

DOI: 10.7667/PSPC170405

# 风电接入的电力系统电能质量扰动的检测与定位

欧阳波, 易灵芝, 何巨龙, 冯江

(湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** 风能的波动性、间歇性和随机性等特性使接入风电的电力系统运行特性和电能质量受到复杂的影响。针对风电接入的电力系统电能质量扰动问题, 重点研究电能质量扰动的小波检测方法, 提出了基于 Euclidean 分解算法的 db4 复小波的提升方案。通过 Euclidean 分解算法得到复小波提升方案, 求取了 db4 复小波自适应提升因子并构建了分解与重构模型, 对扰动信号和基波分量进行提升变换后得到幅值和相位信息分别作差。利用幅值差和相位差来确定扰动的幅度和时间, 并根据扰动段的幅值差和相位差值实现了扰动起止时刻定位。基于 Matlab 的仿真结果表明, 与复小波相比, 该方法能进一步提高风电接入电力系统电能质量扰动信号定位的速度和精度。

**关键词:** 风电接入; 复小波提升方案; 电能质量扰动检测与定位; 自适应提升因子

## Detection and localization of power quality disturbance for power system connected with wind energy generation

OUYANG Bo, YI Lingzhi, HE Julong, FENG Jiang

(College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** The operation characteristics and power quality of power system are affected by the properties of wind power generation such as fluctuation, intermittence, randomness, and so on. Aiming at the problems of power quality disturbance for wind energy integrated power system, this paper mainly researches the wavelet detection method of power quality disturbance, and proposes the lifting scheme of db4 complex wavelet based on the Euclidean decomposition principle. The Euclidean decomposition principle is used to obtain complex wavelet lifting scheme, the db4 adaptive lifting factor of complex wavelet is calculated, and the decomposition model and the reconstruction model are built. By lifting and transforming disturbance signal and fundamental component, the differences of the amplitude and phase are obtained which can be used to determine the disturbance amplitude and time and then realize the location of disturbance start-stop moment. Compared with complex wavelet, the simulation results based on Matlab show that the proposed algorithm further enhances the speed and accuracy of power quality disturbance location for wind energy integrated power system.

This work is supported by Hunan Province Natural Science Foundation of Zhuzhou United Foundation (No. 2016JJ5033).

**Key words:** wind energy integrated; lifting scheme based on complex wavelet; detection and localization of power quality disturbance; adaptive lifting factor

## 0 引言

在能源问题日趋严重的今天, 风能被人们越来越广泛地利用, 大规模风电场接入电网已成为发展趋势。风电接入时给电力系统带来了许多电能质量

问题, 如谐波、电压暂升、电压暂降、电压中断、脉冲暂态和振荡暂态等<sup>[1]</sup>。为保证电网系统安全、可靠地运行, 必须采取措施改善风能接入时的电能质量, 而对这些扰动信号进行实时、有效地检测和定位, 是进行电能质量动态补偿的前提<sup>[2]</sup>。

在实际中, 电能质量问题分为稳态和暂态两种。为了准确检测电能质量扰动, 达到改善电能质量的目的, 国内外学者研究提出了很多方法, 如 S

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金(2016JJ5033); 深圳市基础布局项目(JCYJ20160429112213821)

变换<sup>[3]</sup>、短时傅里叶变换(STFT)<sup>[4]</sup>和小波变换<sup>[5]</sup>等。小波变换具有良好的时频局部化性质,对信号的奇异点敏感,适合分析和检测时变的非平稳信号。文献[6]提出小波变换与改进的 Prony 算法相结合的方法,通过选取合适的小波函数对扰动信号进行分解,判断分解信号是否存在模极大值点来对稳态与暂态电能扰动区分,并对扰动信号进行了识别,该方法精度高,能满足电力系统对扰动的检测要求,但是此方法计算量大,检测速度较慢。文献[7]针对暂态电能扰动持续时间短、变化速率快的特点,给出基于 db4 小波变换的暂态电能扰动检测方法,但在工程应用的实时性方面不能满足要求。文献[8]提出一种 dq 变换结合小波多分辨率分析的暂态电能质量检测方法,对暂态电能质量的复合扰动信号进行检测和定位,但此方法计算复杂、不利于实际应用。文献[9]对不同电能质量扰动信号的数值特征值进行了计算,并结合线性分类器对电能质量扰动信号进行识别,但是其识别正确率还有待提高。此外电能质量扰动检测还有人工神经网络分析法<sup>[10]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[11]</sup>、广义 S 变换与 PSO-PNN 分析法<sup>[12]</sup>、小波熵数值与支持向量机相结合<sup>[13]</sup>等分析方法。随着小波变换研究的不断深入,小波函数既可以是实数又可以是复数,复数小波变换在定位能力和算法效率上更具有优势,并被广泛引入用于电能质量扰动分析的检测与定位。文献[14]提出基于复小波相位信息的电能质量扰动的检测、定位与分类,然而,复小波变换属于传统小波变换,在检测高频扰动方面很有优势,但对于低频扰动,如电压暂降、电压暂升等,却不能很好地检测和定位,同时存在计算复杂、不利于实际应用和依靠傅里叶变换频域分析的缺点<sup>[15]</sup>。在实际电力系统中,电能质量扰动信号往往不是理想的单一扰动,而是以复合扰动形式存在,传统的模式识别框架下,各种扰动类别之间基本上是互斥和独立的,由于特征量的相互重叠和交叉,会给检测和分类带来极大的困难<sup>[16]</sup>。为解决这些问题,Sweldens 提出了一种新的小波构造方法——提升算法,将提升算法引入复小波变换中,实现复小波变换的提升过程,既能包含复小波的相位信息又具有提升算法的计算速度的优点。文献[17]提出了利用 db3 复小波的提升方案用于暂态电能质量扰动的检测,但并未涉及扰动信号的分类,且文中只对电能质量的单一扰动进行了检测与定位,对复合扰动的检测与定位没有提及。文献[18]将 Daubechies 系列中的 db3、db4 和 db12 三种正交小波应用于电压暂降扰动的检测与定位,对其结果进

