

基于WMM与HATF的含噪暂态电能质量扰动检测方法

徐敬伟,程杉,严潇,王瑞

(三峡大学智慧能源技术湖北省工程研究中心,湖北宜昌443002)

摘要:针对噪声环境下暂态电能质量扰动检测困难的问题,提出一种基于小波模极大值(WMM)与分层自适应阈值函数(HATF)相结合的检测方法(WMM+HATF)。首先,为了有效对扰动信号降噪,即保证降噪后信号的平滑度以及保留突变点信息,采用自适应调节的HATF,该函数在阈值处和小波域内均可导,避免了传统与其他改进阈值函数不能或过度降噪的缺陷。其次,基于WMM通过细节系数的模极大值点位置对降噪后的暂态电能质量扰动进行定位。基于含噪的单一和复合扰动信号的仿真及对比分析显示:HATF降噪优势明显,WMM+HATF通用性好、定位准确率高。

关键词:暂态电能质量;扰动定位;小波模极大值;阈值函数;降噪

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.001 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2021)04-0003-09

Noisy transient power quality disturbance detection method based on WMM and HATF

XU Jingwei, CHENG Shan, YAN Xiao, WANG Rui

(Engineering Center for Intelligent Energy Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of detecting transient power quality disturbances in noisy environments, this paper proposes a detection method based on the combination of wavelet modulus maximum and hierarchical adaptive threshold function. Firstly, in order to effectively reduce the noise of the disturbance signal, in other words, to ensure the smoothness of the signal after noise reduction and retain the mutation point information, adaptively adjusted HATF is adopted. The function is derivable at the threshold and in the wavelet domain, avoiding the defect that traditional or improved threshold functions can not reduce noise or reduce noise excessively. Secondly, based on the WMM method, the transient power quality disturbance after noise reduction is located by the position of the modulus maximum point in the detail coefficient. Based on noisy single and composite disturbance signals, simulation and comparative analysis show that HATF has obvious advantages in noise reduction and WMM+HATF has good versatility and high positioning accuracy.

Key words: transient power quality; disturbance positioning; WMM; threshold function; noise reduction

可再生能源和电动汽车等通过非线性电力电子器件入网严重影响了电力系统的电能质量^[1-2],而暂

态电能质量问题尤为严重,对其治理和改善的前提是有效地检测暂态扰动信号^[3-4]。但是暂态扰动信

收稿日期:2020-12-15;修回日期:2021-04-15

基金项目:国家自然科学基金(51607105)

通信作者:程杉(1981-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事新能源微电网运行优化与控制、电动汽车充换电设施与可再生能源集成、智能计算及其在电力系统中的应用等研究;E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

号具有随机性和不确定性,且由于采样误差以及信道传输过程中外界干扰等因素,所获取的待测信号经常被噪声污染^[5-6]。

为了检测电压暂降和辨识干扰源,文献[7]提出基于短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)的电压暂降扰动检测;而文献[8]则基于改进能量算子和六项余弦窗三谱线,提出了速度快、实时性好的改进傅里叶变换的电压闪变包络参数检测方法;文献[9]对比研究了 STFT 和 S 变换在电压暂降检测中的应用,指出 S 变换的准确率更高、抗噪性更强。为了提高 S 变换的时频分辨率,文献[10]提出了改进不完全 S 变换并应用于检测电压暂降;由于小波变换具有良好时频局部性和窗口自适应性,文献[11]提出了基于 db4 小波变换的方法并应用于配电网常见暂态扰动的检测与定位;而文献[12]基于改进经验小波变换,提出了普适性强、综合性能优越的扰动检测方法。

然而,上述方法的灵敏度在强噪声环境下受到很大影响,如何有效降噪是扰动信号检测时必须解决的问题。文献[13]最早提出用小波硬阈值与软阈值函数进行降噪,但由于在实际应用中存在很大的局限性,诸多研究集中于对阈值函数的改进及其应用^[14];文献[15]则提出了基于小波自适应阈值技术的含噪声电能质量扰动分解检测方法。基于自适应阈值与奇异值分解,文献[16]提出了计算量小、实用性高的通用电能质量检测方法;针对传统阈值函数在零值处不可导的问题,文献[17]提出了根据各小波分解层的信号特点调节趋势参数的降噪方法并应用于轴承故障信号降噪中;针对电能质量扰动信号的去噪问题,文献[18]提出了根据不同扰动信号的噪声分布特点自适应调整的通用阈值函数。

为了对扰动信号进行降噪的同时更好地保留突变位置的信息,提高噪声干扰下暂态扰动检测的准确性,该文提出一种基于小波模极大值(wavelet modulus maximum, WMM)与分层自适应阈值函数(hierarchical adaptive threshold function, HATF)相结合的暂态电能质量扰动检测新方法(WMM+HATF)。根据小波各分解层中的能量占比不同,引入可调参数自适应获取每层的 HATF 并应用其对待测信号降噪,以此来降低噪声干扰对

