

DOI: 10.7667/PSPC170288

实时检测与定位电网电压瞬时波动的 Coiflets 小波方法

赵杰¹, 刘小靖^{2,3}, 胡仁芝⁴

(1. 国网甘肃省电力公司电力调度控制中心, 甘肃 兰州 730030; 2. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 4. 国电南瑞科技股份有限公司电网安全稳定控制技术分公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 提出了一种基于 Coiflets 小波的实时检测与精准定位电网电压瞬时波动的分析技术。该方法除保留了一般小波分析所具有的局部时频多分辨分析能力和快速算法外, 其顶层尺度分解系数就是电压信号的单点采样值, 无需通常方法中所需的数值积分运算, 有效减小了计算量, 显著缩短了分析时间, 增强了监控的实时性。通过定量研究 4 种典型的电网电压瞬时波动, 结果表明所给出的 Coiflets 小波分析技术能够精准地识别出各种电压波动, 其相对定位误差可达千分之一, 明显优于现有方法; 且其定位精度对电压波动的类型与幅值不敏感, 保证了实际运用中分析结果的可信度。

关键词: 电压瞬时波动; Coiflets 小波; 检测定位; 单点采样; 实时分析

A Coiflets wavelet method for real-timely detecting and locating transient surges of network voltage

ZHAO Jie¹, LIU Xiaojing^{2,3}, HU Renzhi⁴

(1. Control Center of Electric Power Dispatch, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China;
2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, the Ministry of Education, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China;
4. Branch of Security and Stability Control on Power Grid, NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A technique based on Coiflets wavelet analysis for real-timely detecting and locating transient surges of network voltage is proposed. Such a wavelet method holds both the ability in the local time-frequency multi-resolution analysis and the fast algorithm for general wavelet method. Most interesting, the top-level scale coefficient is exactly the single-point sampling value of voltage signal, with no need for numerical integration required in general wavelet method. This operation can effectively reduce the calculation amount, save the consuming time, and improve real-time performance. By quantitatively studying four typical kinds of transient surges of network voltage, the results demonstrate that the proposed wavelet method is capable of accurately identifying various transient surges of network voltage, and the relative error of location can reach one thousand which is obviously better than that of existing methods. More important, this accuracy of location is insensitive to the type and amplitude of voltage surge, leading to an excellent reliability of analysis result in the practical application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11502103).

Key words: transient surges of voltage; Coiflets; detecting and locating; single point sampling; real-time analysis

0 引言

工业生产与日常生活中, 诸多先进电器设备和高尖端电子产品的稳定运行都依赖于良好的电能质量, 尤其是稳定的电压^[1-5]。电网电压的过大波动将

导致这些设备运转异常, 甚至永久损坏, 造成难以估量的经济损失乃至人员伤亡^[1-5]。然而电网中由于不可避免地存在各种难以预测的扰动, 导致电压通常处于动态波动之中^[3-8]。因此, 为保证电网及各种电器设备的安全运行必须对电压加以实时监测, 并在必要时采取保护措施^[7-10]。此外, 为分析电压异常波动的原因, 进而优化电网结构, 还需对波动发生的时刻进行精准定位^[7-10]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11502103); 工业装备结构分析国家重点实验室开放基金项目 (GZ15115)

目前, 对电网电压瞬时波动的常用监测技术有短时傅里叶变换^[5]、S 变换^[6-7]、Hilbert 变换^[8]以及小波变换^[9-17]等^[1-2,18]。这些方法虽在一定程度上能满足工程应用的需求, 但也都存在各自的局限^[1-18]。如短时傅里叶变换因窗口函数不能随频率自适应调整, 有可能对某些电压瞬时波动产生误判^[5,10]。S 变换运算量过大, 难以用于实时监测系统^[6-7,10]。Hilbert 变换存在模态混叠和端点效应等问题^[8,10]。因此, 近 20 年来发展起来的小波变换技术引起了大家广泛的兴趣^[9-18], 由于其具有良好的时频分辨率且拥有类似于快速傅里叶变换的快速小波算法^[19], 所以各种基于小波分析的电能质量检测技术被先后开发了出来^[9-18]。在这些小波分析技术中, 绝大部分都采用了 Daubechies 小波^[9-18]。虽然 Daubechies 小波是一族性能非常优良的正交小波, 其在时域与频域上均具有适当的紧支撑, 从而提供了强大的时频分辨能力^[18-19], 并且 Daubechies 小波还具有被称之为金字塔算法的快速分解算法, 计算效率极高^[18-19]。但 Daubechies 小波不具有插值性, 导致在变换中顶层分解系数需通过数值积分获得, 这一方面降低了分析精度, 同时也显著增加了运算量, 不利于分析的实时性^[18-20]。