行比较显示,db4 小波检测扰动信号效率最高、速度最快。

目前,对风电接入的电力系统稳态电能质量的关注度比较高,而对暂态电能质量的关注度较低;对电能质量的单一扰动关注度比较高,而对电能质量的复合扰动关注度较低。本文针对风电接入的电力系统存在的电能质量的扰动信号检测问题,利用欧几里德分解算法设计 db4 复小波的提升方案,求取了 db4 复小波自适应提升因子并构建了解与重构模型,对扰动信号和基波分量进行提升变换后得到幅值和相位信息分别作差,利用幅值差和相位差来确定扰动的幅度和时间,并根据扰动段的幅值差和相位差值实现了扰动起止时刻定位。

## 1 风电并网电能质量问题

大规模风电接入除了引起电网电压波动、闪变和谐波等稳态问题外,还产生暂态问题,主要有电压暂升(降)、电压中断和脉冲、振荡暂态,其中引起的暂时电能质量问题主要有电压波动和电磁暂态<sup>[19]</sup>。风电并网给电力系统带来谐波的途径主要有两种。一种是风机本身配备的电力电子装置可能带来谐波问题;另一种是风机的并联补偿电容器可能和线路电抗发生谐振,在实际运行中,曾经观测到在风电场出口变压器的低压侧产生大量谐波的现象。

风力发电系统突然启停引起的电压暂降是造成短时电压波动的主要原因。风电并网运行时,风速跳跃性变动会导致风电机组输出功率波动变化幅度大,这样流入电网则会导致电网内功率的短时失衡,造成短时电压波动。风电场引发电磁暂态问题的原因也有很多,主要是由于风电并网造成的冲击,其次是风电场遭受的雷电波也会造成电磁暂态,还有风电环节产生的谐波和短路故障等。

## 2 提升复小波变换的基本原理

### 2.1 提升算法

提升格式算法的过程一般分为三个主要步骤,包括分解(Split)、预测(Predict)和更新(Update),如图 1 所示。

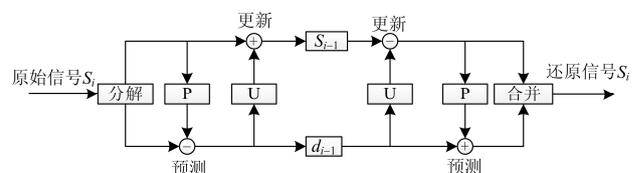


图 1 提升格式的前向和逆向环节

Fig. 1 Forward and reverse link of lifting format

设输入原始信号为  $S_i$ , 以下具体说明提升格式的三个阶段。

(1) 分解: 通常采用 lazy 的分割方法, 将一个序列分割为偶数序列和奇数序列。将输入原始信号  $S_i$  分割为两个子集, 称之为偶数序列  $S_{i-1}$  和奇数序列  $d_{i-1}$ , 表示为  $s_{i-1} = s_i(2k)$ ,  $d_{i-1} = s_i(2k+1)$ ,  $k \in Z$ 。

(2) 预测: 根据偶数序列  $S_{i-1}$  预测奇数序列  $d_{i-1}$ , 其预测的误差值代替原来的奇数序列  $d_{i-1}$ , 表示为  $d_{i-1} = d_{i-1} - p(s_{i-1})$ ,  $k \in Z$ , 式中  $p(s_{i-1})$  为预测算子。

