

基于改进经验小波变换的电能质量扰动检测新方法

吴建章¹, 梅飞², 潘益¹, 周程¹, 石天¹, 郑建勇¹

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:针对经验小波变换(EWT)用于电能质量信号分析时,其频带划分结果易受频谱泄漏和噪声污染干扰的问题,提出一种基于改进经验小波变换(IEWT)的电能质量扰动检测新方法。首先,通过Fourier谱包络动态测度算法确定扰动信号的特征频点,并在原有频带边界的基础上进行延拓;然后,运用IEWT将扰动信号分解为若干调幅-调频(AM-FM)分量之和;最后对扰动分量实施标准希尔伯特变换,以求取扰动幅值、频率和起止时刻。通过算例仿真和变电站实测数据验证了所提方法的有效性,并对其检测结果进行对比分析。实验结果表明,所提方法兼具良好的模态分解能力和抗噪性能,且普适性更强,运算耗时更短,适用于工程实践。

关键词:电能质量;扰动检测;改进经验小波变换;动态测度;标准希尔伯特变换

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005014

0 引言

随着智能电网建设的不断推进,电力系统中接入的电力电子装置的数量不断增加,源荷波动性特征日益显著,引发了一系列严重的电能质量污染问题^[1]。同时,精密仪器与敏感设备的广泛使用也对电网电能质量提出了更高的要求。为了有效治理和评估电能质量问题,首先应对各类电能质量扰动进行快速准确的分析。

近年来,国内外学者已对电能质量扰动检测方法开展了深入研究。短时傅里叶变换(STFT)能够联合时频信息对扰动信号进行检测,但由于其窗函数固定,检测精度有待提高^[2];小波变换(WT)虽然克服了STFT时频分辨率单一的缺陷,但其小波基和分解层数往往难以确定^[3];S变换作为STFT和WT的扩展,具有良好的时频分析性能和噪声鲁棒性,但其分析结果仍受限于Heisenberg测不准原理,且运算繁杂^[4];以希尔伯特-黄变换^[5](HHT)和局部均值分解^[6](LMD)为代表的非平稳信号分解算法也被运用于电能质量扰动分析,并表现出了良好的自适应性,但该类方法存在模态混叠、对噪声敏感等缺陷,严重制约了其应用范围。此外,文献[7]将变分模态分解(VMD)应用于电能质量扰动检测,该方法较好地克服了模态混叠现象,但需预先设置算法参数,未能实现自适应检测;文献[8]利用奇异值梯度信息对暂态电能质量扰动进行检测,具有较好的噪声抑制能力和过零点检测效果,但无法对幅值、频率等扰动参数

进行检测。

经验小波变换EWT(Empirical Wavelet Transform)是由法国学者Gilles^[9]于2013年提出的一种新的信号分析方法,该方法融合了经验模态分解(EMD)的自适应性和小波分析的理论框架,能够以少量运算成本获取良好的分析效果,在抑制EMD模态混叠问题的同时,弥补了WT频带划分固定的缺陷,已被有效应用于工程信号分析。文献[10]提出了一种基于EWT的电晕电流降噪方法,并指出频带划分方式直接决定了EWT的自适应性。文献[11]将EWT用于电能质量指标估计,但其未能抑制传统EWT存在的频谱“过切分”现象。为克服这一缺陷,文献[12]利用尺度空间表示法勾勒地震信号频谱趋势,并由此确定频带边界;文献[13]则运用基于自回归模型的Burg功率谱估计算法对传统EWT频带划分方法进行改进,实现了太阳帆板振动信号的准确分解。类似的改进方案还有许多,但其大多是为处理某一特定问题而设计的,并未考虑不同类型电能质量扰动信号的时频特征,若将其直接用于电能质量扰动检测,往往适应性较差。

针对上述问题,本文提出一种适用于电能质量扰动分析的改进经验小波变换IEWT(Improved EWT)。首先求取扰动信号Fourier谱包络的极大值动态测度,以此确定特征频点,在原有频谱划分结果的基础上对频带边界进行延拓,并配合标准希尔伯特变换NHT(Normalized HT)设计了一种电能质扰动检测方法。多组单一、复合扰动仿真结果及实测数据分析结果均表明,相比于传统时频分析方法,本文方法通用性更强、实时性更优,具有良好的工程应用前景。

1 传统EWT存在的问题

传统EWT方法的自适应性建立在对信号Fourier谱的准确分割的基础上,频带划分结果直接决定了

收稿日期:2019-09-09;修回日期:2020-03-16

基金项目:国家电网公司科技项目(52199918000C);国家重点研发计划项目(2018YFB0905000)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(52199918000C) and the National Key R&D Program of China(2018YFB0905000)

EWT的分析性能。考虑到对电能质量扰动信号进行频域变换时,时域信号中非平稳分量的存在会引起频谱泄漏问题,潜在的噪声污染也会在频域产生干扰极值点,此时基于localmax方法的传统EWT将无法准确判断扰动特征频点,不可避免地导致分解结果中混入虚假分量,进而影响扰动检测效果。以信噪比(SNR)为30 dB的暂降+谐波+振荡三重扰动为例,设特征频点阈值 $T=0.03$ p.u.,复合扰动波形及其EWT频谱划分结果如图1所示(图中幅值为标么值,后同)。由图可知,除本应存在的2条有效边界外,由频谱泄漏和噪声污染带来的局部无效峰值导致EWT出现了严重的“过切分”现象。

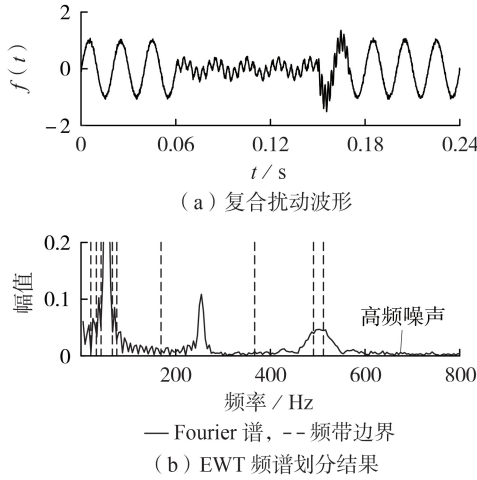


图1 复合扰动波形及其EWT频谱划分结果

Fig.1 Waveform of composite disturbance and its spectrum division results of EWT

2 基于IEWT的电能质量扰动检测方法

2.1 IEWT

针对传统EWT应用于电能质量扰动分析时无法自适应寻找频带边界的缺陷,本文基于文献[14]的思路,结合电能质量扰动信号的频域特点,提出了一种适用于电能质量扰动检测的IEWT方法。设信号 $f(t)$ 是由 N 个调幅-调频(AM-FM)分量构成的离散时间信号,其IEWT分解主要包含以下步骤。