WMM 检测方法的影响。在 Matlab 平台下,通过仿真分析以及算法对比验证所提方法的可行性及优越性。

1 WMM 及噪声对其检测效果影响

暂态电能质量扰动定位的关键是确定扰动的局部突变点位置。扰动信号经小波变换后的模极大值点往往能够反映出信号的突变信息,因此,可以通过确定模极大值点的位置来定位扰动起止时刻^[11]。

1.1 检测步骤

设小波变换的细节系数为 d_n (n 表示小波变换的分解层数),它包含着信号的高频信息,而信号局部突变点的信息主要在小波分解的第一层细节系数 d_1 中,可通过小波变换后 d_1 的模极大值点的位置对扰动进行定位。具体步骤如下。

1) 信号采样。对待测信号每周期采样 100 个点,即采样频率设置为 5 kHz,得到采样序列。

2) 确定小波基与分解尺度。根据 db4 小波的适宜性^[19-20],选择其对采样序列进行 5 层分解,得到细节系数 d_1 。

3) 定位突变点。求出 d_1 的模极大值及其位置,模极大值点即为信号的突变点。

4) 确定扰动起止时刻。记录模极大值点对应时刻与时间间隔,即为扰动的起止时刻与持续时间。

1.2 噪声对 WMM 检测方法的影响

以电压暂降扰动信号 $s(t)$ 为例说明高斯白噪声 $n(t)$ 对 WMM 检测结果的影响。

$$s(t) = \{1 - A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin(\omega_0 t) + n(t) \quad (1)$$

式中 A 为暂降幅度。

有、无 $n(t)$ 时的检测结果对比如图 1 所示,可以看出,当无噪声信号经过小波分解后,通过 d_1 的模极大值点能准确定位扰动起止时刻;而在噪声干扰下,含噪信号 d_1 的模极大值已经完全被噪声淹没。因此,首先通过 HATF 降噪算法对采样信号进行降噪处理,进而利用 WMM 检测算法对降噪后的信号进行检测定位,以此来降低噪声干扰的影响,提高检测精度。

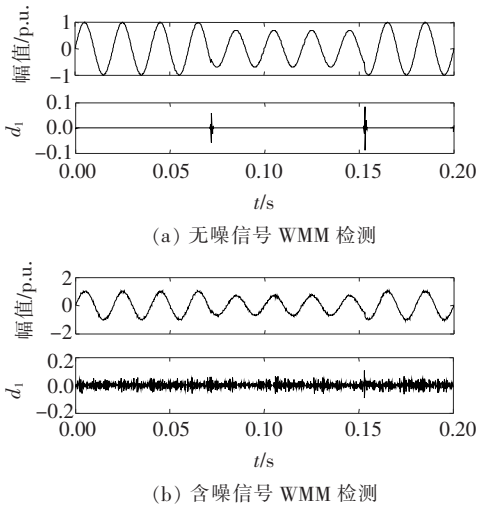


图 1 无噪信号与含噪信号检测结果对比
Figure 1 Detection results comparison between noise-free and noisy signal

2 HATF 降噪算法

2.1 HATF

采样获得的含噪信号 $s(t)$ 可认为由纯净信号 $x(t)$ 与噪声信号 $n(t)$ 组成,即

$$s(t) = x(t) + n(t) \quad (2)$$

小波阈值降噪是 $s(t)$ 小波分解后对小波系数进行处理的过程,而阈值函数直接影响降噪质量。传统的硬阈值函数 T_h 和软阈值函数 T_s 可表示为

$$T_h = \begin{cases} x, & |x| \geq \lambda \\ 0, & |x| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

$$T_s = \begin{cases} \text{sgn}(x)(|x| - \lambda), & |x| \geq \lambda \\ 0, & |x| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ 为函数的阈值。

传统阈值函数如图 2(a) 所示,可知 T_h 在零值处间断,使得降噪后信号的平滑性较差,易将信号突变点信息滤除; T_s 虽在零值处连续但会导致重构信号的相似性变差。为了兼有 T_h 和 T_s 的优点,使信号降噪后仍保留更多的细节信息,则构建 HATF,通过可调参数 μ 实现自适应调节:

$$T(x, \mu) = \begin{cases} x + \frac{\lambda}{\mu + 1} e^{\lambda - |x|} - \lambda, & x \geq \lambda \\ \text{sgn}(x) \frac{|x|^{\mu+1}}{(\mu + 1)\lambda^\mu} e^{\lambda - |x|}, & |x| < \lambda \\ x - \frac{\lambda}{\mu + 1} e^{\lambda - |x|} + \lambda, & x \leq -\lambda \end{cases} \quad (5)$$