(3) 更新: 利用(2)中的预测误差对偶数序列  $S_{i-1}$  进行更新, 表示为  $s_{i-1} = s_{i-1} - u(d_{i-1})$ ,  $k \in Z$ , 式中  $U(d_{i-1})$  为更新算子。

对于原始信号  $S_i$ : 第一步完成信号的分割, 分割原则通常是选择 lazy 小波分割方法, 该方法可保持被分割成两部分信号的较强相关性; 第二步确定预测算子, 预测算子选择的好坏关系到能否包含信号的细节信息, 这就相当于小波变换中信号通过高通滤波器得到的高频信息; 第三步中存在更新算子, 将预测误差经过更新算子的信息, 这相当于小波变换中信号通过低通滤波器得到的低频信息。

提升小波实现的关键是从给定的  $P(z)$  和  $\tilde{P}(z)$  中分解得到提升因子  $s(z)$  和  $t(z)$ 。其中:

$$P(z) = \begin{pmatrix} h_e(z) & g_e(z) \\ h_o(z) & g_o(z) \end{pmatrix} \quad \tilde{P}(z) = \begin{pmatrix} \tilde{h}_e(z) & \tilde{g}_e(z) \\ \tilde{h}_o(z) & \tilde{g}_o(z) \end{pmatrix},$$

$$h_e(z) = \sum_K h_{2k} z^{-k}, \quad h_o(z) = \sum_K h_{2k+1} z^{-k},$$

$$g_e(z) = \sum_K g_{2k} z^{-k}, \quad g_o(z) = \sum_K g_{2k+1} z^{-k}$$

本文采用 Euclidean 算法对  $P(z)$  和  $\tilde{P}(z)$  进行分解, 最后得到复小波的提升方案。

## 2.2 提升算法与 Mallat 算法的计算量比较

从表 1 可以看出, 在实际工程应用中, 提升算法能够大大节省计算量, 将提升 db4 复小波变换应用在风电接入的电能质量扰动检测中, 为提高扰动信号检测与分类的实时性提供可能。

表 1 提升算法与 Mallat 算法的计算量比较

Table 1 Comparison of the complexity between lifting algorithm and Mallat algorithm

小波基	Mallat 算法/步数	提升算法步数	节省比例/%
Haar	3	3	0
Cdf2.2	12	8	50
db4	14	9	56
复 db4	14	9	56

## 2.3 复小波变换的提升实现

### 2.3.1 欧几里德分解算法

有限长单位冲激响应滤波器对应的传输函数

为:  $h(z) = \sum_{k=k_b}^{k_e} h_k z^{-k}$ , 是一个  $(k_e - k_b)$  阶的 Laurent 多项式, 而 Euclidean 算法是求解两个 Laurent 多项式的最大公因子。利用带余除法, 对于任意两个 Laurent 多项式  $a(z)$ 、 $b(z)$ , 其中  $b(z) \neq 0$ , 且  $|a(z)| > |b(z)|$ , 设  $a_0(z) = a(z)$ 、 $b_0(z) = b(z)$ , 从  $i=0$  开始做递归运算如式(1)。

$$\begin{aligned} a_{i+1}(z) &= b_i(z) \\ b_{i+1}(z) &= a_i(z) \% b_i(z) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: % 表示取余运算; 对于使  $b_n(z) = 0$  的最小整数  $n$ ,  $a_n(z) = 0$  即为所求的最大公因子。记  $q_{i+1}(z) = a_i(z) / b_i(z)$ , 其中 “/” 表示取 “商” 运算, 用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} a_n(z) \\ 0 \end{bmatrix} = \prod_{i=n}^1 \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -q_i(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(z) \\ b(z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

等效于:

$$\begin{bmatrix} a(z) \\ b(z) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} q_i(z) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n(z) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.3.2 提升复小波的提升步骤

本文根据文献[20]中的方法构造 db4 小波相应的复小波滤波器组, 其系数分别为  $-0.0178 - j0.0843$ ,  $-0.1020 + j0.1409$ ,  $0.5129 + j0.1398$ ,  $-0.6822 - j0.3095$ ,  $0.2613 - j0.0266$ ,  $0.0829 + j0.1963$ ,  $-0.0494 - j0.0289$ ,  $-0.0058 - j0.0277$ 。

利用欧几里德算法对多项式进行分解, 得到:

$$\begin{bmatrix} h_e(z) \\ h_o(z) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} q_i(z) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将偶数系  $h_e(z)$  和奇数系  $h_o(z)$  按文中的式(4)表示成相应的多项式, 再按照 Euclidean 分解算法求解出提升因子  $p_1 \sim p_3$ 、 $u_1 \sim u_3$  和归一系数  $k$ 。

由于:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ q_i(z) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_i(z) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & q_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

