

广义内插小波在电能质量 扰动信号分析中应用

杨 进,李庚银,周 明,段翔颖

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,河北 保定 071003)

摘要: 广义内插小波 (GIW) 具有对称性、紧支撑性、双正交性、内插性和高阶消失矩等优点,并消除了分解初始化时的 Mallat 误差。介绍了 GIW 的基本概念和分解、重构算法。将 GIW 应用于电能质量扰动信号的分析,对电压骤升、电压骤降、局部跌落、瞬时断电、频率漂移和局部振荡进行了仿真,并比较了 GIW、Bior 3.7、Coif 3、Db 4 等 4 种小波在电压骤升、局部跌落、局部振荡时的信号定位性能,结果表明:虽然选取的 GIW 的滤波器长度要大于其他 3 种小波,但其对突变信号定位的幅值和偏移点数等参数仍优于其他三者;检测突变信号时,选用紧支撑对偶、具有高阶消失矩的小波可以更精确地检测突变点。分析可知,GIW 具有很好的综合性能指标,可以有效地检测出各种微小扰动。

关键词: 电能质量; 扰动检测; 小波变换; 广义内插小波

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)01-0021-05

0 引言

近年来,电能质量扰动检测与辨识成为电能质量分析领域研究的热点问题之一。小波变换以其良好的时频局部化性能被广泛应用于电力系统中,特别是在对电能质量扰动信号的检测中^[1-5]。为获得准确的检测结果,对于小波综合性能的要求越来越高,诸如对称性、紧支撑性、正交性、内插性、高阶消失矩等。然而,Daubechies 已经证明,一般的小波难以同时具有这些性质^[6]。

1992 年,Donoho 提出了内插小波的概念^[7]。内插小波可分为内插样条小波 (ISPW) 和 Donoho 内插小波 2 大类,前者是非紧支撑的,后者是紧支撑的。另外,文献[8]还提出了用正交小波尺度函数的自相关函数生成内插小波的方法。目前,研究主要集中在 Donoho 内插小波,但这种小波不具有任何阶消失矩。文献[9]针对 Donoho 内插小波构造中的不足,提出了广义内插小波 GIW (Generalized Interpolating Wavelet) 的概念,这种小波不仅具有良好的逼近性、紧支撑性、对称性和具有高阶消失矩,而且继承了内插小波的内插性,可直接用采样值进行分解初始化,仅有逼近误差而不存在 Mallat 误差,使得重构误差精度比一般小波提高几个数量级。虽然,这类小波不具有正交性,但利用相应的低通和高通滤波器,同样可以实现类似 Mallat 算法的小波分解算法,而且在分析突变信号时采用冗余的小波变换会得到更好的效果。尽管在 4- 带以上或多小波情况下,已构造

出同时具有 5 大优点的尺度函数^[10-11],但考虑到两者实现的复杂性,不利于实时分析。因此,GIW 仍然有其综合优势。

鉴于 GIW 的以上特点,本文提出将其应用于电能质量扰动信号的分析。首先,分别介绍了内插小波及 GIW 的基本理论,然后应用 GIW 对各种典型电能质量扰动信号进行分析,并与几种常用小波的分析结果进行了比较。通过大量的仿真分析,研究 GIW 在电能质量扰动信号定位中的可行性、优越性,以期进一步提高对扰动信号分析定位的精确度。

1 基本理论

1.1 内插小波

内插小波是插值理论和小波理论相结合的产物。1992 年,Donoho 给出了内插小波的基本框架,并提出一个内插小波系统的尺度函数满足内插性、自激双尺度关系、多项式子空间的包含性、正则度、时域局部化 5 个条件^[7]。

内插小波的内插性使得其相对传统小波有一个突出优点,即小波分解的初始化可直接用采样值完成。

实际中处理的信号多为离散信号,设对信号 $f(t)$ 采样,即

$$f(t) = \sum_k f(k) \delta(t-k) \quad k \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

采用快速算法分解信号时,一般直接用采样值 $f(k) = f(t=k) (k \in \mathbb{Z})$ 代替初始系数 c_k^0 ,这显然是不严格的。只有当 $f(k)$ 是 $f(t)$ 在 V_0 上的投影时才可将其作为初始系数。设函数

$$g(t) = \sum_k f(k) \varphi(t-k) \quad (2)$$

即 $f(k)$ 是 $g(t)$ 在 V_0 上的投影。

比较式(1)(2)可以看出,当 $\varphi(t)=\delta(t)$ 时,有 $g(t)=f(t)$,即 $f(k)$ 是 $f(t)$ 在 V_0 上的投影。