(1)特征频点捕捉。

记 $f(t)$ 的Fourier谱极大值序列为 $\{P_i\}_{i=1}^M$,若相邻两极大值间的频率点数为 $\{K_i\}_{i=1}^{M-1}$,则 $f(t)$ 的频谱极大值包络 $E_{i,j}$ 可表示为:

$$E_{i,j} = P_i + j(P_{i+1} - P_i)/K_i \quad (1)$$

其中, $i=1,2,\dots,M-1; j=1,2,\dots,K_i$ 。对 $E_{i,j}$ 实施极大值动态测度,若 $E_{i,j}$ 中存在比其中某极大值点 x_u 更高的点,则 x_u 的动态测度 $D_{yn}[x_u]$ 等于由该点通向所有同高度路径中最小路径的动态测度:

$$D_{yn}[x_u] = \{i_{nf}\{D_{yn}[l(x_u, x_v)]\}; h_{alt}(x_u) = h_{alt}(x_v)\} \quad (2)$$

其中, $l(x_u, x_v)$ 表示同高度路径; $i_{nf}\{\cdot\}$ 表示下确界;

$h_{alt}(\cdot)$ 表示高度。若 x_u 满足式(3)即可判定其为特征频点,通常取阈值 $T=0.01$ p.u.可以达到满意效果^[15]。

$$D_{yn}[x_u]/x_{\max} \geq T \quad (3)$$

其中, $x_{\max}$ 为 $f(t)$ 的频谱最大幅值。

(2)频带边界延拓。

捕捉全部 N 个特征频点 $\{\Omega_n\}_{n=1}^N$ 后,本文选取相邻两特征频点间包络 $E_{i,j}$ 的中点对应的频率作为频带划分边界。同时,在保留前 N 个边界 $\{\omega_n\}_{n=0}^{N-1}$ 的基础上,依照式(4)对频带边界进行延拓。

$$\begin{cases} \omega_N = \Omega_N + \lambda(\Omega_N - \omega_{N-1}) \\ \omega_{N+1} = \pi \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ 为可调边界延拓系数。此时, $f(t)$ 的频谱将被分割为 $N+1$ 个连续区间 $\{\Lambda_n\}_{n=1}^{N+1}$ 。依据信号频谱中特征频点的数目,可将电能质量扰动分为单频扰动和多频扰动。对于纯净的单频电能质量扰动,参考Mallat算法定义的频带剖分规则,按照式(5)设置 λ 的大小,即定义区间 $\Lambda_{N+1}=[\pi/2, \pi]$,以获取扰动信号频谱中蕴含的高频畸变信息。

$$\lambda = (\pi/2 - \Omega_N)/(\Omega_N - \omega_{N-1}) \quad (5)$$

当扰动信号中混有噪声干扰时,考虑到扰动分量频谱在频域关于其谱峰对称,令 $\lambda=1$ 可以在保留扰动信号频域特征的同时,使最高频分量完全落入上、下截止频率分别为 ω_{N-1} 、 ω_N 的带通滤波器内,从而免受高频噪声的污染。

(3)经验小波分解。

参照Littlewood-Paley和Meyer小波构造方法定义经验小波紧框架 $\{\phi_1(t), \{\psi_n(t)\}_{n=1}^N\}$,并在频域构造经验尺度函数 $\hat{\phi}_n(\omega)$ 和经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$,采用类似经典WT的方法将 $f(t)$ 分别与经验尺度函数和经验小波函数作内积,即可得到近似系数 $W_f^e(0, t)$ 和细节系数 $W_f^e(n, t)$,具体可参阅文献[9]。此外,文献[9]还指出当窗宽因子 γ 满足式(6)时方可获取相应的紧支集窗函数,其值对扰动检测效果无显著影响,本文设置 $\gamma = \gamma_{\min}(1-1/L)/2$, L 为扰动信号长度。

$$\gamma < \min_n \left(\frac{\omega_n - \omega_{n-1}}{\omega_n + \omega_{n-1}} \right) \quad (6)$$

依照上述方法对第1节中的复合扰动进行频谱分割,结果如图2所示。从图中可知,Fourier谱包络

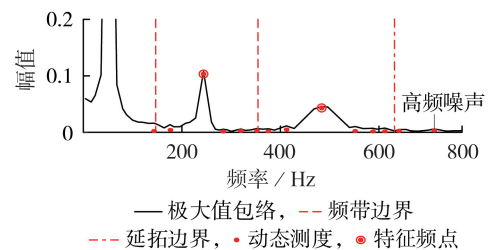


图2 IEWT频谱划分结果

Fig.2 Spectrum division results of IEWT

中干扰极值点的动态测度远小于特征频点的动态测度,因而可以实现扰动信号频谱边界的自适应划分;延拓后的频带边界也保证了暂态振荡分量频域信息的完整性,同时还能滤除高频噪声产生的干扰。

2.2 基于IEWT和NHT的扰动检测方法

由于Fourier变换中存在Gibbs现象,传统HT所求取的瞬时参数常伴有端点飞翼,Huang^[16]等人提出的NHT有效地避免了这一问题,NHT的具体实现过程如下。

(1)采用三次样条函数对 $|x(t)|$ 的极大值点进行拟合,获取经验包络函数 $a(t)$,并依据式(7)对单分量信号 $x(t)$ 进行标准化。

$$x_1(t) = x(t)/a(t) \quad (7)$$

(2)求取标准化后所得信号 $|x_1(t)|$ 的经验包络函数 $a_1(t)$,理论上此时应有 $a_1(t) \leq 1$,否则将上述步骤迭代进行 n 次,直至 $a_n(t) \leq 1$ 。至此,单分量 $x(t)$ 已被分解为调幅与调频部分乘积的形式,标准化后所得信号 $x_n(t)$ 即为调频信号,调幅部分 $A(t)$ 则定义为:

$$A(t) = x(t)/x_n(t) = a(t)a_1(t)a_2(t) \cdots a_n(t) \quad (8)$$

(3)此时, $x_n(t)$ 已为近似纯调频信号,因此不受Bedrosian定理约束,可直接通过HT获取其瞬时频率函数 $F(t)$:

$$\begin{cases} \tilde{x}_n(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_n(t)}{t - \tau} d\tau \\ F(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d \left[\arctan \left(\tilde{x}_n(t)/x_n(t) \right) \right]}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