结合上述式子可得

$$\begin{bmatrix} h_e(z) \\ h_o(z) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{n-1} \begin{bmatrix} 1 & u_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ p_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $u_i(z) = q_i(z)$ ;  $p_i(z) = q_{i+1}(z)$ 。令

$$P^{\text{new}}(z) = \begin{bmatrix} h_e(z) & g_e^{\text{new}}(z) \\ h_o(z) & g_o^{\text{new}}(z) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{n-1} \begin{bmatrix} 1 & u_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ p_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此多相位矩阵  $P(z)$  可表示为

$$P(z) = P^{\text{new}}(z) \begin{bmatrix} 1 & s(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $s(z) = u_n(z) / k^2$ , 又因:

$$\begin{bmatrix} 1 & k^2 s(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & ks(z) \\ 0 & 1/k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

若记:

$$Q(z) = \prod_{i=1}^{n-1} \begin{bmatrix} 1 & u_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ p_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(z) & c(z) \\ b(z) & d(z) \end{bmatrix} \quad (10)$$

可推出:

$$P^{\text{new}}(z) = \begin{bmatrix} h_e(z) & g_e^{\text{new}}(z) \\ h_o(z) & g_o^{\text{new}}(z) \end{bmatrix} = Q(z) \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ka(z) & c(z)/k \\ kb(z) & d(z)/k \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据双正交小波特性, 计算出  $g_e(z)$  和  $g_o(z)$ 。利用已经求得的提升因子和归一化系数求取式(11)中的  $P^{\text{new}}(z)$  的  $g_e^{\text{new}}(z)$  和奇数系  $g_o^{\text{new}}(z)$ 。结合上述三个公式, 可以求出以下表达式, 最终通过公式(13)求得提升因子  $u_4$ 。

$$s(z) = d(z)g_e(z)/k - c(z)g_o(z)/k = \begin{bmatrix} g_e(z) & g_e^{\text{new}}(z) \\ g_o(z) & g_o^{\text{new}}(z) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$u_4(z) = k^2 s(z) = k^2 \begin{bmatrix} g_e(z) & g_e^{\text{new}}(z) \\ g_o(z) & g_o^{\text{new}}(z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由上述分析可知存在 Laurent 多项式  $u_i(z)$ 、 $p_i(z)$  和非零整数  $k$  可将多相矩阵  $P(z)$  分解成多个矩阵连乘的形式, 用式(14)表示。

$$P(z) = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} 1 & u_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ p_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 1/k \end{bmatrix} \quad (14)$$

由小波滤波器完全重构条件  $p(z)\tilde{P}(z^{-1})^T = I$ , 可得:

$$\tilde{P}(z^{-1})^T = \begin{bmatrix} 1/k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \prod_{i=n}^1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -u_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

通过以上方法得到 db4 复小波的分解和重构模型, 如图 2 所示。

最终求得 db4 复小波提升方案中的提升因子为:  $p_1 = (-0.9102 - j0.2936) + (0.1111 + j0.0615)z^{-1}$ ,  $p_2 = (1.6134 + j0.5865) - (0.0639 + j0.4443)z^{-1}$ ,  $p_3 = (-0.4227 + j0.0821) + (0.0339 + j0.1320)z^{-1}$ ,  $u_1 = 1.3572 - j1.4992$ ,  $u_2 = 1.1812 + j1.3168$ ,  $u_3 = 1.5571 + j0.3841$ ,  $u_4 = (-0.1567 + j0.0728)z^3 + (1.0361 - j0.8647)z^2 + (-0.9702 + j4.6668)z + (1.0147 - j1.6725) + (-0.3668 + j0.0410)z^{-1} + (-0.0381 + j0.0395)z^{-2}$ ,  $k = -1.2494 - j0.2212$ 。

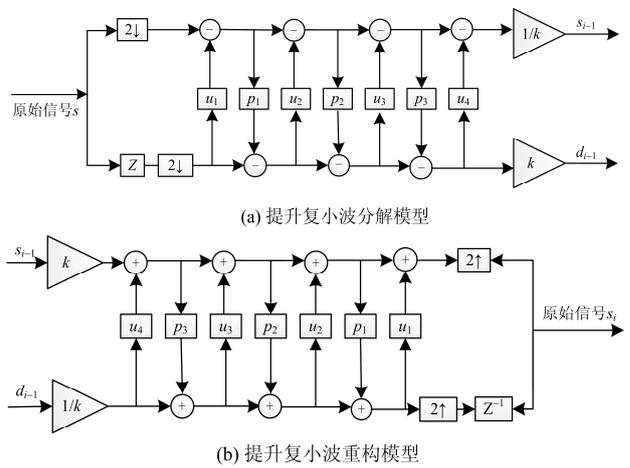


图 2 提升复小波的分解和重构模型

Fig. 2 Decomposition model and reconstruction model of lifting complex wavelet

### 3 仿真分析

本文分析的风电接入的电力系统电能质量扰动信号包括: 谐波扰动、电压中断、暂态振荡以及谐波+中断复合型扰动。采用提升 db4 复小波对电能质量扰动信号起止时刻进行定位的思路是: 通过利用正常电压基频信号的提升标准相位与扰动信号的提升扰动相位做差, 抵消非扰动相位信息, 从而实现扰动起止时刻定位。具体步骤如下:

① 利用提升 db4 复小波分别对正常电压基频信号和电能质量扰动信号进行多分辨率分析, 获取提升标准相位系数  $W_{sp}$  和提升扰动相位系数  $W_{dp}$ ;

② 将  $W_{sp}$  与  $W_{dp}$  做差, 得到一组新数据  $W_{sp-dp}$  并计算出  $|W_{sp-dp}|$  的平均值  $\bar{M}$ ;

③ 依次计算  $|W_{sp-dp}|$  中每个数据与  $\bar{M}$  的相对误差存入新数组  $M$  中, 即  $M = (|W_{sp-dp}| - \bar{M}) / \bar{M}$ , 并与设定阈值进行比较;

④ 找出  $M$  中大于阈值的元素构成新数组  $P$ ,  $P$  中第一个数据和最后一个数据所对应时刻即为电能质量扰动开始和结束时刻。

#### 3.1 稳态扰动定位

稳态扰动的定位仿真实验中, 设定谐波扰动的数学表达式为

$$u(t) = 220[\sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t)]$$

式中:  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50$  Hz; 3、5、7 次谐波幅度  $0.1 \leq \alpha_3$ 、 $\alpha_5$ 、 $\alpha_7 \leq 0.9$ ; 扰动开始时刻  $t_1 = 0.04$  s, 结束时刻  $t_2 = 0.20$  s, 持续时间  $t = t_1 - t_2 = 0.16$  s。提升 db4 复小波、db4 复小波对谐波扰动起止时刻的定位如图 3 所示。

表 2 为提升 db4 复小波、复小波对谐波扰动起止时刻的定位能力和算法效率比较。两种小波函数都具有较高的扰动起止时刻定位精度, 但提升 db4 复小波相对于复小波在扰动起止时刻定位的平均相对误差上减小了 3.15%, 定位速度时间消耗缩短了 0.005 5 s, 算法的效率提高 25.1%, 实时性更好, 能满足风电接入的电力系统谐波扰动定位分析的实时性要求。

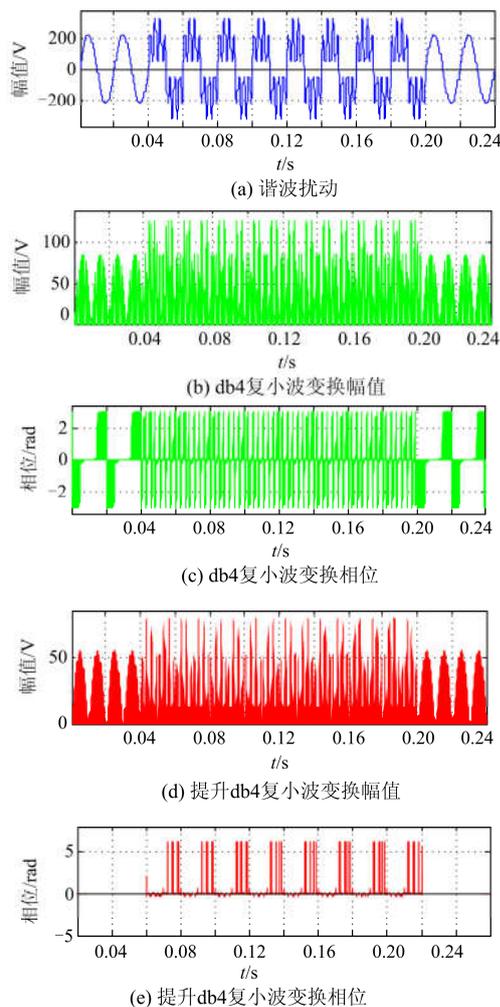


图 3 谐波扰动信号检测

Fig. 3 Detection of harmonic disturbances signal

表 2 谐波扰动定位精度和算法效率比较

Table 2 Comparison between the localization accuracy and the efficiency of the harmonic disturbances algorithm

小波函数	理论值/s		实测值/s		相对误差/%		定位耗时/s
	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	
db4 复小波	0.04	0.2	0.038 7	0.206 1	3.25	3.05	0.021 9
提升 db4 复小波	0.04	0.2	0.040	0.200	0	0	0.016 4

### 3.2 暂态扰动定位

暂态扰动的定位仿真实验中, 设定电压中断的数学表达式为

$$u(t) = 220\{1 - \alpha[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin(\omega t)$$