对于非内插尺度函数,一般 $\varphi(t) \neq \delta(t)$,因此往往产生较大的 Mallat 误差。为此,有多种降低 Mallat 误差的确定初始值的方法^[12]。而由内插小波尺度函数的内插性有 $\varphi(t)=\delta(t)$,因此可直接用采样值进行初始化,仅有逼近误差而不存在 Mallat 误差。

1.2 Donoho 内插小波

Donoho 以 Deslauriers 和 Dubuc 基本内插函数 $\varphi_D(t)$ 为内插尺度函数, $\psi_D(t)$ 为小波函数构造了一类简单的内插小波系统,称之为 Donoho 内插小波^[7],其中, $\varphi_D(t)$ 为对称的紧支撑尺度函数,满足双尺度方程:

$$\varphi_D(t) = \varphi_D(2t) + \sum_{k=-(D-1)/2}^{(D+1)/2} h_D(k) \varphi_D(2t-2k+1) \quad (3)$$

式中 $D=1,3,5,\dots$; h_D 是 $D+1$ 阶 Deslauriers-Dubuc 对称内插滤波器。

$$h_D(k) = \prod_{l=-(D-1)/2, l \neq k}^{(D+1)/2} \frac{2l-1}{2(l-k)} \quad (4)$$

$$k = -(D-1)/2, -(D-1)/2+1, \dots, (D+1)/2$$

式(3)的尺度函数具有 $D+1$ 阶消失矩,并满足:

$$t^d = \sum_k k^d \varphi_D(t-k) \quad d=0,1,\dots,D \quad (5)$$

$$\psi_D(t) = \varphi_D[2(t-1/2)] \quad (6)$$

实际上,这仅是一个内插多分辨率分析,因为其小波函数不具有任何阶消失矩。

2 GIW

2.1 基本概念

GIW 是 Donoho 内插小波的推广,可描述为如下双尺度差分方程:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi(2t) + \sum_m h(m) \varphi(2t-2m+1) \\ \psi(t) &= 2\varphi(2t-1) - \sum_m g(m) \varphi(t-m) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 h 和 g 是一对内插滤波器, $h=g=h_D$ 。

该小波的尺度函数、小波函数及对偶完全由 h 和 g 决定。当滤波器 $g=0$ 时,式(7)即为 Donoho 内插小波。

2.2 对偶及其性质

GIW 的对偶尺度和小波函数满足双尺度方程:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(t) &= 2\tilde{\varphi}(2t) + \sum_m \bar{g}(-m) \tilde{\psi}(t-m) \\ \tilde{\psi}(t) &= \tilde{\varphi}(2t-1) - \sum_m \bar{h}(1-m) \tilde{\varphi}(2t-2m) \end{aligned}$$

式中 $\bar{h}$ 、 $\bar{g}$ 分别表示 h 、 g 的复共轭。

文献[9]指出,由式(7)定义的尺度和小波函数及其对偶都具有紧支撑性和线性相位。而且内插尺度函数与对偶小波具有相同的消失矩阶数($D+1$);对偶尺度函数的正则阶数与小波的消失矩阶数相同。

2.3 分解和重构算法

与紧支撑正交小波相似,GIW 的分解和重构算法可以通过 FIR 滤波器和塔形算法有效实现,设:

$$\begin{aligned} \varphi_{j,k}(t) &= 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \\ \psi_{j,k}(t) &= 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \\ \tilde{\varphi}_{j,k}(t) &= 2^{j/2} \tilde{\varphi}(2^j t - k) \\ \tilde{\psi}_{j,k}(t) &= 2^{j/2} \tilde{\psi}(2^j t - k) \\ V_j &= \overline{\text{span}_k \{ \varphi_{j,k}(t) \}} \\ W_j &= \overline{\text{span}_k \{ \psi_{j,k}(t) \}} \quad k \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

V_j 、 W_j 分别表示尺度空间和小波空间, $\forall f(t) \in L^2(R)$ 在尺度空间和小波空间的投影系数,即分解算法的低通和高通输出分别为

$$\begin{aligned} c_k^j &= \langle f(t), \tilde{\varphi}_{j,k}(t) \rangle = 2^{j/2} \int f(t) \tilde{\varphi}(2^j t - k) dt \\ d_k^j &= \langle f(t), \tilde{\psi}_{j,k}(t) \rangle = 2^{j/2} \int f(t) \tilde{\psi}(2^j t - k) dt \end{aligned}$$

