a)以模拟工频状态下电压暂降信号波形为例，对比了不同 db 小波分析暂态电能的差异。电压幅值由 220 V 下降为 154 V，下降了 30%，电压暂降扰动持续 4 个周期，理论起始和结束时间分别为 0.16 s 和 0.24 s。图 1(b)、1(c)、1(d)分别为利用 db4、db8、db40 小波检测分析电压暂降信号的第一层高频系数。

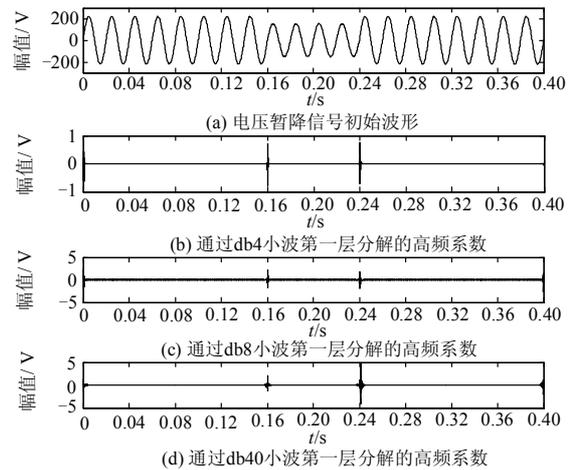


图 1 不同 db 小波检测电压暂降扰动对比

Fig. 1 Comparison of voltage sag disturbance detection with different db wavelet

由表 2 可知，利用 db4、db8、db40 小波对电能暂态扰动检测定位，db4 相对误差最小，db40 相对误差最大。这是因为 db 小波随着阶数的增大，滤波器的长度也变大，时域紧支撑性减弱。因此分析暂态电能扰动信号，利用 db4 效果相对最佳，所以本文选用 db4 小波。

表 2 不同 db 小波检测电压暂降扰动的理论与实测值对比

Table 2 Comparison of theoretical values and measured values of voltage sag disturbance detection with different db wavelet

检测定位	理论值/s	db4		db8		db40	
		实测值/s	相对误差	实测值/s	相对误差	实测值/s	相对误差
电压暂降							
起始时刻	0.160 0	0.159 6	0.250%	0.160 8	0.500%	0.163 4	2.125%
结束时刻	0.240 0	0.240 2	0.083%	0.242 0	1.250%	0.245 0	2.083%
持续时间	0.080 0	0.080 6	0.750%	0.081 2	1.500%	0.081 6	2.000%

根据海森堡测不准原理可知，小波变换中时窗和频窗不可能同时提高，乘积为一常数。当时窗减小时，其频窗就会变宽，时域分析能力增强，频域分析能力则减弱，反之亦然。因此，在实际工程应用中，为了得到较好的时域分辨能力，可以选用阶数小的 db 小波；为了得到较好的频域分辨能力，可以选用阶数大的 db 小波，但也要根据实际的要求，对小波的时域和频域局部特性进行折中考虑。

3.2 电压中断扰动检测与定位

如图 2(a)为模拟工频状态下电压中断信号波形，电压幅值为 220 V，中断持续 4 个周期，理论起始和结束时间分别为 0.16 s 和 0.24 s。

由图 2(b)可知，波形在某一时间间隔幅值降为零值，可判定扰动类型为电压中断，实现了电能暂态扰动的检测。而由表 3，扰动起止时刻实测值误差较小，实现了对电压中断扰动的进行定位。

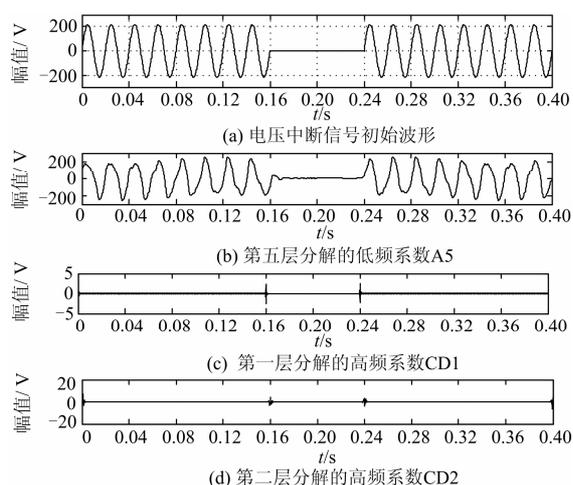


图2 电压中断扰动现象分析

Fig. 2 Analysis of the phenomenon of disturbance voltage interruption

表3 电压中断的理论值与实测值

Table 3 Theoretical values and measured values of voltage interruption

电压中断	理论值/s	实测值/s	相对误差/%
起始时刻	0.160 0	0.160 0	0.000
结束时刻	0.240 0	0.240 2	0.083
持续时间	0.080 0	0.080 2	0.250

3.3 瞬时脉冲扰动检测与定位

图3(a)为模拟工频状态下瞬时脉冲扰动波形, 正常电压幅值为220 V, 瞬时脉冲突变在0.17 s和0.25 s处。

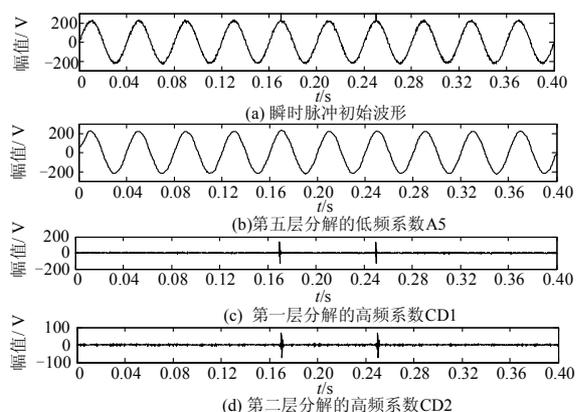


图3 瞬时脉冲扰动现象分析

Fig. 3 Analysis of the phenomenon of transient pulse disturbance

由表4可知, 瞬时脉冲突变时刻的实测值相对误差较小, 故可以对瞬时脉冲扰动现象进行定位。

表4 瞬时脉冲突变时刻的理论值与实测值

Table 4 Theoretical values and measured values of transient pulse sudden change time