式中:  $\omega=2\pi f$ ;  $f=50$  Hz; 中断幅度  $0.9 \leq \alpha \leq 1.0$ ; 扰动开始时刻  $t_1=0.16$  s, 结束时刻  $t_2=0.22$  s, 持续时间  $t=t_1-t_2=0.06$  s。提升 db4 复小波、db4 复小波对电压中断起止时刻的定位如图 4 所示。

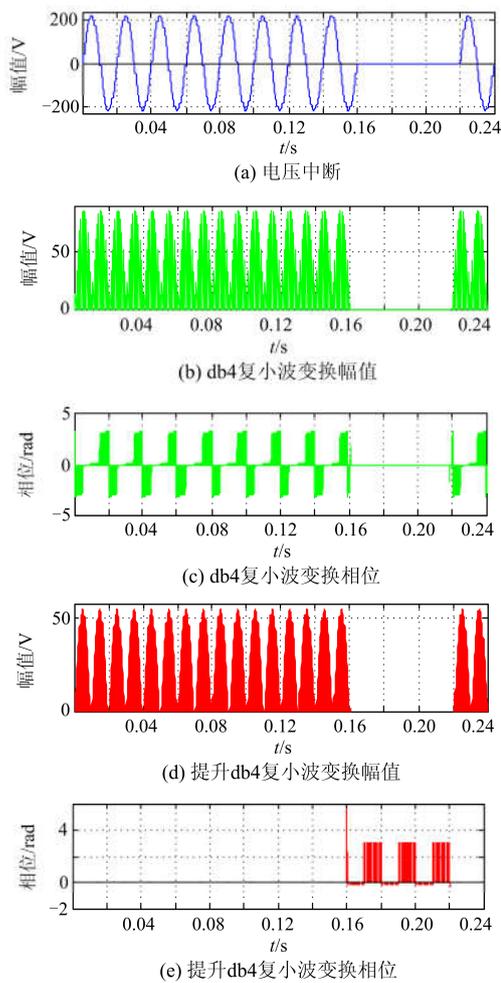


图 4 电压中断信号检测

Fig. 4 Detection of voltage interruption signal

表 3 为提升 db4 复小波、复小波对电压中断起止时刻的定位能力和算法效率比较。两种小波函数都具有较高的扰动起止时刻定位精度, 但提升 Db4 复小波相对于复小波在扰动起止时刻定位的平均相对误差上分别减小了 3.257%, 定位速度时间消耗缩短了 0.012 6 s, 算法的效率提高 42.86%, 实时性更好, 能满足风电接入的电力系统电压中断定位分析的实时性要求。

表 3 电压中断定位精度和算法效率比较

Table 3 Comparison between the accuracy of localization and the efficiency of the algorithm for voltage interruption signal

小波函数	理论值/s		实测值/s		相对误差/%		定位耗时/s
	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	
db4 复小波	0.16	0.22	0.154 5	0.212 9	3.438	3.227	0.029 4
提升 db4 复小波	0.16	0.22	0.162 4	0.220	1.520	0	0.016 8

### 3.3 暂态振荡定位

暂态振荡定位的定位仿真实验中, 设定暂态振荡数学表达式为

$$u(t) = 220 \{ \sin(\omega t) + \alpha e^{-c(t-t_1)} [u(t-t_1) - u(t-t_2)] \sin(\beta \omega t) \}$$

式中:  $\omega=2\pi f, f=50$  Hz; 振荡最大幅度  $1 \leq \alpha \leq 2$ ;  $c$  为衰减系数;  $\beta$  为振荡频率与正常信号频率比值; 扰动开始时刻  $t_1=0.121$  s, 扰动结束时刻  $t_2=0.123$  s, 持续时间  $t=t_1-t_2=0.002$  s。提升 db4 复小波、db4 复小波对暂态振荡起止时刻的定位如图 5 所示。