根据 $n(t)$ 和 $s(t)$ 小波变换各分解层的能量分布特性建立 μ 的数学模型:

$$\mu_j = \frac{E_{s_j} + 10E_{n_j}}{E_{s_j}} \quad (6)$$

式中 E_{n_j} 、 E_{s_j} 分别为第 j 层分解中 $n(t)$ 、 $s(t)$ 的能量。而 $E_{n_1} \approx E_{s_1}$, 其余则 $E_{s_j} = 2^j E_{n_j}$, 可以推算各分解层上 μ 的取值,取其范围为 1~11。

$\mu = 2, 5, 9$ 时的 HATF 如图 2(b) 所示,可见 μ 取较大值时阈值函数向 T_h 靠拢,反之则偏向 T_s 。在小波变换的低分解层中,由于 E_{n_j} 所占比例较大,可以选择较大 μ 值使得该层阈值函数偏向 T_h ,从而滤除大部分噪声系数;在高分解层中,信号能量所占比例大,因而可以选择偏小 μ 值来偏向 T_s ,从而能够更好地保留局部突变点的信息。

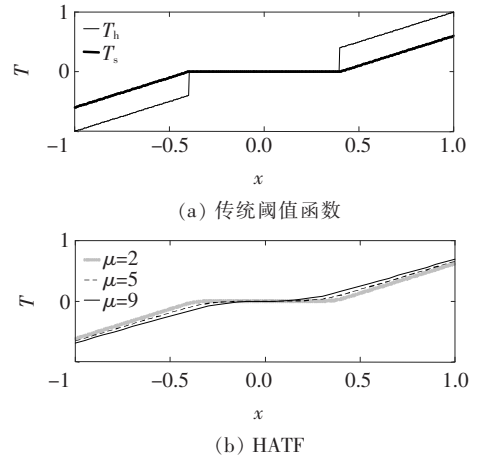


图 2 传统阈值函数与 HATF
Figure 2 Illustration of traditional threshold function and HATF

2.2 降噪流程

基于 HATF 的降噪流程如图 3 所示。具体步骤如下。

1) 选则合适的小波基。由于具有良好的相似性与对称性,故选择 Sym4 小波作为小波基函数。

2) 确定分解层数。通过获取信号的最小频率 f_{\min} 确定最大分解层数 N ,即

$$2^{N-1} \leq \frac{f_0}{\Delta t \cdot f_{\min}} \leq 2^N \quad (7)$$

式中 Δt 为采样周期; f_0 为小波基函数的中心频率。

3) 由式(6)获得各分解层的调节因子 μ 。

4) 计算各分解层的阈值 λ [21]。

5) 通过 μ 与 λ 获得各分解层的自适应阈值函数,并对小波分解后的细节系数 d_n 进行处理。

6) 将各分解层的近似系数与细节系数进行小波重构, 得到重构信号。

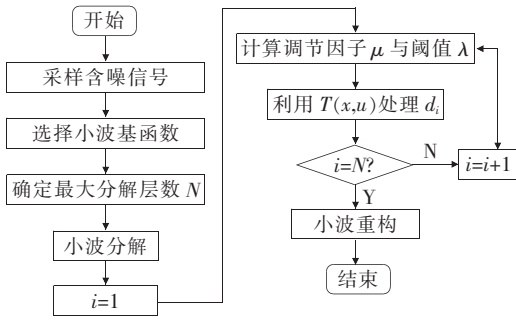


图 3 HATF 降噪算法流程

Figure 3 Flow chat of HATF noise reduction algorithm

3 算例分析

3.1 基于 HATF 的降噪结果

按照 IEEE 标准^[22]可获得如表 1 所示的 5 种典型单一扰动信号模型。利用 HATF 降噪算法对 5 种典型单一扰动信号与电压暂降+暂态振荡复合扰动信号进行降噪处理, 结果如图 4 所示, 可见无论是单一扰动还是复合扰动信号, HATF 降噪算法均能够有效降噪, 降噪后的信号与原信号相似度高, 在提高平滑度的基础上保留了突变点位置的信息, 有利于在后续扰动信号检测中对突变点进行准确定位。

表 1 暂态电能质量扰动模型表达式

Table 1 Mathematical model of transient power quality

类型	信号模型和参数设置
电压暂升	$x(t) = \{1 + A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin(\omega_0 t) + n(t), 0.1 \leq A \leq 0.8, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
电压暂降	$x(t) = \{1 - A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin(\omega_0 t) + n(t), 0.1 \leq A \leq 0.9, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
电压中断	$x(t) = \{1 - A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin(\omega_0 t) + n(t), 0.9 \leq A \leq 1, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3s$
瞬时脉冲	$x(t) = \sin(\omega_0 t) + A[u(t - t_1) - u(t - t_2)] + n(t), 0.3 \leq A \leq 3, 0.1 \text{ ms} \leq t_2 - t_1 \leq 3 \text{ ms}$
暂态振荡	$x(t) = \sin(\omega_0 t) + A e^{-c(t-t_1)} \sin(\beta \omega_0 t) \cdot [u(t - t_1) - u(t - t_2)] + n(t)$ $0.1 \leq A \leq 0.8, 5 \leq c \leq 10, 8 \leq \beta \leq 15, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$