本文采用NHT对IEWT分解所得的单分量 $x(t)$ 进行解调,以获取更好的电能质量扰动时频分析效果,同时结合IEWT结果和各扰动分量瞬时幅值、频率函数,实现扰动信号参数以及扰动起止时刻的检测。IEWT-NHT的整体流程见附录中的图A1。

3 算例仿真

为验证所提方法的有效性,在MATLAB仿真环境下生成多类典型电能质量扰动信号进行仿真测试。设置采样频率为6.4 kHz,信号时长为0.24 s,实验电脑配有i5-8500 CPU以及16 GB RAM。

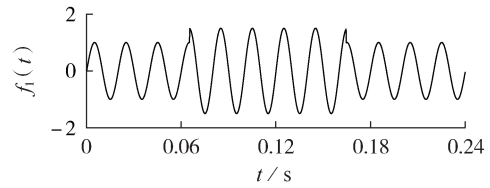
3.1 单频扰动信号分析

3.1.1 电压暂升扰动

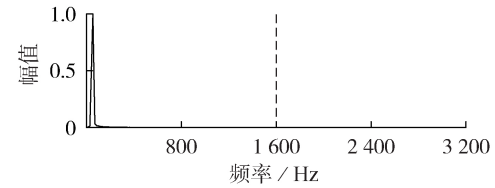
电压暂升扰动的数学模型为:

$$f_1(t) = [1 + 0.5(\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1))] \sin(\omega t) \quad (10)$$

其中, $\varepsilon(\cdot)$ 为阶跃函数; $t_1 = 0.0652$ s; $t_2 = 0.1645$ s; $\omega = 100\pi$ 。运用IEWT对 $f_1(t)$ 进行检测,扰动波形及其频带划分结果如图3所示,扰动分析结果如图4所示。由图可知,对于纯净的电压暂升扰动信号,其特



(a) 电压暂升波形



— Fourier 谱包络, -- 频带边界

(b) IEWT 频谱划分结果

图3 电压暂升波形及其频谱划分结果

Fig.3 Voltage swell waveform and its spectrum division results

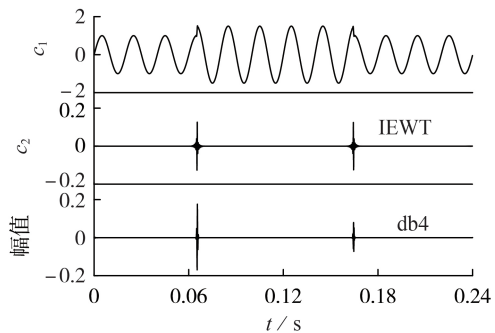


图4 电压暂升分析结果

Fig.4 Analysis results of voltage swell

征频点数 $N=1$,故原信号被分解为近似分量 c_1 和细节分量 c_2 。观察图4可知,在近似分量 c_1 保留了暂升扰动幅值特征的同时,IEWT还继承了经典WT良好的奇异点检测性能,依据 c_2 可以对扰动的起止时刻进行定位,且定位精度可与经典小波方法相媲美。

现有研究表明,当扰动信号中混有噪声时,WT、HHT、LMD等方法将难以对扰动进行有效检测,IEWT也存在类似的问题。向 $f_1(t)$ 中添加信噪比为20 dB的白噪声,若继续按图3中的频谱划分方式对扰动进行检测,则分解结果如图5(a)所示。此时,分量 c_1 、 c_2 均受到严重的噪声污染,难以从中获取有效信息。因此,针对噪声环境下的扰动检测问题,本文对边界延拓系数 λ 进行修正,调整后的频谱划分方式以及扰动分析结果分别如图5(b)、(c)所示。从图5(c)上图可知,染噪信号被分解为基频分量 c_1 和噪声分量 c_2 ,分量 c_1 虽丢失了扰动突变信息,但保留了其幅值特征。分别采用HT和NHT求取 c_1 的瞬时幅值函数 $A(t)$,见图5(c)下图。由图可见,NHT在端点处幅值更加平稳,不存在飞翼现象,因而更适用于提取IEWT分解结果中的扰动信息; c_1 的瞬时幅值曲线 $A(t)$ 中不仅包含扰动幅值信息,还可对扰动

时刻进行定位。考虑到曲线 $A(t)$ 的变化率总是在上升或下降段的中点附近取得最大值,令阈值 $\alpha = [\max(A(t)) + \min(A(t))]/2$, $A(t)$ 穿越 α 时的所在位置即对应扰动的发生与终止时刻,平均误差仅为0.3 ms。采用去除部分端点后均值拟合的方法对扰动期间的幅值曲线进行处理,即可获取扰动幅值大小^[17],且检测误差小于0.2%。

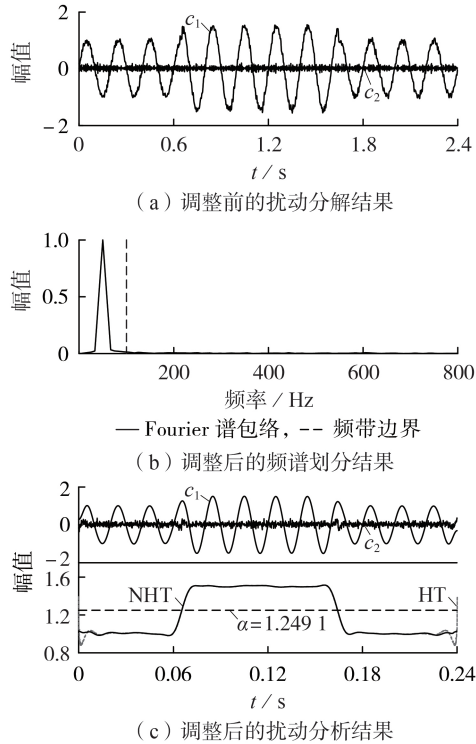


图5 电压暂升分析结果(信噪比为20 dB)