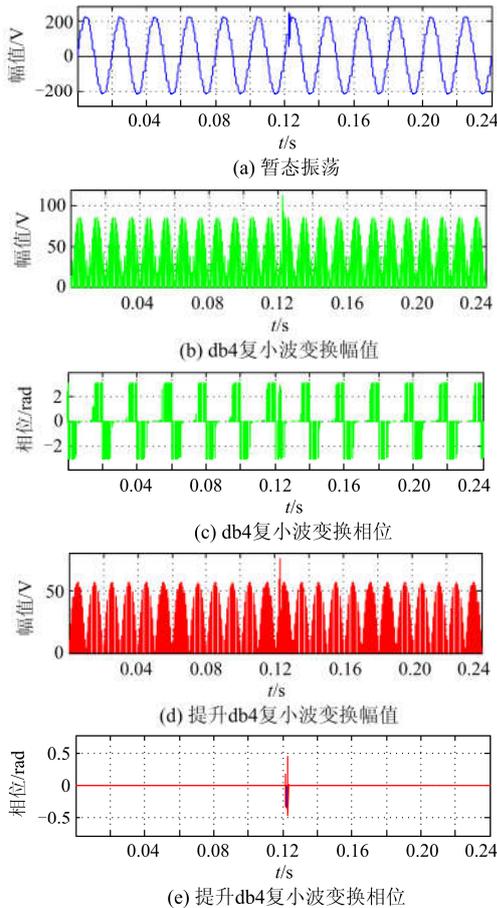


图 5 暂态振荡信号检测

Fig. 5 Detection of transient oscillatory signal

表 4 为提升 db4 复小波、复小波对暂态振荡起止时刻的定位能力和算法效率比较。两种小波函数

都具有较高的扰动起止时刻定位精度, 但提升 db4 复小波相对于复小波在扰动起止时刻定位的平均相对误差上减小了 2.649%, 定位速度时间消耗缩短了 0.010 8 s, 算法的效率提高 37.11%, 实时性更好, 能满足风电接入的电力系统暂态振荡定位分析的实时性要求。

表 4 暂态振荡定位精度和算法效率比较

Table 4 Comparison between the accuracy of localization and the efficiency of the algorithm for transient oscillatory signal

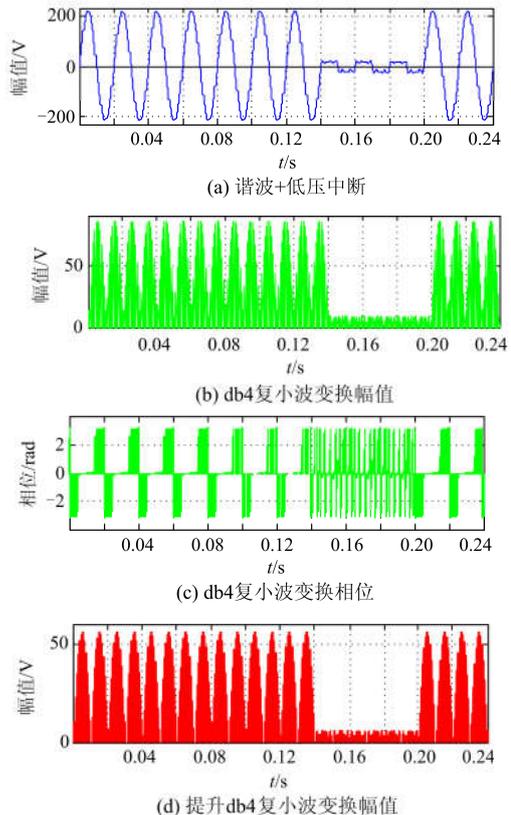
小波函数	理论值/s		实测值/s		相对误差/%		定位耗时/s
	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	
db4 复小波	0.121 0	0.123 0	0.123 9	0.126 6	2.370	2.927	0.029 1
提升 db4 复小波	0.121 0	0.123 0	0.121 0	0.123 0	0	0	0.018 3

### 3.4 复合扰动定位

复合扰动定位为谐波+电压中断定位实验, 谐波+电压中断数学表达式为

$$u(t) = 220 \{ 1 - \alpha [u(t-t_1) - u(t-t_2)] \} \left[ \sin(\omega t) + \sum_{k=3}^7 \alpha_k \sin(k\omega t) \right]$$

式中:  $\omega=2\pi f, f=50$  Hz; 中断幅度  $0.9 \leq \alpha \leq 1.0$ ;  $k=3, 5, 7$ ; 谐波幅度  $0.1 \leq \alpha_k \leq 0.9$ ; 扰动开始时刻  $t_1=0.14$  s, 扰动结束时刻  $t_2=0.20$  s, 持续时间  $t=t_1-t_2=0.06$  s。提升 db4 复小波、db4 复小波对谐波+电压中断起止时刻的定位如图 6 所示。



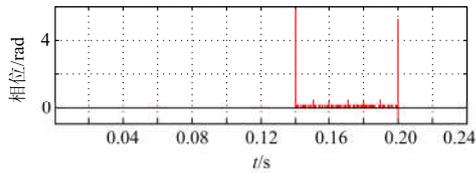


图 6 谐波+电压中断扰动信号检测

Fig. 6 Detection of harmonic disturbances and voltage interruption signal

表 5 为提升 db4 复小波、复小波对谐波+电压中断起止时刻的定位能力和算法效率比较。两种小波函数都具有较高的扰动起止时刻定位精度，但提升 db4 复小波相对于复小波在扰动起止时刻定位的平均相对误差上减小了 3.797%，定位速度时间消耗缩短了 0.007 s，算法的效率提高 27.56%，实时性更好，能满足风电接入的电力系统谐波+电压中断定位分析的实时性要求。