下面描述分解和重构算法的具体实现过程。分解算法的实现过程如图 1 所示,重构算法的实现过程如图 2 所示。

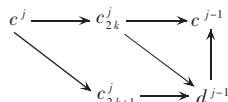


图 1 分解算法示意图

Fig.1 Illustration of decomposition algorithm

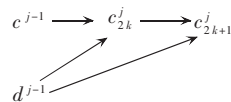


图 2 重构算法示意图

Fig.2 Illustration of reconstruction algorithm

a. 初始化。当 $f(t) \in V_J$ (一般取 $J=0$) 时,有

$$c_k^J = 2^{-J/2} f(k/2^J)$$

b. 分解算法。对 $j < J$,有

$$d_k^{j-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[c_{2k+1}^j - \sum_m \bar{h}(1-m) c_{2k+2m}^j \right]$$

$$c_k^{j-1} = \sqrt{2} c_{2k}^j + \sum_m \bar{g}(-m) d_{k+m}^{j-1}$$

c. 重构算法。对 $j \leq J$,有

$$c_{2k}^j = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[c_k^{j-1} - \sum_m \bar{g}(-m) d_{k+m}^{j-1} \right]$$

$$c_{2k+1}^j = \sqrt{2} d_k^{j-1} + \sum_m \bar{h}(1-m) c_{2k+2m}^j$$

$$f(t) = 2^{J/2} \sum_k c_k^J \varphi(2^J t - k)$$

3 GIW 应用

3.1 概述

电能质量扰动信号多具有较高的奇异性,因此在使用小波进行奇异点检测时,要求所选用小波具有消失矩,而且对于高阶奇异点,更要求具有高阶消失矩^[13]。另外,文献[13]通过对 3 种小波的定位性能比较,说明了在电力系统暂态信号定位时,应选用对称小波(具有线性相位)。因 GIW 的尺度和小波函数及其对偶都具有紧支撑性和线性相位,而且内插尺度函数与对偶小波具有相同消失矩阶数($D+1$),故将其应用于电能质量扰动信号分析有充分的理论基础。

本文在 Matlab 环境下编制程序实现了 GIW 分解和重构算法,仿真各种扰动信号(包括电压骤升、

电压骤降、局部跌落、瞬时断电、频率漂移和局部振荡)并进行分析。各仿真信号均为 50 Hz 工频信号;实验中采用滤波器长度为 20 的 GIW($D=20$),对各信号均进行了 5 尺度分解。

3.2 电压骤升

仿真信号的采样频率为 10 kHz,采 1 024 个点,即采样间隔为 0.1 ms,采样时间为 102.4 ms。在 30 ~ 70 ms 内出现了幅值骤升。选取特征明显的 1 尺度和 2 尺度的高频细节信息示于图 3。

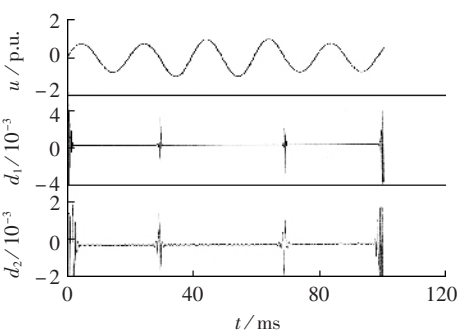


图 3 电压骤升检测 (30 %)

Fig.3 Detection of voltage swell(30 %)

3.3 电压骤降

仿真信号的采样频率为 10 kHz,采 1024 个点。在 20 ~ 70 ms 内出现了幅值骤降。选取特征明显的 1 尺度和 2 尺度的高频细节信息示于图 4。

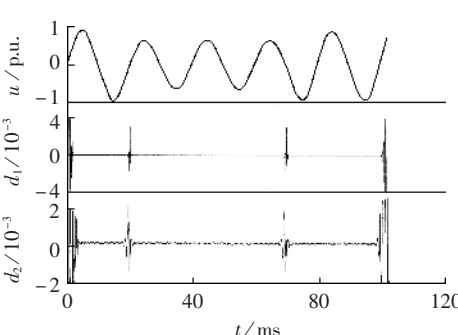


图 4 电压骤降检测 (30 %)

Fig.4 Detection of voltage sag(30 %)

3.4 局部跌落

仿真信号的采样频率为 10 kHz,采 1024 个点。在 24.5 ~ 25.5 ms 内出现了幅值下降。选取特征明显的 1 尺度和 2 尺度高频细节信息示于图 5。