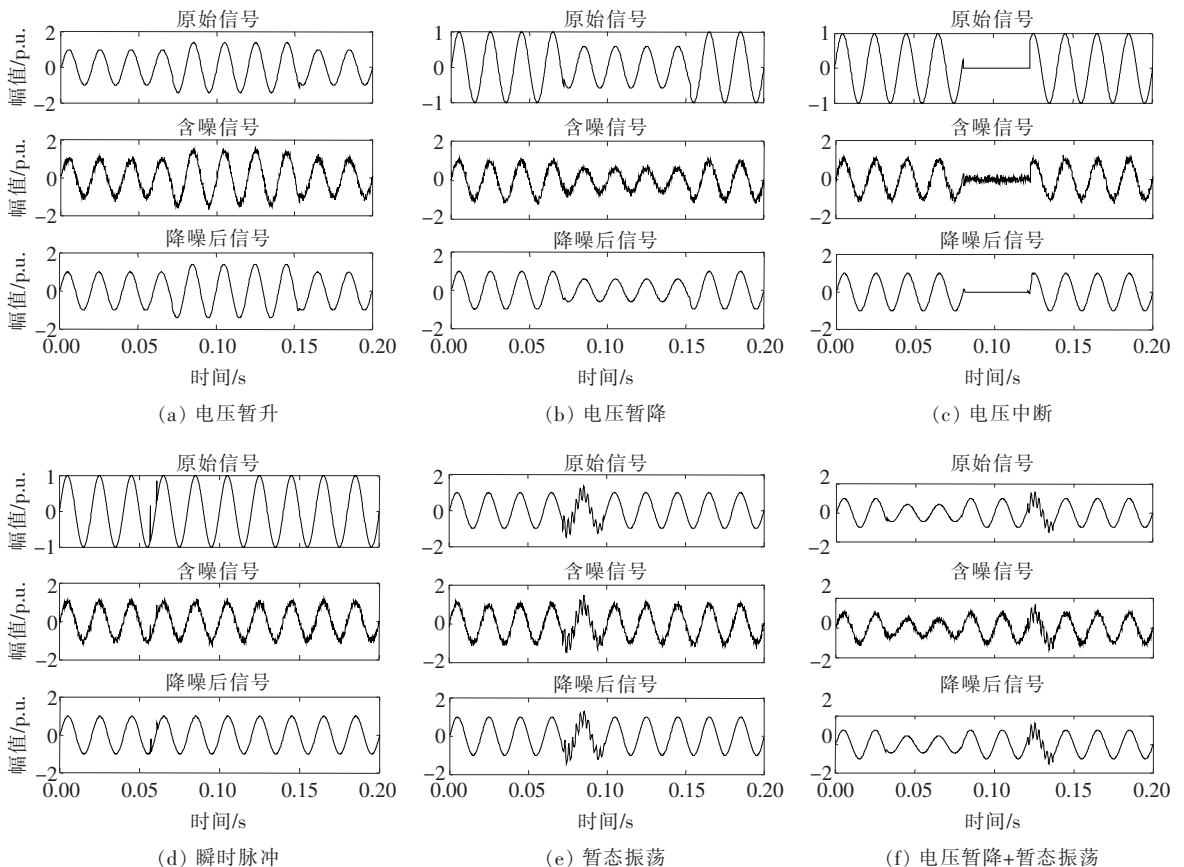


图 4 6 种不同类型扰动信号降噪结果

Figure 4 Noise reduction results for six types of disturbance signal

3.2 降噪结果对比分析

令 V_x 、 V_n 分别代表纯净信号、噪声电压的有效值,信噪比(signal to noise ratio, SNR)可以定量评判降噪效果,降噪后其值越高降噪效果越好。信噪比单位为 dB^[23],其计算公式为

$$S_{\text{SNR}} = 20 \log \frac{V_x}{V_n} \quad (8)$$

HATF 与硬阈值、软阈值和改进阈值函数^[18]的降噪结果对比如表 2 所示,可见在不同噪声强度下,

对于单一与复合扰动信号, HATF 的降噪效果最好。以电压暂降+暂态振荡的复合扰动信号为例,当含噪信号 SNR 为 30 dB 时,利用 HATF 降噪后的 SNR 相较硬阈值、软阈值和改进阈值函数分别提高了 4.48%、1.10% 和 0.80%;当含噪信号 SNR 为 20 dB 时,降噪后 SNR 分别提高了 3.31%、1.90% 和 0.58%;当含噪信号 SNR 为 15 dB 时,降噪后 SNR 分别提高了 4.95%、2.12% 和 0.78%。