表 5 谐波+电压中断定位精度和算法效率比较

Table 5 Comparison between the accuracy of localization and the efficiency of the algorithm for harmonic disturbances and voltage interruption signal

小波函数	理论值/s		实测值/s		相对误差/%		定位耗时/s
	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	
db4 复小波	0.140	0.200	0.145 1	0.207 9	3.643	3.950	0.025 4
提升 db4 复小波	0.140	0.200	0.140	0.200	0	0	0.018 4

## 4 结论

本文针对风电接入的电力系统中存在的电能质量问题，采用了一种新的提升复小波——提升 db4 复小波。首先详细分析了提升复小波变换的基本原理和实现技术，然后分别对单一扰动(谐波扰动、电压中断、暂态振荡)和复合型扰动(谐波+电压中断扰动)进行了仿真分析，并将仿真结果与 db4 复小波进行了对比分析。理论分析和仿真结果证明，该方法的定位能力和算法效率更高，实时性更好，能够实现对暂态电能质量扰动信号的快速、准确地检测与定位。

## 参考文献

[1] 吕广强, 赵剑锋, 程明, 等. 配电网动态电能质量问题及其解决方案[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 53-56.  
LÜ Guangqiang, ZHAO Jianfeng, CHENG Ming, et al. Dynamic quality of power supply and its solution for distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 53-56.

[2] 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(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.

[3] 全惠敏, 戴瑜兴. 基于 S 变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 119-125.  
QUAN Huimin, DAI Yuxing. Detection and localization of power quality disturbances based on S-transform module matrixes[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 119-125.

[4] 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.  
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34.

[5] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35-39.  
ZENG Ruijiang, YANG Zhenbin, LIU Huichao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.

[6] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进 Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 122-128.  
REN Zihui, LIU Haoyue, XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved Prony method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 122-128.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 何尚平, 罗小青, 许仙明, 等. 基于样本熵的电网传输电能质量扰动信号分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 98-102.  
HE Shangping, LUO Xiaoqing, XU Xianming, et al. Analysis of the power quantity disturbance signal in the

- transmission grid based on the sample entropy method[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 98-102.
- [10] 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(3): 163-167.  
SU Weiwei, MA Suxia, QI Linhai. Predicting of power quality steady indicators based on ARIMA and neural network[J]. Computer Technology and Development, 2014(3): 163-167.
- [11] 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.
- [12] 覃星福, 龚仁喜. 基于广义 S 变换与 PSO-PNN 的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 10-17.  
QIN Xingfu, GONG Renxi. Power quality disturbances classification based on generalized S-transform and PSO-PNN[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 10-17.
- [13] 陈宝大. 基于广义尺度小波熵的电网传输电能质量扰动信号分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(12): 77-81.  
CHEN Baoda. Disturbance signal analysis based on wavelet entropy generalized scale transmission network power quality[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(12): 77-81.
- [14] 耿云玲, 王群, 何怡刚. 基于复数小波相位信息的电能质量扰动的检测、定位与分类[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 112-116.  
GENG Yunling, WANG Qun, HE Yigang. Detection, location and classification of power quality disturbances based on phase of complex wavelet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 112-116.
- [15] GU Y H, BOLLEN M H J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1279-1284.
- [16] 刘志刚, 张巧革, 张杨. 电能质量复合扰动分类的研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 146-153.
- LIU Zhigang, ZHANG Qiaoge, ZHANG Yang. Review of power quality mixed disturbances identification[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 146-152.
- [17] 李涛, 夏浪, 张宇, 等. 基于提升复小波的暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 66-72.  
LI Tao, XIA Lang, ZHANG Yu, et al. Detection and localization of power quality transient disturbances based on lifting complex wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 66-72.
- [18] BRITO N S D, SOUZA B A, PIRES F A C. Daubechies wavelets in quality of electrical power[C] // International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, IEEE Xplore, Oct 14-16, 1998, Athens, Greece: 511-515.
- [19] 刘桂英, 栗时平. 风电接入系统暂态电能质量扰动小波检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 22-27.  
LIU Guiying, SU Shiping. Wavelet detection method of transient power quality disturbance for power system connected with wind energy generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 22-27.
- [20] 李滔, 王正勇, 黄梅, 等. 提升小波构造方法的改进[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(3): 326-330.  
LI Tao, WANG Zhengyong, HUANG Mei, et al. Improvement of construction method for lifting wavelet transform[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2007, 22(3): 326-330.

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-06-10

作者简介:

欧阳波(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量监测与控制; E-mail: 307026970@qq.com

易灵芝(1966—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为交流调速与电力电子装置, 新能源发电与直流微网等; E-mail: ylzwyh@yahoo.com

何巨龙(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量监测与控制。E-mail: 1137317641@qq.com

(编辑 葛艳娜)