针对 Daubechies 小波在信号分析中的局限, Daubechies 应 Coifman 之请建立了 Coiflets 小波^[19]。这是一族建立在 Daubechies 小波基础之上的正交小波, 其具有 Daubechies 小波的所有优良性质, 如正交性、时频紧支撑、光滑性、适用小波快速算法等^[19-20], 并且 Coiflets 小波的尺度函数还具有准插值性, 所以其尺度展开系数可通过对信号进行单点采样直接获得, 避免了 Daubechies 小波分析中所需的数值积分运算^[20]。鉴于此, 本文致力于研究基于 Coiflets 小波的电网电压瞬时波动的实时检测与定位技术, 建立对应的检测定位程序, 并通过仿真算例定量研究其有效性。

1 Coiflets 小波及其性质

Coiflets 小波是 Daubechies 应 Coifman 之请所建立的一族具有准插值性的正交小波^[19], 其在保留 Daubechies 小波所有性质的基础上, 进一步要求尺度函数具有一定的广义消失距, 即具有 N 阶消失距的 Coiflets 小波的尺度函数 $\phi(x)$ 和小波函数 $\psi(x)$, 满足如下基本性质^[19-20]。

(a) 双尺度关系

$$\begin{cases} \phi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{3N-1} p_k \phi(2x-k) \\ \psi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{3N-1} (-1)^k p_{3N-1-k} \phi(2x-k) \end{cases} \quad (1)$$

(b) 正交性

$$\begin{cases} \int \phi_{j,k}(x) \phi_{l,n}(x) dx = \delta_{j,l} \delta_{k,n} \\ \int \psi_{j,k}(x) \psi_{l,n}(x) dx = \delta_{j,l} \delta_{k,n} \\ \int \phi_{j,k}(x) \psi_{l,n}(x) dx = \delta_{j,l} \delta_{k,n} \end{cases} \quad (2)$$

(c) 小波函数消失距

$$\int x^n \psi(x) dx = 0, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

(d) 尺度函数消失距

$$M_n = \int (x - M_1)^n \phi(x) dx = \delta_{0,n}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中: $\phi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \phi(2^j x - k)$; $\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)$; δ_{ij} 为狄拉克函数; p_k 为低通滤波系数; M_n 为尺度函数 $\phi(x)$ 的第 n 阶广义矩。从式(1)一式(3)可以看出, Coiflets 小波除保留了 Daubechies 小波所具有的双尺度关系式(1)、正交性式(2)和光滑性式(3)外, 其尺度函数 $\phi(x)$ 还具有一定的广义消失距式(4)。为使得 Coiflets 小波在 Daubechies 小波的基础上额外满足性质式(4), 前者的滤波系数 p_k 由后者的 $2N$ 个增加到了 $3N$ 个, 对应的尺度函数和小波函数的紧支集也由 $[0, 2N-1]$ 增大到了 $[0, 3N-1]$ 。

将双尺度关系式(1)分别代入式(2)一式(4)即可获得关于滤波系数 p_k 的非线性代数方程组, 求解该方程组即可获得滤波系数, 详细过程可参考文献[20]所给出的构建 Coiflets 小波的一般方法。本文基于此方法具体建立了消失距 $N=4$, 尺度函数一阶矩 $M_1=5$ 的 Coiflets 小波, 其滤波系数见表 1。同样基于文献[20]所给出的关于计算尺度函数在整数点上的值的方法, 表 2 给出了该 Coiflets 小波尺度函数在整数点上的值。在此基础上, 通过迭代运用尺度函数的双尺度关系式(1)即可获得其在所有二分点上的值, 进一步运用小波函数的双尺度关系式(1), 则可获得小波函数在所有二分点上的值, 图 1 分别给出了 $N=4$ 和 $M_1=5$ 的 Coiflets 小波的尺度函数和小波函数。同时为进一步研究该小波的频率分解特性, 图 2 给出了其尺度函数和小波函数的频谱。

