

DOI: 10.7667/PSPC160208

## CEEMD 在电能质量扰动检测中的应用

吴新忠, 邢强, 渠虎, 王前进, 杨春雨

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 为了解决总体平均经验模态分解(EEMD)处理非平稳、非线性信号的不足, 提出了一种基于完全经验模态分解(CEEMD)的电能质量扰动检测新方法。首先采用 CEEMD 对含噪的电能质量扰动信号进行分解得到固有模态函数, 并对固有模态函数进行 Hilbert 变换检测出瞬时幅值和瞬时相位特征参数。对所得瞬时幅值求取二阶导数得到模极大值点, 提高了通过模极大值点定位扰动时刻的准确性。针对高频复合扰动采取两次 CEEMD 分解方法去除噪声与虚假分量有效提取出扰动成分, 针对稳态扰动提出先去除谐波再提取闪变包络的检测方法。并通过 Matlab 仿真实验以及依托交流调压器负载实验和三电平实验平台的实测数据, 验证了该方法既可以对未知扰动信号进行辨识区分, 也可以确定电能质量扰动的时刻、类型、频率和幅值等特征参数。

**关键词:** 电能质量; 完全经验模态分解; 希尔伯特-黄变换; 扰动分类; 特征提取

### Application of CEEMD in power quality disturbance detection

WU Xinzong, XING Qiang, QU Hu, WANG Qianjin, YANG Chunyu

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** To solve the problem that Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) is not insufficient in processing the non-linear and non-stationary signal. On this basis, this paper presents a new method of power quality disturbance detection based on Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition (CEEMD). Firstly, the power quality disturbance signal with noise is decomposed into Intrinsic Mode Function (IMF) by CEEMD, whose instantaneous amplitude and phase characteristic are detected by Hilbert Transform. Furthermore, the obtained instantaneous amplitude is derived to get its modulus maximum points by second-order derivative, which improves the accuracy of positioning disturbance time. Given the high frequency compound disturbance, the CEEMD decomposition method is adopted twice to remove noise and false components. According to steady state disturbance, the detection method is to remove harmonic components firstly and then to extract the flicker envelope. At last, through Matlab simulation experiments and the data measured on AC voltage regulator load experiment and three-level experimental platform verify that this method is able to identify the unknown disturbance signal, and as well as determine the power quality disturbance time, type, frequency, amplitude and other characteristic parameters.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374043), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education (No. 2013QNA50), and Natural Science Foundation of Jiangsu province (No. BK20130205).

**Key words:** power quality; CEEMD; Hilbert-Huang transform; disturbance-classification; feature extraction

## 0 引言

近年来, 国民经济的大力发展推进了电网建设的步伐, 然而电网中投入了大量的电力电子设备, 产生的冲击负荷与非线性负载严重影响了电力系统

的供电质量。为了保证电网稳定可靠地运行, 有效地改善电能质量, 对扰动信号进行有效的检测与分析是电能质量分析、评估<sup>[1]</sup>的前提和基础。

在实际电网中由扰动因素导致的电能质量问题可分为暂态扰动和稳态扰动两类。稳态扰动以波形畸变为特征, 主要包括谐波、间谐波和电压闪变等; 暂态扰动以频谱和持续时间为特征, 又细分为第一类暂态扰动和第二类暂态扰动, 第一类暂态扰动主

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61374043); 教育部中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QNA50); 江苏省自然科学基金项目(BK20130205)

要是由幅值突变引起, 包括电压骤升、电压骤降、电压短时中断等; 第二类暂态扰动主要是高频扰动, 包括暂态振荡和电压尖峰等。针对电能质量扰动信号的非平稳非线性的特性, 现有的处理方法有基于傅里叶变换法(FFT)<sup>[2]</sup>、小波分析法<sup>[3]</sup>、S 变换检测法<sup>[4]</sup>、基于形态学方法<sup>[5]</sup>等。

而希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)方法处理非线性非平稳信号具有自适应性和精确识别能力, 但 EMD 分解过程中存在一定的模态混叠和端点效应<sup>[6]</sup>。文献[7]使用总体平均经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)算法, 通过加入辅助噪声再对信号进行 EMD 分解, 虽然缓解了 EMD 分解过程中的模态混叠效应, 但该方法存在重构误差较大的缺点。