Fig.5 Analysis results of voltage swell(SNR is 20 dB)

3.1.2 电压中断扰动

电压中断扰动的数学模型为:

$$f_2(t) = [1 - 0.92(\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1))] \sin(\omega t) \quad (11)$$

其中, $t_1 = 0.06$ s; $t_2 = 0.18$ s。由于电压中断发生在过零点时刻,以HHT为代表的自适应信号分解算法均无法对其进行有效定位。相比之下,IEWT则可以准确获取扰动信息,检测结果如附录中的图A2(a)所示。

在20 dB噪声干扰下对 $f_2(t)$ 进行检测,分析结果如附录中的图A2(b)所示。由图可知,本文方法亦适用于噪声条件下过零点扰动的检测,由 c_1 的瞬时幅值曲线可获取扰动起止时刻以及扰动幅值,且定位误差均小于0.5 ms,幅值误差仅为0.06%。

3.1.3 暂态脉冲扰动

暂态脉冲扰动的数学模型为:

$$f_3(t) = \sin(\omega t) + 1.5(\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)) \quad (12)$$

其中, $t_1 = 0.1016$ s; $t_2 = 0.1028$ s。扰动波形及其分析结果如附录中的图A3(a)所示,IEWT同样能准确获取暂态脉冲起止时刻,由图可见,由原始波形扰动前后的幅值差可求得脉冲大小。20 dB白噪声下的扰动检测结果如附录中的图A3(b)所示,由图可见, $f_3(t)$ 被分解为基频分量 c_1 和脉冲分量 c_2 , c_2 瞬时幅值曲线的突变极大值点所在位置即为扰动起止时刻,期间幅值曲线均值即为脉冲幅值,所得结果平均定位误差仅为0.1 ms,幅值误差为5.8%。

为验证IEWT的扰动检测效果,分别采用HHT^[5]、LMD^[6]方法对上述扰动进行分析,检测结果如表1所示。表中,扰动幅值为标么值。由表可知,对于含噪扰动或是发生在过零点处的中断扰动,HHT和LMD无法对其进行准确分析。IEWT则不受扰动类型与噪声污染的限制,具有更强的通用性,较之传统时频分析方法,其幅值测量与扰动定位精度也明显更高。

3.2 复合扰动信号分析

3.2.1 复合扰动1

电压暂升+短时谐波复合扰动的数学模型为:

$$f_4(t) = [1 + 0.6(\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1))] \sin(\omega t) + (\varepsilon(t_4) - \varepsilon(t_3))(0.6 \sin(3\omega t) + 0.4 \sin(5\omega t)) \quad (13)$$

其中, $t_1 = 0.09$ s; $t_2 = 0.15$ s; $t_3 = 0.0712$ s; $t_4 = 0.1684$ s。向 $f_4(t)$ 中加入30 dB白噪声并对其进行IEWT分析,染噪波形及其频谱划分结果如附录中的图A4所示,扰动时频分析结果如附录中的图A5所示。由图可知,IEWT有效抑制了噪声干扰,将基频扰动 c_1 和3、5次短时谐波 c_2 、 c_3 从原信号中准确分离出来。相比之下,即使在无噪环境中,HHT和LMD方法均出现了严重的模态混叠现象,无法准确反映扰动发生的物

表1 基于IEWT、LMD、HHT方法的单频电能质量扰动分析结果对比

Table 1 Comparison of single frequency power quality disturbance analysis results among IEWT, LMD and HHT methods

扰动类型	SNR	扰动起始时刻 / s				扰动终止时刻 / s				扰动幅值			
		真实值	测量值			真实值	测量值			真实值	测量值		
			IEWT	LMD	HHT		IEWT	LMD	HHT		IEWT	LMD	HHT
电压暂升	无噪	0.065 2	0.065 4	0.065 4	0.065 3	0.164 5	0.164 5	0.164 8	0.164 7	0.50	0.499 3	0.501 2	0.499 2
	20 dB		0.065 4	—	—		0.164 9	—	—		0.498 1	—	—
电压中断	无噪	0.060 0	0.060 1	0.079 8	0.069 3	0.180 0	0.180 1	0.157 3	0.170 9	0.92	0.920 5	0.915 7	0.918 6
	20 dB		0.060 3	—	—		0.180 0	—	—		0.912 4	—	—
暂态脉冲	无噪	0.101 6	0.101 7	0.101 8	0.101 7	0.102 8	0.102 9	0.102 9	0.103 0	1.50	1.542 6	1.423 5	1.388 4
	20 dB		0.101 8	—	—		0.102 8	—	—		1.411 9	—	—

注:“—”表示无法检测,后同。

理过程。

对扰动单分量 c_1-c_3 实施NHT,由瞬时幅值曲线可分别判断各单一扰动的起止时刻以及扰动幅值,依据扰动期间的瞬时频率曲线能够准确计算出扰动频率的大小,结果如附录中的表A1所示。由表可知,本文方法的平均定位误差仅为0.9 ms,幅值和频率测量误差均小于0.5%,检测精度良好,这也表明本文方法兼具较好的模态分解能力与噪声鲁棒性。

3.2.2 复合扰动2

电压暂降+谐波+暂态振荡三重复合扰动的数学模型为:

$$f_5(t)=[1-0.7(\varepsilon(t_2)-\varepsilon(t_1))][\sin(\omega t)+0.3\sin(5\omega t)]+0.5e^{-25(t-t_3)}(\varepsilon(t_4)-\varepsilon(t_3))\sin(10\omega(t-t_3)) \quad (14)$$

其中, $t_1=0.07$ s; $t_2=0.16$ s; $t_3=0.174$ s。同样在30 dB的信噪比下对其进行检测,含噪扰动波形及其频谱划分结果、复合扰动分析结果分别如附录中的图A6、图A7所示。由图A6可知,IEWT克服了由噪声污染和频谱泄漏导致的“过切分”问题,自适应地从原始扰动中分离出暂降扰动 c_1 、时变谐波 c_2 以及振荡分量 c_3 ,且几乎不含噪声干扰。