表 1 $N=4$ 和 $M_1=5$ 时 Coiflets 小波的系数 p_k

Table 1 Coefficient p_k of Coiflets wavelet with $N=4$ and $M_1=5$

| k | p_k | k | p_k |
|-----|-----------------------|-----|-----------------------|
| 0 | 3.67971131364147E-02 | 6 | 2.38059669115279E-01 |
| 1 | -6.70045345967957E-03 | 7 | -4.18418103608398E-02 |
| 2 | -1.93465866829234E-01 | 8 | 9.35901149918644E-04 |
| 3 | 1.53612098054586E-02 | 9 | 3.90619626733592E-02 |
| 4 | 6.26863205073584E-01 | 10 | -2.08324045941577E-03 |
| 5 | 7.12666476561508E-01 | 11 | -1.14406040332596E-02 |

表 2 尺度函数 $\phi(x)$ 在整数点上的值Table 2 Value of scaling function $\phi(x)$ at integer points

| x | $\phi(x)$ | x | $\phi(x)$ |
|-----|-----------------------|-----|-----------------------|
| 0 | 3.67971131364147E-02 | 6 | 2.38059669115279E-01 |
| 1 | -6.70045345967957E-03 | 7 | -4.18418103608398E-02 |
| 2 | -1.93465866829234E-01 | 8 | 9.35901149918644E-04 |
| 3 | 1.53612098054586E-02 | 9 | 3.90619626733592E-02 |
| 4 | 6.26863205073584E-01 | 10 | -2.08324045941577E-03 |
| 5 | 7.12666476561508E-01 | 11 | -1.14406040332596E-02 |

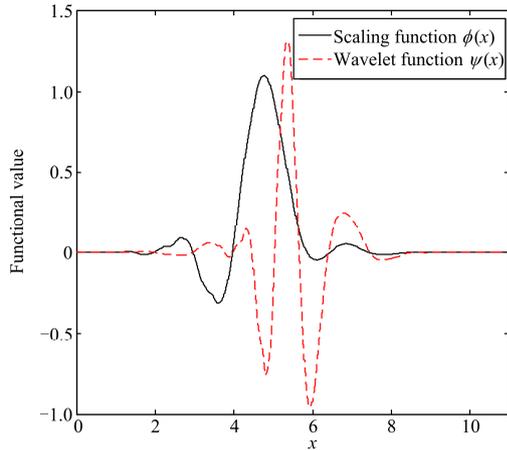
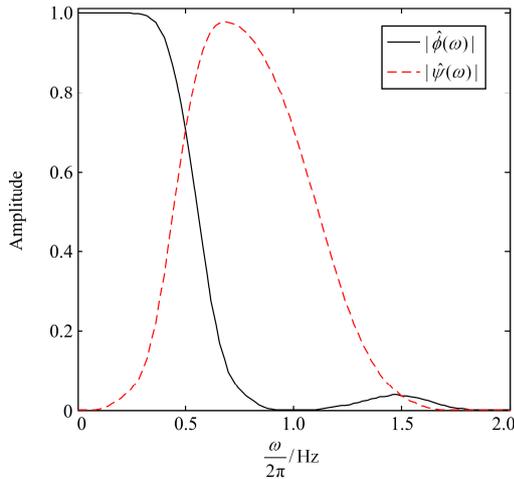
图 1 尺度函数 $\phi(x)$ 和小波函数 $\psi(x)$ Fig. 1 Scaling function $\phi(x)$ and wavelet function $\psi(x)$ 

图 2 尺度函数和小波函数的频谱

Fig. 2 Frequency spectrums of scaling and wavelet functions

从图 1 和图 2 可以看出, Coiflets 小波在时域与频域均具有紧支性, 这使得小波既可以在时域对信号进行局部定位, 同时也可以在频域对其进行定位。这一点区别于只具有频域定位能力的傅里叶变换, 由于傅里叶变换定义在全时间区域上, 所以其完全丧失了对信号进行时域定位的能力^[5]。故而对于信

号的突变问题, 傅里叶变换只能识别出是否发生了突变, 而无法检测到突变的具体位置。

此外, 从图 2 中还可以看出, 小波的尺度函数具有低通滤波特性, 即尺度部分描述的是信号的低频成分, 而小波函数则具有高通滤波特性, 即小波部分表征着信号的高频成分。正是基于小波分解的这一特性, 可以运用小波分解来实现对平稳信号突变点的检测与定位。具体来说, 对于一平稳信号, 如果尺度部分的频谱覆盖了信号的频率区间, 则对应的小波部分会接近于零。但若信号在某一时刻发生突变, 由于突变点附近必定存在高频成分, 因此分解后刻画高频成分的小波部分则不再为零。由此, 通过对信号进行小波变换后, 再直接检测其小波分量的大小, 即可识别出信号的突变。