针对上述问题, 本文提出采用完全经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD)<sup>[8]</sup>的 HHT 电能质量扰动检测新方法。对原始信号加入正、负成对形式的辅助噪声再进行 EMD 分解, 得到更为彻底的分解结果, 有效抑制模态混叠现象并可以完美地重构原始信号。本文采用该方法实现了对暂态扰动信号进行分解重构, 利用瞬时幅值的特性实现扰动时刻精确定位以及扰动类型的准确识别; 对稳态扰动的频率、幅值准确检测以及闪变包络的有效提取; 对未知的复合扰动信号进行辨识与分析, 区分出稳态、暂态和复合扰动的电能质量扰动问题。

## 1 基本原理

### 1.1 CEEMD原理

CEEMD是针对EEMD添加的白噪声残留较大提出的, 定义运算符 $E_j(\cdot)$ 为EMD分解的第 $j$ 个固有模态函数, 其主要步骤如下所述。

1) 首先, 对原始信号 $x(t)$ 加入正、负成对高斯白噪声 $w^j(t)$ , 对目标信号进行 $n$ 次EMD分解, 获得第一个固有模态函数 $c_1$ 。

$$c_1(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i(x(t) + (-1)^q \varepsilon_0 w^i(t)) \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_k$  是每个阶段设定的信噪比系数;  $q=1,2$ ,  $i=1,2,\dots,n$ 。

2) 再计算得到一阶残差 $r_1(t)$ 。

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (2)$$

3) 对 $r_1(t) + (-1)^q \varepsilon_1 E_1(w^j(t))$ 继续分解得到第一个固有模态函数分量作为CEEMD的 $c_2$ 。

$$c_2(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i(r_1(t) + (-1)^q \varepsilon_1 E_1(w^j(t))) \quad (3)$$

4) 以此类推计算第 $k$ 个剩余残量 $r_k$ ,  $k=2,\dots,K$ ,  $K$ 为IMF分量的个数。

$$r_k(t) = r_{(k-1)}(t) - c_k(t) \quad (4)$$

5) 再继续分解 $r_k(t) + (-1)^q \varepsilon_k E_j(w^j(t))$ 得到第 $K+1$ 个固有模态函数 $c_{(k+1)}$ 。

$$c_{(K+1)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i(r_k(t) + (-1)^q \varepsilon_k E_j(w^j(t))) \quad (5)$$

6) 重复步骤4)和5), 直到剩余分量满足迭代结束条件, 即剩余分量的极值点个数最多不超过两个, 获得最终剩余残差 $R(t)$ , 完成整个分解过程。

$$\text{因此} \quad x(t) = \sum_{k=1}^K c_k + R(t) \quad (6)$$

由于对目标信号添加符号相反的白噪声再进行集总平均分解, 不仅有效抑制了模态混叠效应, 而且减小了解析过程中由白噪声引起的重构误差, 分解过程更具完备性。

### 1.2 能量门限法

在CEEMD分解过程中, 可以将信号分解为噪声分量、真实扰动分量和虚假分量。为了将这3种信号分量检测区分出来, 可以采用能量门限法分辨分量成分。其核心思想为: 每个待分解的信号都是由类型不同分量组成, 而不同类型的信号分量能量等级 $M_i$ 一般不同, 对 $e_i$ 设置门限阈值, 若大于阈值判断为真实扰动分量, 小于阈值则为除噪声分量和虚假分量予以去除。

$$\text{设} \quad M_i = \sum_{k=1}^n c_k(t)^2 \quad (7)$$

$$\text{进行归一化可知: } e_i = \frac{M_i}{\max(M)} \quad (8)$$

### 1.3 Hilbert 变换原理

对任意随机实信号 $X(t)$ , 其Hilbert变换为

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

$X(t)$ 与 $Y(t)$ 为一组共轭复数对, 相应解析信号 $Z(t)$ 为

$$Z(t) = X(t) + jY(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (10)$$

式中:  $a(t)$ 为瞬时振幅;  $\theta(t)$ 为相位。表达式分别为

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2} \\ \theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \end{cases} \quad (11)$$

最后, 进一步代入式(12)计算瞬时频率。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (12)$$

## 2 基于 CEEMD 的电能质量扰动检测方法

由于 EMD 与 Hilbert 相结合的传统 HHT 分析方法<sup>[7]</sup>中, EMD 直接分解模态混叠现象较为严重且无法获得精确的重构信号。因此, 本文采用 CEEMD 与 Hilbert 相结合的新方法对电能质量扰动进行分析, 其方法基本步骤为