对于扰动 $f_5(t)$,HHT和LMD方法同样受制于其模态分解能力而无法对其进行有效分析。对各分量分别求取瞬时幅值以及瞬时频率曲线以准确获取扰动参数,检测结果如附录中的表A2所示。由表可知,本文方法能够独立获取各单一扰动分量的特征参数,且准确性良好,定位误差最大仅为0.8 ms,除振荡幅值外,幅值和频率误差均小于1.8%。

3.3 算法实时性分析

为进一步说明本文检测算法的实时性,分别采用HHT^[5]、VMD^[7]、MIST^[18]和本文方法对纯净扰动信号 $f_1(t)-f_5(t)$ 进行检测,算法耗时对比结果见表2。

表2 检测算法实时性对比

Table 2 Real-time comparison among different detection algorithms

扰动信号	运算耗时 / s			
	HHT	VMD	MIST	IEWT
$f_1(t)$	0.0392	0.2487	0.0595	0.0048
$f_2(t)$	0.0415	0.2602	0.0615	0.0054
$f_3(t)$	0.0563	0.2465	—	0.0039
$f_4(t)$	—	0.4829	0.0964	0.0067
$f_5(t)$	—	0.4371	0.0886	0.0062

由表2可知,VMD方法能够同时分析全部5类扰动,但由于算法存在多次迭代分解过程,因此耗时最久;MIST方法虽在原始S变换的基础上有所简化,但运算时间仍然较长;HHT方法的运算量相对较小,但其无法对复杂扰动进行分析;相比之下,本文算法以WT为理论基础,无需对扰动信号进行迭代筛分,算法耗时约为HHT方法的1/10,具有良好的实时检测性能。

4 实测信号分析

4.1 实测谐波扰动分析

以某地35 kV配电线路发生的一起单相短路事件为例,故障期间短路相电压波形(已归一化处理,后同)及其频谱划分结果如图6所示,录波装置采样频率为12.8 kHz,信号时长为0.24 s。

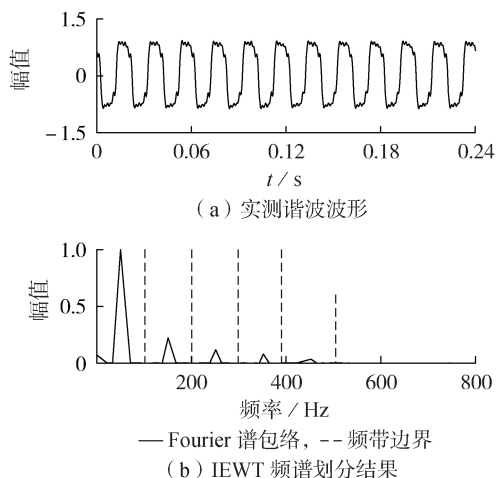


图6 实测谐波扰动及其频谱划分结果

Fig.6 Measured harmonics disturbance and spectrum division results

对该实测信号进行IEWT-NHT时频分析,扰动分解结果及其时频谱图如附录中的图A8所示。由图A8可知,IEWT凭借其良好的模态分解性能从原始信号中有效提取基波以及各次谐波。进一步观察基于各扰动分量绘制的NHT时频谱图可以发现,各模态幅值平稳且频率单一,能够从中准确获取谐波的幅值与频率大小。相比之下,由于真实谐波扰动中各次谐波的幅频参数并非恒定不变,扰动波形中极值点分布不均,故HHT、LMD方法均出现了模态混叠。

分别在无噪以及30 dB信噪比下采用本文方法对该扰动进行分析,以验证本文算法用于实测信号分析时的抗噪性能,并将结果与无噪环境下由IEC推荐的基于加窗Fourier变换的谐波测量方法所得结果进行对比,结果如表3所示。表中,幅值为标么值。由表可知,本文方法检测结果与IEC标准结果

表3 实测谐波检测结果

Table 3 Detection results of measured harmonics

谐波次数	幅值			频率 / Hz		
	IEC标准	IEWT-NHT		IEC标准	IEWT-NHT	
		无噪	30 dB		无噪	30 dB
基波	1.0000	1.0000	1.0008	50	50.04	50.03
3	0.2258	0.2251	0.2251	150	149.98	149.97
5	0.1165	0.1171	0.1162	250	249.95	250.08
7	0.0819	0.0817	0.0824	350	349.83	349.75
9	0.0359	0.0366	0.0368	450	449.51	449.48

十分接近,幅值和频率平均检测误差分别为0.68%和0.07%,具有良好的检测精度,同时也表明,较强的噪声耐受性能使得该方法即使在噪声干扰下也能对实测扰动进行准确分析。

4.2 实测暂升扰动分析

实测暂升扰动取自某110 kV变电站电能质量在线监测装置,采样频率为12.8 kHz,信号时长为0.4 s。故障记录显示线路A相发生瞬时接地短路故障,致使非故障相出现电压暂升,其中C相波形及其频谱划分结果如图7所示,扰动分析结果如附录中的图A9所示。

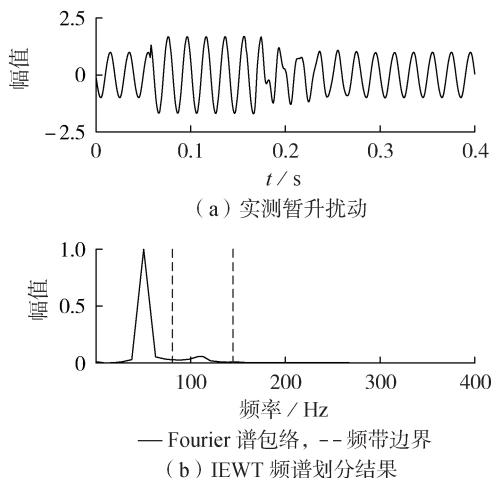


图7 实测暂升扰动波形及其频谱划分结果
Fig.7 Measured voltage swell waveform and spectrum division results

联合Fourier谱包络以及扰动分解结果可知,扰动信号中除基频暂升分量外,在系统重合闸后的5~6个工频周期内还伴有衰减的暂态振荡,这主要是重合闸期间线路中储能元件所存储的电磁能量发生衰减振荡而导致的。