2 小波快速分解算法及突变检测原理

基于正交小波多分辨分析, 任意平方可积信号 $f(t)$ 可以表征为^[19]

$$f(t) = P_j f(t) + \sum_{n \geq j} Q_n f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{n \geq j} \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{n,k} \psi_{n,k}(t) \quad (5)$$

其中尺度系数和小波系数分别为

$$c_{j,k} = \int f(t) \phi_{j,k}(t) dt, \quad d_{n,k} = \int f(t) \psi_{n,k}(t) dt \quad (6)$$

同时根据小波分析的金字塔分解算法有^[19]

$$c_{j,k} = \sum_{n=0}^{3N-1} p_n c_{j+1, n+2k}, \quad d_{j,k} = \sum_{n=0}^{3N-1} (-1)^n p_{3N-1-n} c_{j+1, n+2k} \quad (7)$$

由式(7)可知, 在获得了顶层的尺度系数后, 其余分解系数就可通过式(7)所定义的金字塔算法快速求解, 而无需再计算式(6)所定义的积分。但是对于通常的正交小波, 典型的如 Daubechies 小波, 其顶层的尺度系数依然需要通过计算式(6)所定义的积分获得, 这将消耗大量计算量和分析时间, 在实时系统里往往是无法接受的。但若采用前述所介绍的 Coiflets 小波, 由于其尺度函数具有准插值性, 所以其尺度系数可以通过单点采样获得, 即有^[19-20]

$$c_{j,k} \approx 2^{-j/2} f\left(\frac{M_1+k}{2^j}\right) \quad (8)$$

对比式(6)和式(8)不难发现, 采用 Coiflets 小波后, 在计算尺度系数上可以减少非常可观的计算量, 缩短分析时间, 而这种快速分析能力正是实时系统所必需的。并且式(8)的精度也已被证明其不会影响到整体分解的精度^[21-22], 但必须注意式(8)的采样格式只适用于获得顶层的尺度系数, 而其他尺度系数依然需由式(7)给出, 否则由于在底层采样频率过低会造成较大的混淆误差^[22]。

为进一步探讨小波分解在频域上的特征, 对式(5)进行傅里叶变换可得

$$\hat{f}(\omega) = P_j \hat{f}(\omega) + \sum_{n \geq j} \hat{Q}_n f(\omega) = 2^{-j/2} \sum_{k \in Z} c_{j,k} e^{-i\omega k / 2^j} \hat{\phi}\left(\frac{\omega}{2^j}\right) + \sum_{n \geq j} 2^{-n/2} \sum_{k \in Z} d_{n,k} e^{-i\omega k / 2^n} \hat{\phi}\left(\frac{\omega}{2^n}\right) \quad (9)$$

结合式(9)和图2可以看出, $P_j f(t)$ 描述着信号的低频成分, 而 $Q_n f(t)$ 则表征着信号的高频成分。所以若选择合适的基准尺度 j , 以使得 $P_j f(t)$ 足以完全描述平稳信号, 则此时 $Q_n f(t) \approx 0$ 。而当此平稳信号存在突变时, 在突变点附近必将产生高频信息, 此时 $Q_n f(t)$ 将不再为零。虽然 $Q_n f(t)$ 、 $n \geq j$ 均不会为0, 但实际应用中只需检测 $Q_j f(t)$ 即可, 而且根据小波理论, $|Q_j f(t)|$ 的最大值所对应的时刻即为突变发生时刻。

关于基准分解尺度 j 的选取, 从图2可以看出, 在频率小于0.25 Hz时, 尺度函数 $\phi(t)$ 可以实现99%以上的覆盖, 此时对应的小波部分将会接近于0。同时根据式(9)可得 $P_j f(t)$ 覆盖的频率范围为 $\phi(t)$ 的 2^j 倍, 因此其可以对 $0.25 \times 2^j = 2^{j-2}$ Hz范围内的信号实现99%以上的覆盖, 所以在具体的操作中选择这样的基准尺度 j , 使频率 $[0, 2^{j-2}]$ Hz 至少覆盖住被检测信号的主频。