- 1) 首先将含噪的扰动信号进行 CEEMD 分解, 分解出  $K$  个固有模态函数  $C_k(t)$ ;
- 2) 根据式(7)和式(8)求得  $K$  个固有模态函数的能量  $M_i$  和  $e_i$ , 通过能量门限筛选真实扰动分量;
- 3) 然后对式(2)中所求各真实扰动分量进行信号重构并将重构信号进行 Hilbert 变换, 根据式(11)和式(12)求取瞬时幅值  $a(t)$  与瞬时频率  $f(t)$ ;
- 4) 最后, 直接对  $a(t)$  求取二阶导数, 通过二阶导数的模极大值点确定扰动时刻并结合幅值  $a(t)$  辨识出扰动类型。

针对暂态、稳态以及未知混合扰动, 各扰动类型和特点有所不同, 上述检测步骤顺序可做相应调整, 各扰动类型特征参数提取的具体方法和步骤见下文分析。

## 3 电能质量扰动仿真分析

### 3.1 第一类暂态电能质量扰动分析

为了进行仿真实验, 本文选取第一类暂态电能质量扰动信号(电压骤升、电压骤降、电压短时中断)的复合扰动进行检测分析<sup>[9]</sup>。采用 Matlab 在信噪比为 20 dB 的随机噪声环境下生成扰动信号, 扰动信号波形如图 1 所示。其中采样频率为 12 800 Hz, 采样长度为 0.25 s, 共采集 3200 个数据点。各种扰动参数设置如下: 电压骤降时, 骤降幅度为  $\alpha = 0.30$ , 扰动理论起止时刻为 0.06~0.10 s; 电压中断时, 扰动理论起止时刻为 0.10~0.14 s; 电压骤升时, 骤升幅度为  $\alpha = 0.32$ , 扰动理论起止时刻为 0.14~0.18 s。

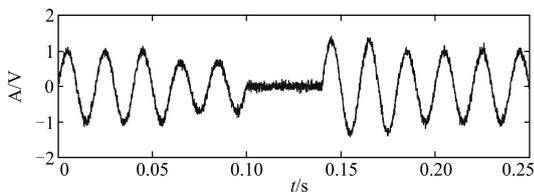
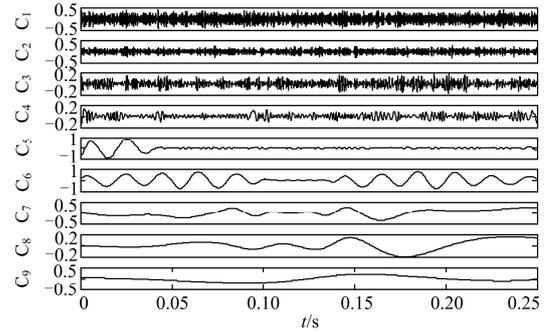


图 1 第一类暂态扰动信号

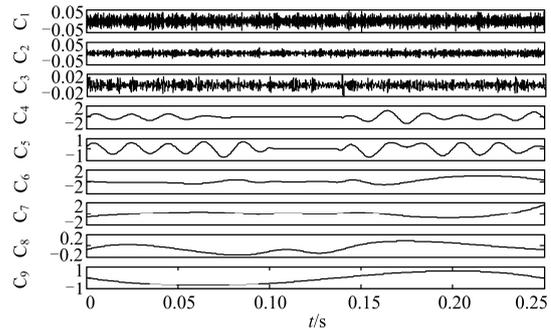
Fig. 1 First kind of transient disturbance signal

对暂态扰动信号分别进行 EEMD 和 CEEMD 分

解, 两种方法均添加幅值为 0.2 的高斯白噪声, 集总平均次数为 150 次, 各分解结果如图 2(a)、2(b)所示。



(a) EEMD 分解结果



(b) CEEMD 分解结果

图 2 信号分解结果

Fig. 2 Signal decomposition results

对比图 2(a)、2(b)可以看出, EEMD 和 CEEMD 分解均得到 9 条固有模态函数, 在噪声影响的情况下, 虽然 EEMD 在一定程度上改善了模态混叠现象, 但是 C4 和 C5 中模态混叠现象依然存在。而 CEEMD 分解更为理想, 分解波形更接近原始信号, 消除了模态混叠现象。因此选取 CEEMD 对信号进行分解有效地解决了模态混叠现象。

为了去除噪声分量和虚假分量, 本文设置能量门限阈值  $e_i = 0.1$ , 根据式(7)和式(8)计算 CEEMD 分解出的各  $C_i$  的  $M_i$  和  $e_i$ , 若大于 0.1 则判断为扰动分量, 小于 0.1 则为虚假分量和噪声分量。由表 1 可知,  $C_4 \sim C_7$  为扰动分量, 其余为噪声分量和虚假分量, 予以舍弃。