为了验证本文方法用于实测复合扰动信号检测的有效性,首先依据实测扰动波形及其Fourier谱提取扰动参数,其中电压暂升存在于0.0581~0.1749 s,暂升幅值为0.6772 p.u.;暂态振荡存在于0.1749~0.2906 s,振荡幅值为0.6218 p.u.,振荡频率为110 Hz。然后,采用本文方法对复合扰动进行分析,由IEWT所得的 c_1 、 c_2 分量的瞬时幅值曲线可知,电压暂升存在于0.0589~0.1756 s,暂升幅值为0.6731 p.u.,对于暂升扰动,本文方法的定位误差均小于0.8 ms,幅值误差仅为0.6%;暂态振荡起始于0.1752 s,自起始时刻开始,当 c_2 瞬时幅值小于0.01 p.u.时则可判定自由衰减振荡消失于0.2891 s,由振荡期间的瞬时幅值、频率曲线可以准确求得振荡幅值为0.6194 p.u.,暂态振荡频率为109.84 Hz,相比之下,本文方法的定位平均误差仅为0.9 ms,幅值和频率检测误差均小于0.4%。

5 结论

本文对传统EWT的频谱划分方式进行改进,以克服其频带划分自适应性弱的缺陷,并配合NHT方法,提出一种基于IEWT的电能质量扰动检测方法,通过多组仿真信号和实测数据对比实验得出结论如下:

(1)本文方法有效抑制了传统EWT存在的频谱“过切分”现象,相比HHT和LMD方法,本文方法不存在模态混叠,同时NHT方法还能准确地从各模态中提取扰动参数,因此具有良好的时频分析效果;

(2)本文方法无需前置滤波单元,无论是纯净信号还是染噪扰动信号,均能对其进行准确分析,对于过零点扰动同样能够取得不错的检测效果,普适性较强;

(3)较之其他时频分析方法,本文方法运算量低,实时性良好,易于整合至数字监测装置,适用于电能质量扰动信号的快速、准确检测。

本文方法的不足在于当电能质量信号中所包含扰动分量频率十分接近时,检测效果会受到限制,同时,扰动分解结果中存在的端点效应也有待解决,后续工作中将着重对上述问题进行研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汪颖,罗代军,肖先勇,等. IEEE ICHQP2018与电能质量发展方向[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):197-203.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. IEEE ICHQP-2018 and development directions of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 197-203.
- [2] 徐永海,赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术,2011,35(8):174-180.
XU Yonghai, ZHAO Yan. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 174-180.
- [3] 张宸宇,邓凯,史明明,等. 基于小波变换的直流主动配电网电压波动源辨识[J]. 电力工程技术,2017,36(4):21-24,30.
ZHANG Chenyu, DENG Kai, SHI Mingming, et al. Identification of voltage pollution source based on wavelet transform in DC active distributed network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 21-24, 30.
- [4] 陈华丰,张葛祥. 基于决策树和支持向量机的电能质量扰动识别[J]. 电网技术,2013,37(5):1272-1278.
CHEN Huafeng, ZHANG Gexiang. Power quality disturbance identification using decision tree and support vector machine[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1272-1278.
- [5] 李天云,赵妍,李楠,等. 基于HHT的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):52-56.
LI Tianyun, ZHAO Yan, LI Nan, et al. A new method for power quality detection based on HHT[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 52-56.
- [6] 宋海军,黄传金,刘宏超,等. 基于改进LMD的电能质量扰动检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1700-1708.

- SONG Haijun, HUANG Chuanjin, LIU Hongchao, et al. A new power quality disturbance detection method based on the improved LMD[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1700-1708.
- [7] 黄传金, 周铜. 基于变分模态分解的电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 116-123.
- HUANG Chuanjin, ZHOU Tong. A new detection method of power quality disturbance based on VMD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 116-123.
- [8] 杨晓梅, 郭朝云, 樊博, 等. 采用奇异值梯度信息的暂态电能质量扰动自适应检测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 138-145.
- YANG Xiaomei, GUO Chaoyun, FAN Bo, et al. Adaptive detection method of transient power quality disturbance based on singular value gradient information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 138-145.
- [9] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [10] 王秋生, 陈璐, 袁海文, 等. 基于经验小波变换的电晕电流降噪方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 670-676.
- WANG Qiusheng, CHEN Lu, YUAN Haiwen, et al. Corona current de-noising method based on empirical wavelet transform[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 670-676.
- [11] THIRUMALA K, UMARIKAR A C, JAIN T. Estimation of single-phase and three-phase power-quality indices using empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 445-454.
- [12] LIU N H, LI Z, SUN F Y, et al. The improved empirical wavelet transform and applications to seismic reflection data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(12): 1939-1943.
- [13] LUO Z J, LIU T, YAN S Z, et al. Revised empirical wavelet transform based on auto-regressive power spectrum and its application to the mode decomposition of deployable structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 431: 70-87.
- [14] 易吉良, 彭建春, 谭会生. 采用不完全S变换的电能质量扰动检测方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2562-2567.
- YI Jiliang, PENG Jianchun, TAN Huisheng. Detection method of power quality disturbances using incomplete S-transform[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2562-2567.
- [15] 吴禹, 唐求, 滕召胜, 等. 基于改进S变换的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2682-2689.
- WU Yu, TANG Qiu, TENG Zhaosheng, et al. Feature extraction method of power quality disturbance signals based on modified S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2682-2689.
- [16] HUANG N E, WU Z H, LONG S R, et al. On instantaneous frequency[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(2): 177-229.
- [17] 李天云, 程思勇, 杨梅. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 109-113.
- LI Tianyun, CHENG Siyong, YANG Mei. Power system harmonic analysis based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 109-113.
- [18] 易吉良, 周曼, 李中启, 等. 采用不完全S变换的复杂谐波参数估计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊1): 112-120.
- YI Jiliang, ZHOU Man, LI Zhongqi, et al. Complex harmonic parameters estimation using incomplete S transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(Supplement 1): 112-120.