3 电网电压瞬时波动的检测程序

基于上一节所给出的小波多分辨分析算法及信号突变检测原理, 并结合我国电网特征, 电网电压瞬时波动的检测与定位程序总结如下。

(1) 采样。选取适当的采样频率 2^J , 基于式(8)直接通过采样获得 J 尺度的尺度系数 $c_{J,k} = 2^{-J/2} f[2^{-J}(M_1+k)]$ 。关于采样频率 2^J , 根据上一节的讨论, 并考虑到电网稳定频率为50 Hz, 参数 J 需满足 $J \geq 9$ 。同时基于小波基础理论可知, 随着 J 的增大, 对波动点的定位精度就越高, 但数据分析量也会相应增大, 所以要根据精度的实际需求合理选取。

(2) 分解。基于式(7)计算 $J-1$ 尺度的小波系数 $d_{J-1,k}$ 。

(3) 重构。基于式(5)重构 $J-1$ 尺度的小波分量 $Q_{J-1} f(t)$, 注意到小波函数 $\psi(x)$ 的紧支集为 $[0, 3N-1]$, 所以重构任意时刻点小波分量的总计算量不超过 $3N-1$ 次加法和乘法。

(4) 检测。当小波分量的绝对值 $|Q_{J-1} f(t)|$ 在某一时刻超过预设阈值 D_c 时, 即代表电压发生了波动, 而 $|Q_{J-1} f(t)|$ 在这一时刻附近的局部最大值所对应的

时刻即为电压波动发生时刻。关于阈值 D_c 的确定需根据采样频率 2^J 和所允许的电压幅值波动范围确定, 具体可通过分析典型的电压波动工况确定。

上述给出了检测我国电网电压瞬时波动的具体程序, 并讨论了所有参数的确定方法。从中可以看出, 本文所提出的 Coiflets 小波检测方法由于具有准插值性, 所以其顶层尺度系数可以直接由采样获得, 而无需像其他方法那样需通过数值积分获得, 有效减少了数据分析量, 显著缩短了分析时间。

4 仿真验证

为检验上述检测和定位电压波动技术的有效性, 这里研究表3中所给出的4种典型的电网电压瞬时波动, 并详细讨论采样频率 2^J 与定位精度之间的关系。

表3 四种典型的电网电压瞬时波动

Table 3 Four typical kinds of transient surge of network voltage

| 波动种类 | 特征描述 |
|------|--|
| 电压暂降 | 在0.16~0.24 s电压幅值由220 V下降至154 V, 持续4个周期, 幅值下降30%。 |
| 电压中断 | 在0.16~0.24 s电压幅值由220 V下降至0 V, 持续4个周期, 幅值下降100%。 |
| 瞬时脉冲 | 分别在0.17 s和0.25 s处电压幅值由220 V突升至330 V, 分别持续时间0.001 s(1/20个周期)。 |
| 电压暂升 | 在0.16~0.24 s电压幅值由220 V升高至242 V, 持续4个周期, 幅值升高10%。 |

图3—图5分别给出了电压暂降、电压中断、瞬时脉冲这3种电压波动的初始电压波形 $f(t)$ 及采样频率 2^J , $J=10, 11$ 和12时的小波分量 $Q_{J-1} f(t)$ 。从图3—图5可以看出, 对于上述3种电网电压瞬时波动, 本文所建议的 Coiflets 小波方法可以非常有效地进行识别与定位, 并且随着采样频率 2^J 的升高, 小波分量 $Q_{J-1} f(t)$ 在平稳区间的波动就越小, 突变处标识的就越清晰。为进一步定量研究本文所提方法的定位精度, 表4—表6分别给出了这3种工况下的实测数据, 并与使用消失矩同样为4阶的 Daubechies 小波方法所获得的测量值^[14]进行了对比。从表中可以看出, 本文所提出的 Coiflets 小波分析技术对电网电压的瞬时波动具有优良的定位精度。在采样频率约为4 kHz时, 突变定位的相对误差可达千分之一, 明显优于采样频率为5 kHz时 Daubechies 小波方法的定位精度^[14]。此外, 还可以看出, 随着采样频率的提高, 定位精度也在逐步提高。如对于电压暂降工况, 从表4中可以看出, 当采样频率从1.024 kHz提高到4.096 kHz时, 起始时