表 2 4 种阈值函数降噪结果 SNR 对比

Table 2 Noise reduction SNR comparison with four kinds of threshold functions dB

降噪算法	不同噪声强度(dB)下 4 种扰动类型的降噪 SNR											
	电压暂降			瞬时脉冲			暂态振荡			暂降+振荡		
	30	20	15	30	20	15	30	20	15	30	20	15
硬阈值函数	39.12	32.38	28.04	39.69	32.27	28.49	38.91	31.87	27.79	38.83	31.73	27.07
软阈值函数	41.55	33.69	28.57	41.53	33.31	28.83	40.98	32.79	28.17	40.13	32.17	27.78
改进阈值函数	41.77	33.85	28.68	41.72	33.39	28.94	41.28	32.82	28.45	40.25	32.59	28.15
HATF	41.85	34.02	28.71	41.83	33.53	29.01	41.34	32.91	28.62	40.57	32.78	28.37

3.3 扰动定位对比及分析

采样获取 SNR 为 15 dB 的单一和复合扰动信号,利用 WMM 对降噪后的信号进行检测定位,在

最不利的情况下对比分析 4 种检测方法的检测效果,如图 5 和表 3 所示。由于采样频率设置为 5 kHz,故采样间隔 $\Delta t = 0.0002 \text{ s}$ 。

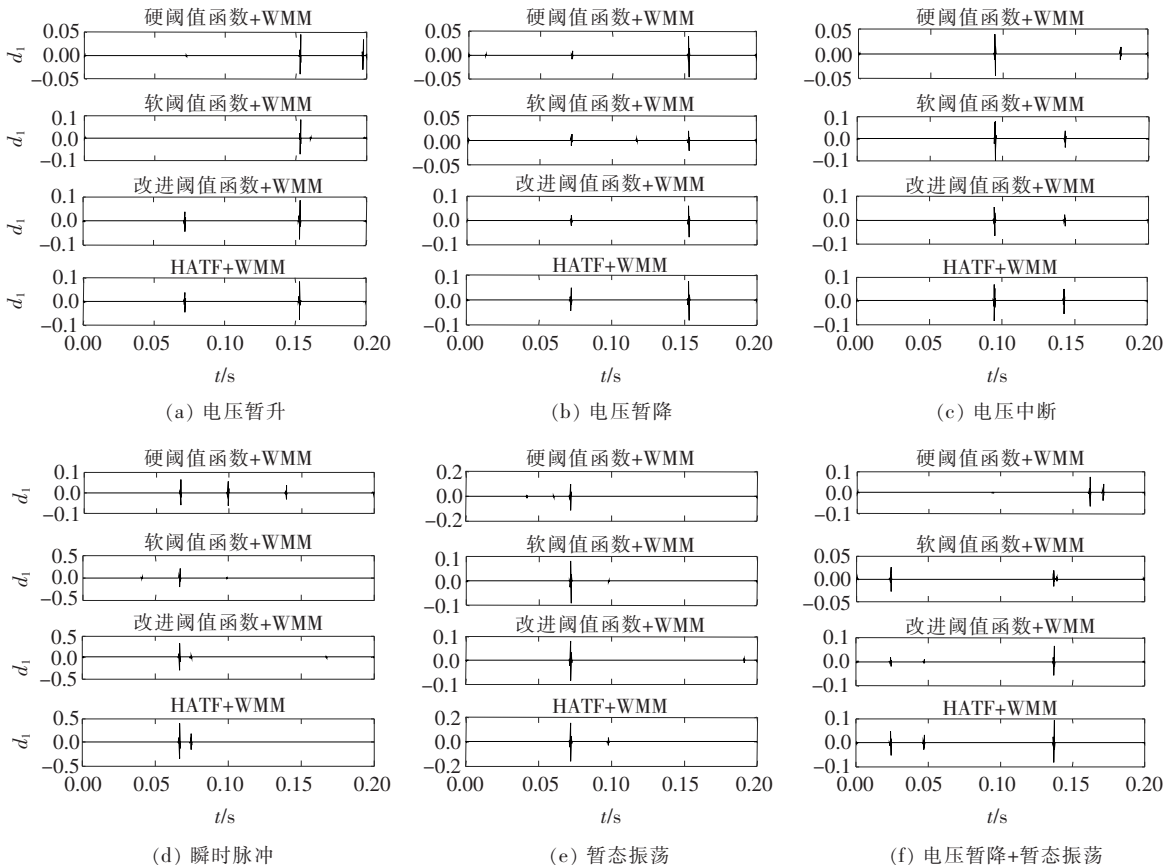


图 5 6 种不同类型扰动信号定位结果

Figure 5 Detection results for six types of disturbance signal

表 3 4种降噪算法处理后的扰动信号定位时间

Table 3 Positioning time of the disturbance signal after four kinds of noise reduction algorithms processing