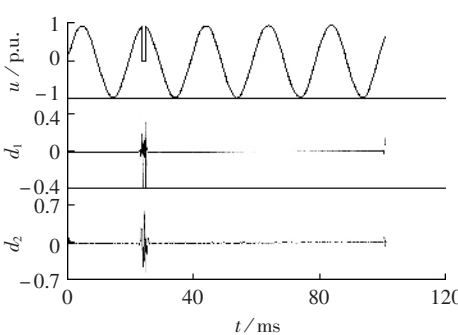


图 5 局部跌落检测

Fig.5 Detection of voltage dip

3.5 瞬时断电

仿真信号的采样频率为 10 kHz,采 2 048 个点。在 40 ~ 70 ms、130 ~ 170 ms 内分别出现中断。选取特征明显的 1 尺度到 3 尺度的高频细节信息示于图 6。

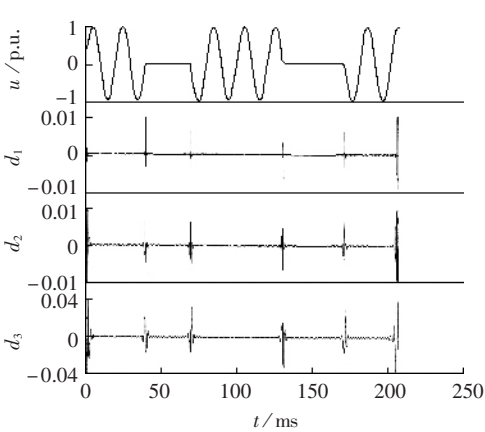


图 6 瞬时断电检测

Fig.6 Detection of momentary interruption

3.6 频率漂移

仿真信号的采样频率为 20 kHz,采 2 048 个点。在 20 ~ 40.2 ms 信号频率变为 49.5 Hz(减小 1 %),60.1 ~ 80 ms 变为 50.5 Hz(增大 1 %)。选取特征明显的 1 尺度和 2 尺度高频细节信息示于图 7。

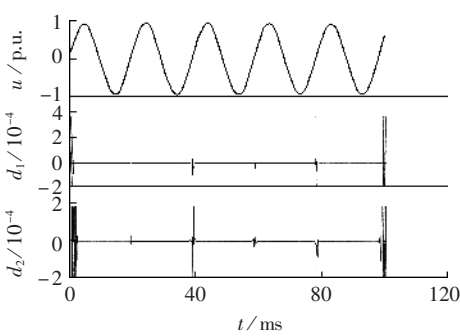


图 7 频率漂移检测 (1%)

Fig.7 Detection of frequency drift(1 %)

3.7 局部振荡

仿真信号的采样频率为 10 kHz,采 1024 个点。在 46.1 ms 开始出现衰减振荡。振荡频率为 500 Hz,幅值为 0.5 p.u.。选取特征明显的 1 尺度和 2 尺度的高频细节信息示于图 8。

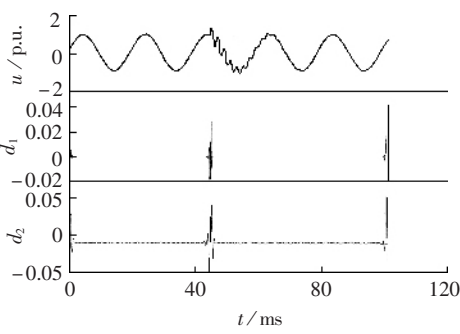


图 8 局部振荡检测

Fig.8 Detection of voltage oscillatory transient

4 结果分析

通过以上对各典型扰动信号的分解可以看出,GIW 能够较好地定位扰动信号的各突变点。为进一步分析定位的精度,选用不同的小波进行分析比较。由于在选取小波时,紧支集越短(即滤波器系数越小),在相同尺度时定位性能越好^[13]。为了便于说明问题,选用紧支集长度与 GIW($D=20$)相近且小于 20 的已有小波进行定位性能的比较。本文选用 Bior 3.7、Coif 3、Db 4,并且紧支集的长度有:GIW($D=20$)>Bior3.7>Coif3>Db4。它们的基本性质见表 1。

表 1 选用小波的基本性质

Tab.1 Applied wavelets and their basic qualities

小波类型	对称性	L/n	r
GIW($D=20$)	对称	20/20	21
Bior 3.7	对称	15/16	3
Coif 3	基本对称	17/18	6
Db 4	不对称	7/8	4