作者简介:



吴建章

吴建章(1996—),男,江苏盐城人,博士研究生,主要研究方向为电能质量数据分析(E-mail: wujianzhang@seu.edu.cn);

梅飞(1982—),男,安徽滁州人,讲师,博士,主要研究方向为新能源发电技术、电气设备在线监测与故障诊断(E-mail: meifei@hhu.edu.cn);

郑建勇(1966—),男,江苏南京人,教授,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: jy_zheng@seu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Novel detection method of power quality disturbance based on IEWT

WU Jianzhang¹, MEI Fei², PAN Yi¹, ZHOU Cheng¹, SHI Tian¹, ZHENG Jianyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Aiming at the problem that the frequency band division result of EWT(Empirical Wavelet Transform) is susceptible to spectrum leakage and noise pollution when it is applied to power quality signal analysis, a novel method of power quality disturbance detection based on IEWT(Improved Empirical Wavelet Transform) is proposed. Firstly, the characteristic frequency points of the disturbance signal are determined by Fourier spectral envelope dynamic measurement algorithm, and the original frequency band boundaries are extended. Then the disturbance signal is decomposed into the sum of several AM-FM(Amplitude Modulation-Frequency Modulation) components by using IEWT. Finally, the normalized Hilbert transform is applied to the decomposition results to obtain the amplitude, frequency and start-stop time of disturbance. The validity of the proposed method is verified by numerical simulation and measured data of substation, and the results of the proposed method are compared with those of other methods. The experimental results show that the proposed method is more universal and easy to operate with good modal decomposition ability and anti-noise performance, and it is suitable for engineering practice.

Key words: power quality; disturbance detection; improved empirical wavelet transform; dynamic measurement; normalized Hilbert transform

附录

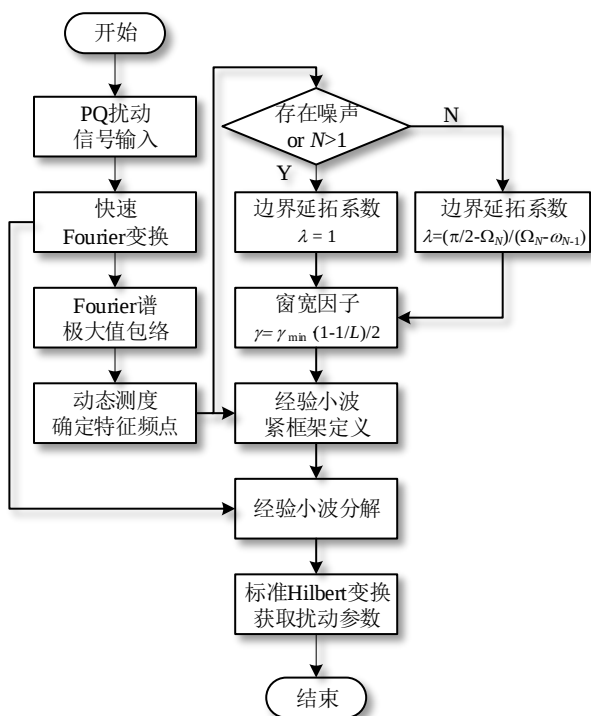
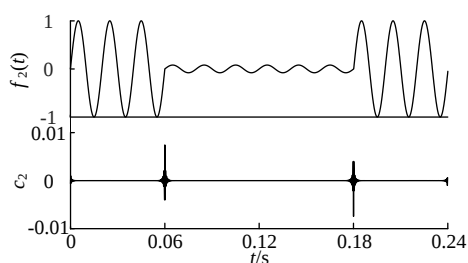
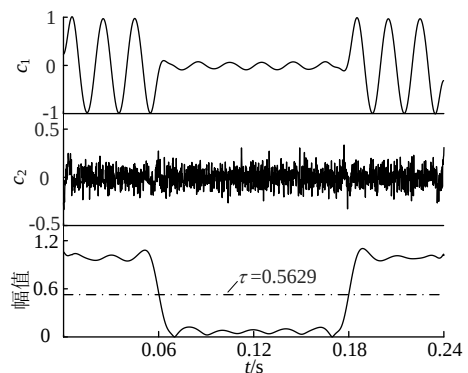


图 A1 基于 IEWT-NHT 的扰动检测流程

Fig.A1 Disturbance detection flow based on IEWT-NHT



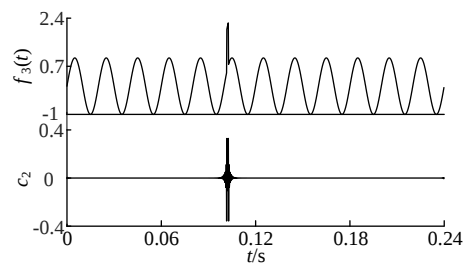
(a) 无噪扰动分析



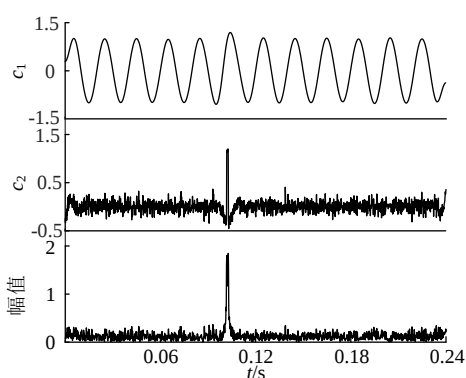
(b) 含噪扰动分析 (SNR=20dB)

图 A2 电压中断分析结果

Fig.A2 Analysis results of voltage interruption



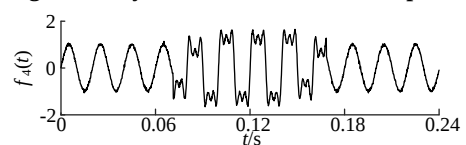
(a) 无噪扰动分析



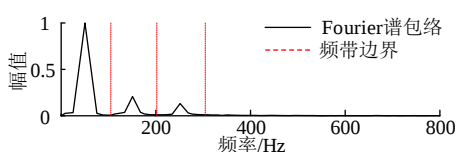
(b) 含噪扰动分析 (SNR=20dB)