瞬时脉冲	理论值/s	实测值/s	相对误差/%
起始时刻	0.170 0	0.169 6	0.23
结束时刻	0.250 0	0.250 8	0.32

4 结论

电能质量是配电网安全可靠运行的关键, 因此准确地对配电网电能质量检测分析至关重要。与其它分析方法相比, db4小波变换分析更为精确, 本文提出了基于db4小波变换方法, 给出了算法步骤, 并对几种常见的暂态扰动信号进行了仿真, 结论如下:

(1) 对于暂态电能质量扰动问题的检测定位, 利用db4小波相对其它阶数的db小波, 检测精度更高, 效果最佳。

(2) 从图2、图3中可以看出, 本方法可以较好地检测电压暂降、电压中断、瞬时脉冲等暂态电能质量问题。

(3) 从表2、表3中可以得到, 本方法可以准确地对暂态电能质量扰动起止和持续时刻进行定位, 相对误差较小, 完全满足实际工程需求。

参考文献

- [1] 陈晟. 电能质量与供电可靠性关系分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 99-103.
CHEN Sheng. Analysis of the relationship between power quality and power supply reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 99-103.
- [2] FUCHS E, MASOUM M A S. Power quality in power systems and electrical machines[M]. New York: Academic Press, 2011.
- [3] 肖湘宁, 徐永海, 韩民晓, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 潘从茂, 李凤婷. 基于小波变换的暂态电能质量的检测与识别[J]. 电测与仪表, 2013, 50(11): 69-72.
PAN Congmao, LI Fengting. Detection and identification of transient power quality based on wavelet transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(11): 69-72.
- [5] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34, 109.
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier

- transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34, 109.
- [6] 李立, 易吉良, 朱建林. 采用改进不完全 S 变换估计电能质量扰动参数[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 187-193.
LI Li, YI Jiliang, ZHU Jianlin. Detection method of power quality disturbances using incomplete S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 187-193.
- [7] 刘奇, 周维维, 卢伟国. 基于广义 S 变换的暂态电能质量扰动定位与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 60-65.
LIU Qi, ZHOU Luwei, LU Weiguo. Localization and identification of transient power quality disturbances based on generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 60-65.
- [8] 李文帆, 刘志刚, 孙婉璐. 基于 HHT 的电能质量检测系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 123-127.
LI Wenfan, LIU Zhigang, SUN Wanlu. Development of power quality detection system based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 123-127.
- [9] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR 电压暂降检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 234-239.
QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 234-239.
- [10] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆, 等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 44-47, 53.
ZHU Wei, TANG Yingjie, ZHOU Youqing, et al. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 44-47, 53.
- [11] 杨耿煌, 温渤婴. 基于量子行为粒子群优化 - 人工神经网络的电能质量扰动识别[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 123-129.
YANG Genghuang, WEN Boying. Identification of power quality disturbance based on QPSO-ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 123-129.
- [12] 苏卫卫, 马素霞, 齐林海. 基于 ARIMA 和神经网络的电能质量稳态指标预测[J]. 计算机技术与发展, 2014, 25(3): 163-167.
SU Weiwei, MA Suxia, QI Linhai. Steady-state power quality index prediction based on ARIMA and neural network[J]. Computer Technology and Development, 2014, 25(3): 163-167.
- [13] 李江, 王义伟, 魏超, 等. 卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 135-144.
LI Jiang, WANG Yiwei, WEI Chao, et al. A survey on the application of Kalman filtering method in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 135-144.
- [14] 王康宁, 王金浩, 徐龙, 等. 基于卡尔曼滤波的谐波检测分析[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(3): 188-192.
WANG Kangning, WANG Jinhao, XU Long, et al. Detection and analysis of harmonic based on Kalman filtering[J]. Computer Systems & Applications, 2015, 24(3): 188-192.
- [15] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.
LU Boyong, HUANG Wenqing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.
- [16] 党存禄, 张旭. 基于 Daubechies 小波族的电能质量信号去噪方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 5-9.
DANG Cunlu, ZHANG Xu. Research on denoising method of power quality signal based on Daubechies wavelet[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 5-9.
- [17] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
XIAO Xiangning, XU Yonghai. Analysis of power quality problems[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 66-69.
- [18] 吴兆刚, 李唐兵, 姚建刚, 等. 基于小波和改进神经树的电能质量扰动分类[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 86-92.
WU Zhaogang, LI Tangbing, YAO Jiangang, et al. Power quality disturbance classification based on wavelet and improved neural tree[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 86-92.

收稿日期: 2014-07-08; 修回日期: 2014-09-09

作者简介:

关维国(1973-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为功率因数校正技术、微电网检测与通信; E-mail: guanwei8@gmail.com

姚清志(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为功率因数校正技术; E-mail: 15084112420@163.com

高阳(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为移动通信与无线技术。E-mail: 906751820@qq.com

(编辑 张爱琴)