刻的相对定位误差从 0.713%减小到了 0.103%，降低了约 86%，且后者不足 Daubechies 小波方法的一半。

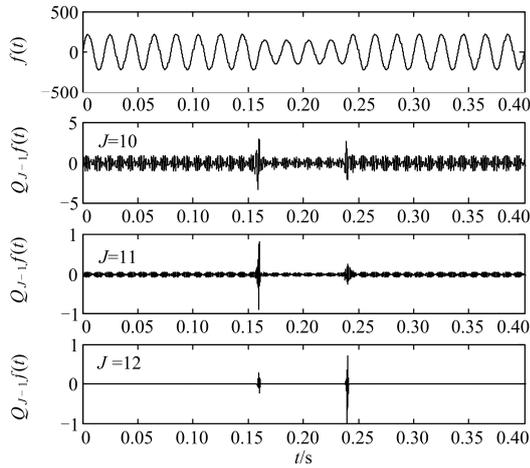


图 3 电压暂降工况下的电压波 $f(t)$ 及其小波分量 $Q_{J-1}f(t)$
Fig. 3 Voltage wave $f(t)$ and its wavelet component $Q_{J-1}f(t)$ for the case of voltage sag

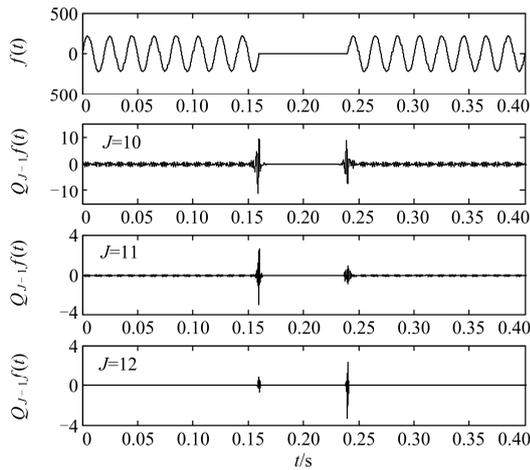


图 4 电压中断工况下的电压波 $f(t)$ 及其小波分量 $Q_{J-1}f(t)$
Fig. 4 Voltage wave $f(t)$ and its wavelet component $Q_{J-1}f(t)$ for the case of voltage interruption

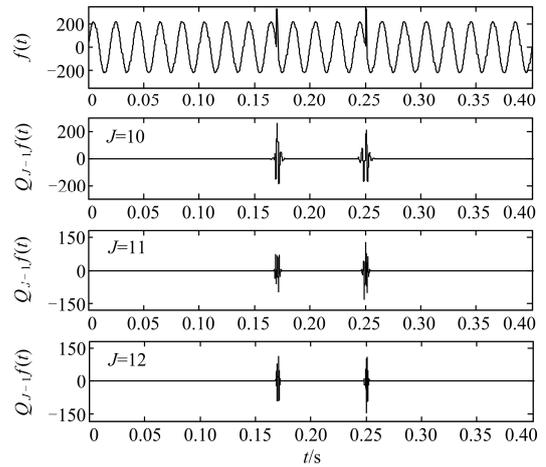


图 5 瞬时脉冲工况下的电压波 $f(t)$ 及其小波分量 $Q_{J-1}f(t)$
Fig. 5 Voltage wave $f(t)$ and its wavelet component $Q_{J-1}f(t)$ for the case of transient impulse

考虑到前述 3 种工况的电压波动幅值都超过了 30%，为检验所提方法对小幅度电压波动的检测与定位能力，图 6 和表 7 给出了电压波动幅值仅为 10% 的电压暂升工况的分析结果。从中可以看出，当电压波动幅值为 10%，采样频率为 1.024 kHz 时，当前方法将丧失对波动的检测能力，但随着采样频率的提高，所提方法依旧可以非常准确地检测到电压波动，且定位精度同样可达千分之一。同时对比表 4—表 7 可以发现，在较低的采样频率下，本文所提出的 Coiflets 小波方法虽然有可能丧失对某些小幅度波动的检测能力，但只要其能检测到波动，定位精度就与波动的类型和幅值基本无关，这一特性可以非常有效地避免误判。因为从图 6 中可以看出，判断该技术能否检测出波动是极其容易的，但要判断实际应用中一种方法的定位精度则是几乎不可能的，而当前方法所具有的定位精度对波动类型与波动幅值不敏感的特性则为评估实际应用中的定位精度提供了可能，故而在应用中具有重大的实用价值，可有效避免对电压波动时刻的误判。