扰动类型	降噪算法	采样时间(开始)/s			采样时间(结束)/s			误检测/ 检测不到
		设定值	实际值	误差	设定值	实际值	误差	
电压 暂升	硬阈值函数		*	—		0.153 0	0	是
	软阈值函数		*	—		0.152 6	$2\Delta t$	是
	改进阈值函数	0.072 0	0.072 2	Δt	0.153 0	0.152 8	Δt	否
	HATF		0.072 0	0		0.153 0	0	否
电压 暂降	硬阈值函数		0.072 8	$4\Delta t$		0.154 2	$6\Delta t$	否
	软阈值函数		0.071 2	$4\Delta t$		0.152 6	$2\Delta t$	是
	改进阈值函数	0.072 0	0.071 8	Δt	0.153 0	0.153 2	$2\Delta t$	否
	HATF		0.072 2	Δt		0.153 0	0	否
电压 中断	硬阈值函数		0.095 2	Δt		*	—	是
	软阈值函数		0.095 6	$3\Delta t$		0.143 8	$4\Delta t$	否
	改进阈值函数	0.095 0	0.094 6	$2\Delta t$	0.143 0	0.142 4	$3\Delta t$	否
	HATF		0.095 0	0		0.143 2	$2\Delta t$	否
瞬时 脉冲	硬阈值函数	0.066 0	0.066 0/*	0/—	0.067 0	0.067 0/*	0/—	是
	软阈值函数	(脉冲 1)/	0.066 0/*	0/—	(脉冲 1)/	0.067 0/*	0/—	是
	改进阈值函数	0.074 0	0.066 0/0.072 0	$0/10\Delta t$	0.075 0	0.067 0/0.073 4	$0/8\Delta t$	否
	HATF	(脉冲 2)	0.066 0/0.074 0	0/0	(脉冲 2)	0.067 0/0.075 0	0/0	否
暂态 振荡	硬阈值函数		0.072 6	$3\Delta t$		*	—	是
	软阈值函数		0.072 0	0		*	—	是
	改进阈值函数	0.072 0	0.072 0	0	0.098 0	*	—	是
	HATF		0.072 0	0		0.097 8	Δt	否
暂升+ 脉冲	硬阈值函数	0.024 0	*/*	—/—	0.173 0	*/*	—/—	是
	软阈值函数	(暂升)/	0.024 0/0.136 0	$0/5\Delta t$	(暂升)/	*/0.137 0	$-/5\Delta t$	是
	改进阈值函数	0.137 0	0.023 2/0.138 0	$4\Delta t/5\Delta t$	0.138 0	0.174 2/0.138 0	$6\Delta t/0$	否
	HATF	(脉冲)	0.024 0/0.137 0	0/0	(脉冲)	0.173 0/0.138 0	0/0	否

注：“*”表示实际未测到

若降噪算法对噪声滤除能力不强,则检测时易将噪声误认为是信号局部突变点,在设定时间之外出现新的模极大值,导致误检测现象;若降噪算法在滤除噪声的同时将局部突变点信息一并滤除,则出现检测不到或扰动起止时刻的定位不准确。由图 5 和表 3 可知,硬阈值函数+WMM 灵敏性欠佳,除电压暂降扰动外,对其余 5 种扰动信号的起止时刻定位不准确,对于电压暂升、电压中断、瞬时脉冲与复合扰动信号甚至出现误检测;软阈值函数+WMM 相较硬阈值函数+WMM 误检测出现次数有所减少,但对于电压暂升、瞬时脉冲、暂态振荡以及复合扰动信号均未能正确检测到。而且这 2 种检测方法

在定位时会存在较大误差,如前者对电压暂降扰动信号定位的起、止时刻误差为 $4\Delta t$ 、 $6\Delta t$,后者对电压中断扰动定位时起、止时刻误差为 $3\Delta t$ 、 $4\Delta t$ 。相较这 2 种方法,改进阈值函数+WMM 出现误检测和检测不到的情况有所降低,且仅对暂态振荡的终止时刻未能定位,对于脉冲 2 扰动的起、止定位误差为 $10\Delta t$ 、 $8\Delta t$ 。HATF+WMM 对 6 种类型扰动信号检测时均未出现误检测或检测不到的情况,且定位误差维持在 Δt 以内。

为更进一步验证,在含噪信号 SNR 为 30、20 和 15 dB 情况下,对上述 6 种类型扰动信号各采样 1 000 次,并通过定位准确率 η 对检测结果进行量化

分析:

$$\eta = \frac{\sum_{m=1}^{1000} k_m}{1000} \times 100\% \quad (9)$$

其中, k_m 取值规则为

$$k_m = \begin{cases} 0, & \text{误差} > \Delta t \\ 1, & \text{误差} \leq \Delta t \end{cases} \quad (10)$$