图 A3 暂态脉冲分析结果

Fig.A3 Analysis results of transient impulse



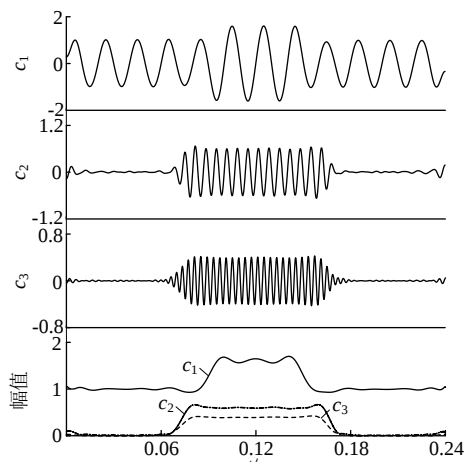
(a) 复合扰动 1 波形



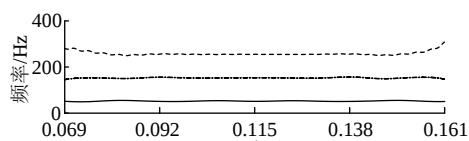
(b) IEWT 频谱划分结果

图 A4 复合扰动 1 及其频谱划分结果

Fig.A4 Composite disturbance 1 and its spectrum division results



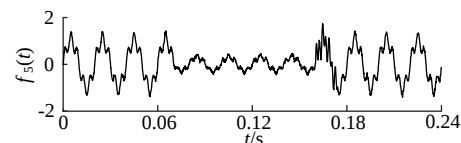
(a) 扰动分解结果及其瞬时幅值曲线



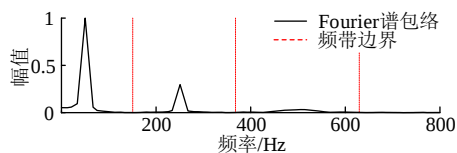
(b) 扰动分量瞬时频率曲线

图 A5 复合扰动 1 分析结果

Fig.A5 Analysis results of composite disturbance 1



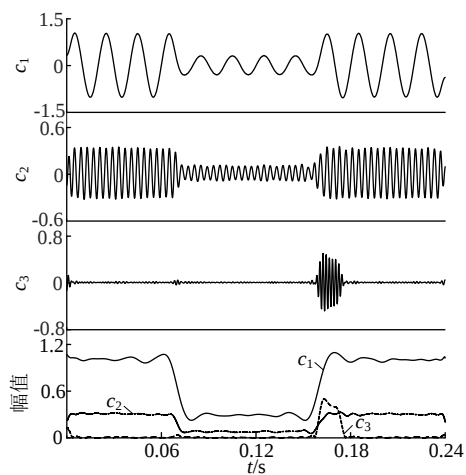
(a) 复合扰动 2 波形



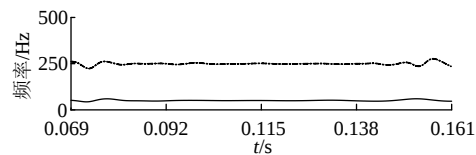
(b) IEWT 频谱划分结果

图 A6 复合扰动 2 及其频谱划分结果

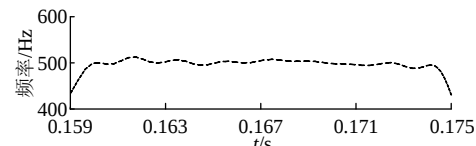
Fig.A6 Composite disturbance 2 and its spectrum division results



(a) 扰动分解结果及其瞬时幅值曲线



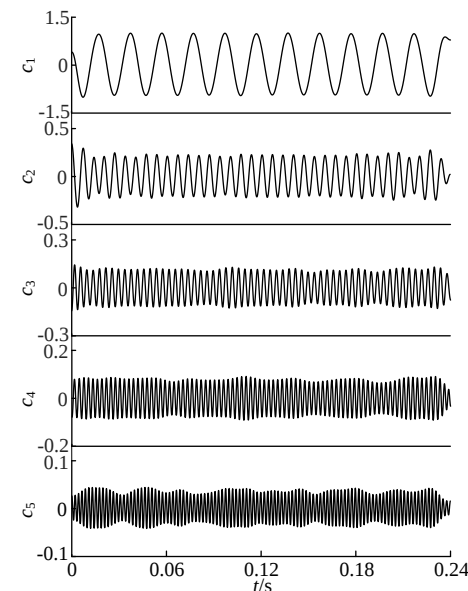
(b) 基波及谐波分量瞬时频率曲线



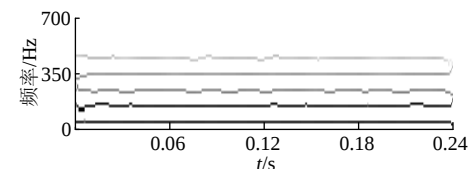
(c) 振荡分量瞬时频率曲线

图 A7 复合扰动 2 分析结果

Fig.A7 Analysis results of composite disturbance 2



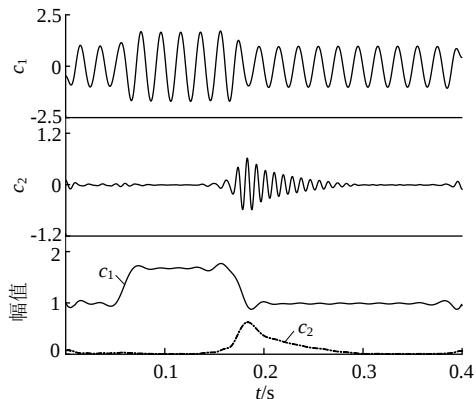
(a) 扰动分解结果



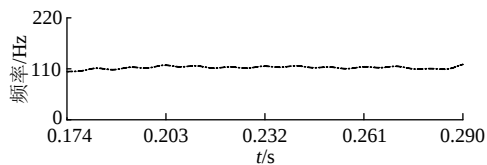
(b) 扰动分解结果时频谱图

图 A8 实测谐波扰动分析结果

Fig.A8 Analysis results of measured harmonics



(a) 扰动分解结果及其瞬时幅值曲线



(b) 振荡分量瞬时频率曲线

图 A9 实测暂升扰动分析结果

Fig. A9 Analysis results of measured voltage swell

表 A1 复合扰动 1 检测结果

Table A1 Detection results of composite disturbance 1

扰动类型	起始时刻/s	终止时刻/s	幅值	频率/Hz
电压暂升	0.0904	0.1498	0.6014	50.21
3 次谐波	0.0721	0.1673	0.5983	150.63
5 次谐波	0.0725	0.1669	0.4009	250.48

注：幅值为标幺值，后同。

表 A2 复合扰动 2 检测结果

TableA2 Detection results of composite disturbance 2

扰动类型	起始时刻/s	终止时刻/s	幅值	频率/Hz
电压暂降	0.0703	0.1603	0.6983	49.79
谐波 1	0.0705	0.1592	0.0884	249.50
谐波 2			0.3031	249.75
暂态振荡	0.1597	0.1735	0.4815	500.71

注：谐波 1、2 分别表示幅值凹陷起止时刻以内、以外的检测结果。