表 4 电压暂降工况下的瞬时波动测量值

Table 4 Measured values of transient surge for the case of voltage sag

| 检测方法 | Coiflets | | | | | | Daubechies ^[14] | |
|------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | 2 ¹⁰ =1.024 kHz | | 2 ¹¹ =2.048 kHz | | 2 ¹² =4.096 kHz | | 5.000 kHz | |
| 评估项目 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 |
| 起始时刻 | 0.1589 | 0.713% | 0.1595 | 0.303% | 0.1598 | 0.103% | 0.1596 | 0.250% |
| 结束时刻 | 0.2390 | 0.430% | 0.2406 | 0.257% | 0.2399 | 0.036% | 0.2402 | 0.083% |
| 持续时间 | 0.0801 | 0.136% | 0.0811 | 1.376% | 0.0801 | 0.098% | 0.0806 | 0.750% |

表 5 电压中断工况下的瞬时波动测量值

Table 5 Measured values of transient surge for the case of voltage interruption

| 检测方法 | Coiflets | | | | | | Daubechies ^[14] | |
|------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|----------------------------|--------|
| | $2^{10}=1.024$ kHz | | $2^{11}=2.048$ kHz | | $2^{12}=4.096$ kHz | | 5.000 kHz | |
| 评估项目 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 |
| 起始时刻 | 0.1589 | 0.703% | 0.1595 | 0.303% | 0.1598 | 0.103% | 0.1600 | 0.000% |
| 结束时刻 | 0.2390 | 0.436% | 0.2406 | 0.257% | 0.2399 | 0.036% | 0.2402 | 0.083% |
| 持续时间 | 0.0801 | 0.098% | 0.0811 | 1.376% | 0.0801 | 0.098% | 0.0802 | 0.250% |

表 6 瞬时脉冲工况下的瞬时波动测量值

Table 6 Measured values of transient surge for the case of transient impulse

| 检测方法 | Coiflets | | | | | | Daubechies ^[14] | |
|------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|----------------------------|--------|
| | $2^{10}=1.024$ kHz | | $2^{11}=2.048$ kHz | | $2^{12}=4.096$ kHz | | 5.000 kHz | |
| 评估项目 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 |
| 第一脉冲 | 0.1718 | 1.040% | 0.1713 | 0.744% | 0.1708 | 0.493% | 0.1696 | 0.230% |
| 第二脉冲 | 0.2518 | 0.732% | 0.2494 | 0.256% | 0.2497 | 0.128% | 0.2508 | 0.320% |

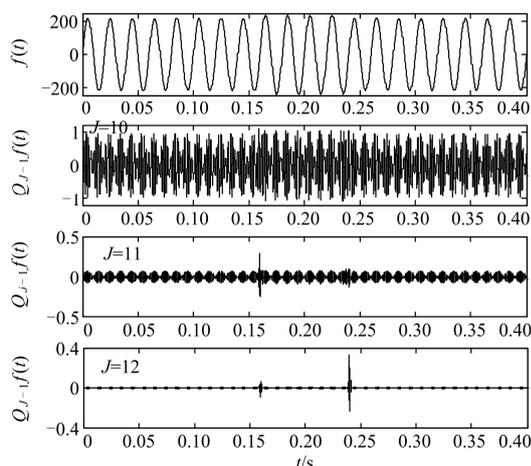
图 6 电压暂升工况下的电压波 $f(t)$ 及其小波分量 $Q_{J-1}f(t)$ Fig. 6 Voltage wave $f(t)$ and its wavelet component $Q_{J-1}f(t)$ for the case of voltage rise

表 7 电压暂升工况下的瞬时波动测量值

Table 7 Measured values of transient surge for the case of voltage rise

| 采样频率 | $2^{11}=2.048$ kHz | | $2^{12}=4.096$ kHz | |
|------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | 实测值/s | 相对误差 | 实测值/s | 相对误差 |
| 起始时刻 | 0.1595 | 0.303% | 0.1598 | 0.103% |
| 结束时刻 | 0.2406 | 0.257% | 0.2399 | 0.036% |
| 持续时间 | 0.0811 | 1.376% | 0.0801 | 0.098% |

5 结论

本文基于 Coiflets 小波分析给出了一种快速检测与精准定位电网电压瞬时波动的方法。该技术除保留了局部时频识别和快速算法等一般小波方法所具有的优点外, 其顶层分解系数可以通过单点采样