注: L 、 n 、 r 分别为紧支集长度、滤波器系数个数、消失矩阶数。

本文分别对电压骤升 30%(起始点 301)、局部跌落(起始点 245)和局部振荡(起始点 461)进行 5 尺度分解并比较,见表 2~4。

表 2 电压骤升 30% 时信号定位性能的比较

Tab.2 Comparison of signal locating performance during voltage swell(30%)

尺度	GIW		Bior 3.7	
	A	N	A	N
1	0.003 268 9	0	0.001 582 0	1
2	0.001 523 1	1	-0.001 765 0	2
3	0.010 418 0	1	0.004 520 1	1
4	0.008 400 3	5	0.009 319 0	2
5	0.049 627 0	4	0.035 007 0	1

尺度	Coif 3		Db4	
	A	N	A	N
1	0.000 789 18	0	0.001 596 0	0
2	0.004 410 90	0	0.003 701 2	0
3	-0.004 124 40	6	-0.006 850 0	6
4	-0.007 184 00	10	0.006 255 6	4
5	—	—	—	—

注: A 为幅值, N 为偏移点数,下同;“—”表示不能检测出突变点。

表 3 局部跌落时信号定位性能的比较

Tab.3 Comparison of signal locating performance during voltage dip

尺度	GIW		Bior 3.7	
	A	N	A	N
1	-0.520 55	0	-0.329 585	0
2	0.489 43	1	0.172 905	2
3	1.172 75	0	-0.264 995	1

尺度	Coif 3		Db 4	
	A	N	A	N
1	-0.167 895	0	-0.345 380	0
2	-0.509 890	0	-0.101 410	0
3	-0.254 945	2	0.232 145	2

注:由于两突变点(245 和 255 点)距离较近,各小波在 4 尺度和 5 尺度均难以检测出来,因此表中未列出。

表 4 局部振荡时信号定位性能的比较

Tab.4 Comparison of signal locating performance during oscillatory transient

尺度	GIW		Bior 3.7	
	A	N	A	N
1	0.031 568	0	0.028 251	0
2	0.064 731	1	-0.063 341	1
3	-0.315 200	1	0.115 190	4
4	0.540 640	4	-0.323 320	15
5	-0.510 440	12	-0.027 765	13

尺度	Coif 3		Db 4	
	A	N	A	N
1	-0.039 178	1	0.030 373	0
2	-0.035 293	0	-0.040 169	0
3	0.121 610	2	0.171 660	22
4	-0.426 110	14	-0.308 610	11
5	-0.048 158	22	-0.091 751	20

从表 2~4 的比较可看出,虽然紧支集的长度有 GIW($D=20$)>Bior 3.7>Coif 3>Db 4,但对突变点的定位性能仍然是 GIW($D=20$)>Bior 3.7>Coif 3>Db 4。因此,可以得出以下结论:

a. 虽然所选取 GIW 的滤波器长度要大于其他 3 种小波,但其对突变信号定位的幅值和偏移点数等参数仍优于其他三者。

b. 对比分析再一次说明,在检测突变信号时,选用紧支撑对偶、具有高阶消失矩的小波可以更精确地检测突变点。

5 结语

GIW 以其对称性、紧支撑性、双正交性、内插性、高阶消失矩等一系列优点使得其在电能质量扰动信号的分析应用中有较大的综合优势。通过大量仿真分析可以看出,它能准确检测各种扰动信号,即使是微小的扰动。通过与其他小波的分析结果比较说明,GIW 在检测突变信号上有较大的优势。

应该指出,由于 GIW 性能全面,在电力系统消噪^[14]、暂态信号特征抽取和数据压缩、故障测距定位等其他方面也有其应用优势。如文献^[15]将它应用在信号消噪中,并取得了良好的去噪效果。同时,由于 GIW 在设计上有较大的灵活性,针对不同的应用领域对其滤波器系数优化选择将会取得更好的效果^[16]。

参考文献:

[1] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(10):1-6.
CHEN Xiang-xun. Wavelet-based measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(10):1-6.
[2] 刘志刚,曾怡达,钱清泉. 多小波在电力系统信号消噪中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(1):30-34.
LIU Zhi-gang,ZENG Yi-da,QIAN Qing-quan. Denoising of electric power system signals based on different multiwavelets[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(1):30-34.
[3] 薛薇,杨仁刚,郭永芳. 利用复值小波变换检测轻微的电力系统扰动[J]. 电网技术,2004,28(17):24-27.

XUE Hui,YANG Ren-gang,GUO Yong-fang. Detection of minute disturbance by complex wavelet transform[J]. Power System Technology,2004,28(17):24-27.