得到 6 种扰动信号定位准确率,如表 4 所示。

表 4 6 种扰动信号的定位准确率

Table 4 Positioning accuracy of six types of disturbance signal

扰动类型	SNR/dB	定位准确率/%			
		硬阈值 + WMM	软阈值 + WMM	改进阈值 + WMM	HATF + WMM
电压暂升	30	95.2	95.4	95.9	96.8
	20	93.2	93.5	94.8	96.3
	15	90.1	91.9	93.8	95.9
电压暂降	30	94.7	94.9	95.5	97.1
	20	92.9	93.1	94.5	96.6
	15	91.2	91.3	93.4	96.1
电压中断	30	94.5	94.5	95.6	96.9
	20	93.1	93.2	94.9	96.2
	15	91.4	91.7	93.6	95.9
瞬时脉冲	30	92.5	93.1	94.1	95.3
	20	90.1	91.3	93.1	94.7
	15	89.7	90.5	92.2	94.4
暂态振荡	30	90.3	90.7	94.1	95.2
	20	88.9	89.1	93.2	94.9
	15	87.5	87.5	92.1	94.5
暂升+脉冲	30	89.9	89.8	93.5	94.8
	20	88.3	88.5	92.1	94.3
	15	87.2	87.4	91.3	93.5

由表 4 可见,在含噪信号的 SNR 为 30 dB 时,4 种检测方法的检测精度差距并不明显。但随着噪声强度的增大,其他 3 种方法的定位准确率明显下降,而 HATF+WMM 仅有小幅下滑。在 SNR 为 15 dB 时,HATF+WMM 对电压暂升、电压暂降、电压中断、瞬时脉冲、暂态振荡和电压暂升+瞬时脉冲复合扰动信号的定位准确率分别能够维持在 95.9%、96.1%、95.9%、94.4%、94.5% 和 93.5%。

3.4 实测扰动信号定位结果

取自某系统电能质量在线监测装置的实测扰动信号如图 6(a)所示,故障记录显示线路 A 相发生瞬时接地短路故障,致使故障相出现电压暂降。对该故障信号进行采样,采样时长为 0.6 s,在数据采集过程中,由于外界的电磁干扰,采集的信号中掺杂了不同强度的噪声。利用 HATF+WMM 对采样信号进行检测定位,定位结果如图 6(b)所示,可见实测电压暂降信号变化复杂,电压波形由缓慢降低直至中断,又逐渐升高至恢复正常,检测结果显示,扰动发生时间为 0.215 8 s,结束时间为 0.463 2 s,检测结果未受到噪声干扰的影响。

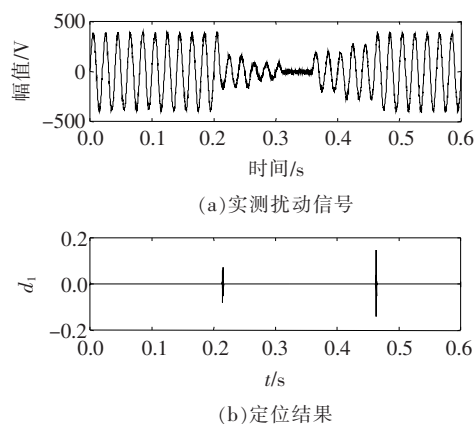


图 6 实测扰动信号定位结果

Figure 6 Measured disturbance signal positioning result

4 结语

为了对噪声干扰下的暂态扰动信号进行有效检测,该文提出了一种将 WMM 检测算法与 HTAF 降噪算法相结合的暂态电能质量扰动检测新方法,通过仿真分析与算法对比,得出结论如下:

1) WMM 检测算法简单,通过确定细节系数模极大值点的位置定位扰动,对于无噪的单一扰动与复合扰动信号都具有良好的检测效果;

2) 与硬阈值、软阈值和改进阈值函数相比,HTAF 具有明显的降噪效果;

3) WMM+HTAF 检测方法适用范围广,定位准确率高,且在强噪声环境下能够保持较高的定位精度。

参考文献:

- [1] 杨翮,张林强,孙可,等. 法国可再生能源区域发展政策的研究[J]. 高压电器,2019,55(10): 241-246.
YANG Xuan,ZHANG Linqiang,SUN Ke,et al. Analysis on regional development policy of renewable energy in France[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(10): 241-246.
- [2] 马嘉秀,徐玮浓,何复兴,等. 基于 WT 和 SVM 的电能质量分类识别方法[J]. 智慧电力,2019,47(3): 16-22.
MA Jiaxiu,XU Weinong,HE Fuxing,et al. A novel power quality classification and identification method based on WT and SVM[J]. Smart Power,2019,47(3): 16-22.
- [3] 许立武,李开成,罗奕,等. 基于不完全 S 变换与梯度提升树的电能质量复合扰动识别[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6): 30-37.
XU Liwu,LI Kaicheng,LUO Yi,et al. Classification of complex power quality disturbances based on incomplete S-transform and gradient boosting decision tree[J]. Power System Protection and Control,2019,47(6): 30-37.
- [4] 钟庆,姚蔚琳,许中,等. 基于平均点线距的电压暂降系统级评估方法[J]. 中国电力,2020,53(11): 9-14.
ZHONG Qing,YAO Weilin,XU Zhong,et al. A system assessment method for voltage sag severity based on average point-to-line distance index[J]. Electric Power,2020,53(11): 9-14.
- [5] 张宇辉,武东斌,吴家明,等. 基于品质因子可调小波变换与排列熵的电能质量信号检测方法[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1): 75-80.
ZHANG Yuhui,WU Dongbin,WU Jiaming,et al. Power quality signal detection method with tunable Q-factor wavelet transform and permutation entropy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(1): 75-80.
- [6] 谢林枫,王红星,刘军成,等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源,2020,36(4): 41-47.
XIE Linfeng,WANG Hongxing,LIU Juncheng,et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(4): 41-47.
- [7] 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.
- [8] 古庭赞,高云鹏,吴聪,等. 基于改进能量算子和六项余弦窗频谱校正的电压闪变包络参数检测[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(23): 44-51.
GU Tingyun,GAO Yunpeng,WU Cong,et al. Voltage flicker envelope parameter detection based on improved energy operator and six-term cosine window spectrum correction[J]. Power System Protection and Control,2019,47(23): 44-51.
- [9] 徐健,张语勃,李彦斌,等. 短时傅里叶变换和 S 变换用于检测电压暂降的对比研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24): 44-48.
XU Jian,ZHANG Yuqing,LI Yanbin,et al. Comparative study of STFT and S transform on detecting voltage sag[J]. Power System Protection and Control,2014,42(24): 44-48.
- [10] 肖助力,龚仁喜,陈双. 一种改进不完全 S 变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(9): 62-68.
XIAO Zhuli,GONG Renxi,CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform [J]. Power System Protection and Control,2015,43(9): 62-68.
- [11] 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.
- [12] 吴建章,梅飞,潘益,等. 基于改进经验小波变换的电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(6): 142-151.
WU Jianzhang,MEI Fei,PAN Yi,et al. Novel detection method of power quality disturbance based on IEWT[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6): 142-151.
- [13] DONOHO D L,JOHSTONE I M. Adapting to un-

- known smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90(432): 1200-1224.
- [14] 谭莲子,张莉萍,解大,等. 改进小波阈值去噪法在谐波检测中的应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 23-26+75.
- TAN Lianzi, ZHANG Liping, XIE Da, et al. Application of improved wavelet threshold de-noising method in harmonic detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 23-26+75.
- [15] 唐圣学,付滔,李志刚. 基于自适应小波阈值去噪和HT-LMD的电能质量扰动检测方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 70-76.
- TANG Shengxue, FU Tao, LI Zhigang. Power quality disturbance detection method based on adaptive wavelet threshold de-noising and HT-LMD[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 70-76.
- [16] 杨晓梅,罗月婉,肖先勇,等. 基于自适应阈值和奇异值分解的电能质量扰动检测新方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2286-2294.
- YANG Xiaomei, LUO Yuewan, XIAO Xianyong, et al. A new detection approach of power quality disturbances based on adaptive threshold and singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2286-2294.
- [17] 王普,李天垚,高学金,等. 分层自适应小波阈值轴承故障信号降噪方法[J]. 振动工程学报, 2019, 32(3): 548-556.
- WANG Pu, LI Tianyao, GAO Xuejin, et al. Bearing fault signal denoising method of hierarchical adaptive wavelet threshold function[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(3): 548-556.
- [18] 王维博,董蕊莹,曾文入,等. 基于改进阈值和阈值函数的电能质量小波去噪方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 409-418.
- WANG Weibo, DONG Ruiying, ZENG Wenru, et al. A wavelet de-noising method for power quality based on an improved threshold and threshold function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 409-418.
- [19] 郑成华,张宁宁,王向周. 基于提升小波和Hilbert变换的暂态电能质量检测[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 162-168.
- ZHENG Shuhua, ZHANG Ningning, WANG Xiangzhou. A lifting wavelet and hilbert transform fusion method for transient power quality detection[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2): 162-168.
- [20] 谢东,张兴,曹仁贤. 基于小波变换与神经网络的孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 537-544.
- XIE Dong, ZHANG Xing, CAO Renxian. Islanding detection based on wavelet transform and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 537-544.
- [21] STEIN C M. Estimation of the mean of a multivariate normal distribution[J]. Annals of Statistics, 1981, 9(6): 1135-1151.
- [22] IEEE Standards 1159.3TM—2019. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S].
- [23] 范小龙,谢维成,蒋文波,等. 一种平稳小波变换改进阈值函数的电能质量扰动信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 219-226.
- FAN Xiaolong, XIE Weicheng, JIANG Wenbo, et al. An improved threshold function method for power quality disturbance signal de-noising based on stationary wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 219-226.