直接获得, 从而有效地减小了数据分析量。4 组定量仿真结果表明, 该 Coiflets 小波分析技术可以准确地检测到各种电网电压瞬时波动, 且对不同类型和幅值电压波动的相对定位误差均可达千分之一。此外, 如需进一步识别电压波动的类型, 可通过分析相应的小波分量特征来实现。

参考文献

- [1] MAHELA O P, SHAIK A G, GUPTA N. A critical review of detection and classification of power quality events[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 495-505.
- [2] AUGUSTINE A, PRAKASH R D, XAVIER R, et al. Review of signal processing techniques for detection of power quality events[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 9(2): 364-370.
- [3] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2
- [4] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 146-154. ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 146-154.
- [5] WRIGHT P S. Short-time Fourier transforms and Wigner-Ville distributions applied to the calibration of power frequency harmonic analyzers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1999, 48(2): 475-478.
- [6] HE S, LI K, ZHANG M. A real-time power quality disturbances classification using hybrid method based on

- S-transform and dynamics[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62(9): 2465-2475.
- [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] SHUKLA S, MISHRA S, SINGH B. Empirical-mode decomposition with Hilbert transform for power-quality assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2159-2165.
- [9] RAHMANI B, LI W, LIU G. A wavelet-based unified power quality conditioner to eliminate wind turbine non-ideality consequences on grid-connected photovoltaic systems[J]. Energies, 2016, 9(6): 390.
- [10] 曹玲芝, 李振杰. 基于 dq 变换与小波多分辨率分析的电力系统暂态复合扰动信号检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 138-143.
CAO Lingzhi, LI Zhenjie. Detection of transient complex disturbance signal in power system based on dq transform and wavelet-multiresolution analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 138-143.
- [11] BARROS J, DIEGO R I, APRÁIZ M. Applications of wavelets in electric power quality: voltage events[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 88: 130-136.
- [12] AUGUSTINE A, PRAKASH R D, XAVIER R. Detection and classification of three phase power quality events using wavelets transforms and soft computing techniques[J]. Journal of Telematics and Informatics, 2016, 4(1): 32-38.
- [13] OLAJIDE O M, JOHN O O. Detection and classification of real-time power quality event using discrete wavelet transform and support vector machine[J]. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2016, 7(2): 835-838.
- [14] 关维国, 姚清志, 高阳, 等. 基于 db4 小波的配电网暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 102-106.
GUAN Weiguo, YAO Qingzhi, GAO Yang, et al. Transient power quality detection and location of distribution network based on db4 wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 102-106.
- [15] NATH S, DEY A, CHAKRABARTI A. Detection of power quality disturbances using wavelet transform[J]. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2009, 3(1): 78-82.
- [16] JAYASREE T, RAGAVI M S, SAROJINI R, et al. Analysis of power quality disturbances using DWT and artificial neural networks[J]. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 2016, 5(4): 1191-1196.
- [17] KANIRAJANA P, KUMARBA V S. Power quality disturbance detection and classification using wavelet and RBFNNP[J]. Applied Soft Computing, 2015, 35: 470-481.
- [18] KUMAR V, GAWRE S K, KUMAR T. Power quality analysis using wavelet transform: a review[J]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2014, 3(3): 130-136.
- [19] MEYER Y. Wavelets and operators[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [20] 王记增. 正交小波统一理论与方法及其在压电智能结构等力学研究中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2001.
WANG Jizeng. Generalized theory and arithmetic of orthogonal wavelets and applications to researches of mechanics including piezoelectric smart structures[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2001.
- [21] LIU X, ZHOU Y, ZJANG L, et al. Wavelet solutions of Burgers' equation with high Reynolds numbers[J]. Science China: Technological Sciences, 2014, 57(7): 1285-1292.
- [22] 刘小靖. 非线性问题统一求解的小波方法及其在大变形柔韧结构定量研究中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
LIU Xiaojing. A wavelet method for uniformly solving nonlinear problems and its application to quantitative research on flexible structures with large deformation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.

收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-04-02

作者简介:

赵杰(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及安全稳定控制; E-mail: gszhaojie@126.com

刘小靖(1986—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为小波分析; E-mail: liuxiaojing@lzu.edu.cn

胡仁芝(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网安全稳定分析与控制。E-mail: hurenzhi@126.com

(编辑 魏小丽)