[4] 张秀娟,徐永海,肖湘宁. 电能质量扰动小波变换检测与识别方法的发展[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):67-71.

ZHANG Xiu-juan,XU Yong-hai,XIAO Xiang-ning. Development of wavelet - transform - based power quality disturbance detection and identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9): 67-71.

[5] 胡国胜,任震,黄雯莹. 小波变换在电力系统中应用研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(3):71-78.

HU Guo - sheng,REN Zhen,HUANG Wen - ying. Application of wavelet transform to electric power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(3):71-78.

[6] DAUBECHIES I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets [J]. Commun Pure Appl Math,1988,41(7):909-996.

[7] DONOHO L D. Interpolating wavelet transform [R]. California : Stanford University, 1992.

[8] SAITO N,BEYLKIN G. Multiresolution representations using the autocorrelation functions of compactly supported wavelets[J]. IEEE Trans on Signal Processing,1993,41(12):3584-3590.

[9] 水鹏朗. 广义内插小波和递归内插小波理论及应用的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,1998.

SHUI Peng - lang. Theory and application of generalized interpolating and interpolating recursive wavelets[D]. Xi'an:Xidian University,1998.

[10] 水鹏朗,保铮. 4-带紧支撑对称正交内插尺度函数[J]. 自然科学进展,2001,11(2):173-178.

SHUI Peng - lang,BAO Zheng. Four - band compactly supported orthogonal symmetric interpolating scaling function[J]. Progress in Natural Science,2001,11(2):173-178.

[11] SELESNICK I W. Interpolating multiwavelet bases and the sampling theorem[J]. IEEE Trans on Signal Processing,1999,47(6): 1615-1621.

[12] CHAN Y T,HO K C. Multiresolution analysis,its link to the discrete parameter wavelet transform, and its initialization [J]. IEEE Trans on Signal Processing,1996,44(4):1001-1006.

[13] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):45-48.

HE Zheng - you,QIAN Qing - quan. Mother wavelet option method in the transient signal analysis of electric power systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(10):45-48.

[14] 徐大可. 基于小波变换的交流采样信号消噪技术[J]. 电力自动化设备,2001,21(10):15-17.

XU Da - ke. Denoising of AC sampling based on wavelet transform [J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(10):15-17.

[15] 水鹏朗,保铮. 具有紧支撑对偶的内插子波[J]. 电子科学学刊,1999,21(5):585-591.

SHUI Peng - lang,BAO Zheng. Interpolating wavelets with compactly supported duals[J]. Journal of Electronics,1999,21(5): 585-591.

[16] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory,1992,38(2): 617-643.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

杨 进(1980-),男,辽宁海城人,硕士,研究方向为电能质量、电网调度自动化(E-mail:mmike838@sohu.com);

李庚银(1964-),男,河北雄县人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力市场、电能质量、新型输配电技术等(E-mail: ligy@ncepu.edu.cn);

周 明(1967-),女,湖北宜昌人,副教授,博士,研究方向为电力市场、电能质量、电网调度自动化(E-mail:zhouming@ncepu.edu.cn);

段翔颖(1979-),女,山西介休人,硕士研究生,研究方向为电能质量(E-mail: duan_xy@163.com)。

Application of generalized interpolating wavelet in power quality disturbance signal analysis

YANG Jin,LI Geng-yin,ZHOU Ming,DUAN Xiang-ying

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, Ministry of Education,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: GIW (Generalized Interpolating Wavelet) has merits of symmetry,compact support,dual orthogonality,interpolation,high-order vanishing moment,and so on. Furthermore,it eliminates the Mallat error during decomposition initialization. Its basic concepts and algorithms of decomposition and reconstruction are introduced. It is applied to power quality disturbance analysis and different cases are simulated:voltage swell,voltage sag,voltage dip,momentary interruption,frequency drift and oscillatory transient. The signal locating performance is compared among GIW,Bior3.7,Coif3 and Db4 wavelets for voltage swell,voltage dip and oscillatory transient. Results show that,although the filter of GIW is longer than other three,signal locating parameters are better,such as magnitude and deviation points. The wavelet with compact support and high-order vanishing moment is better for detecting sudden change point. GIW has excellent synthetic performance and can well detect various minor disturbances.

This project is supported by the Research Foundation for Doctoral Speciality of Higher Education of China (20040079002).

Key words: power quality; disturbance detection; wavelet transform; generalized interpolating wavelet