表 1 固有模态函数能量值

Table 1 Energy values of intrinsic mode functions

IMF	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$e$	0.068	0.045	0.063	0.346	0.432
IMF	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	
$e$	0.232	0.645	0.054	0.034	

为了恢复出原始扰动信号, 分别对 EEMD 与

CEEMD 各自分解的真实扰动分量叠加进行信号重构, 如图 3 所示, 其中图 3(a)和图 3(b)为 EEMD 重构信号图和 EEMD 重构误差图, 图 3(c)和图 3(d)分别为 CEEMD 的重构信号图与误差图。由图对比可知, CEEMD 重构效果明显优于比 EEMD, 而且 CEEMD 扰动误差数量级为  $10^{-8}$ , 重构误差远远小于 EEMD。

最后, 为了获得表征扰动信号特征, 将 CEEMD 分解重构信号进行 HHT 变换求取第一类暂态扰动的瞬时幅值  $a(t)$ , 结果如图 4 所示。

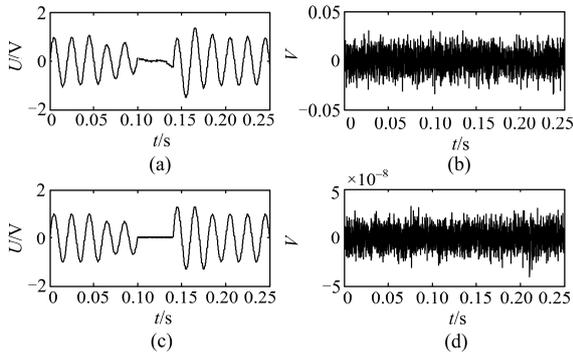


图 3 重构效果对比

Fig. 3 Reconstruction effect comparison

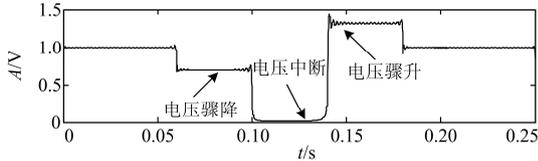


图 4 第一类暂态扰动检测结果

Fig. 4 Detection results of first kind of transient disturbance

观察图 4 检测结果可以看出, 第一类暂态扰动发生时, 暂态扰动的问题只是其幅值上发生跳变<sup>[10]</sup>, 从图中可以明显辨识出各频段电压骤降、电压中断和电压骤升时频特征信息。

根据暂态扰动信号波形特征, 对图 4 中幅值检测信号分别求取一阶导数和二阶导数, 结果如图 5(a)和 5(b)所示。

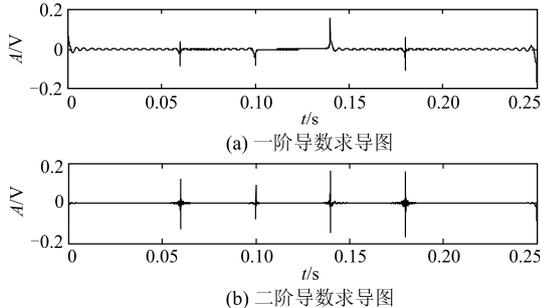


图 5 求导结果效果对比

Fig. 5 Derivation effect comparison

分析图 3~图 5, 对瞬时幅值求导后幅值相对减弱得到更为平缓的波形。但一阶导数模极大值点定位起止时刻的效果略逊于采用二阶导数求导的方法。因此通过对第一类暂态扰动信号采取 Hilbert 变换求取瞬时幅值并结合二阶求导的方法可以准确地定位起止时间和判断扰动的具体类型。

表 2 给出了扰动类型和扰动起止时间检测结果图, 从表中检测结果可以看出, 本文提出的方法能精确地检测出扰动起止时刻, 检测误差低于 1.1%。且各扰动类型能准确分辨出。

### 3.2 第二类暂态电能质量扰动分析

第二类暂态扰动信号包括暂态振荡和电压尖峰, 采用 3.1 节同样的分析方法, 加入信噪比为 20 dB 的随机噪声, 扰动信号如图 6 所示。采样参数保持不变, 其中各扰动参数设置如下: 暂态振荡, 衰减系数  $c=0.05$ 、相对系数  $\beta=40$ 、振荡幅度  $\alpha=0.80$ , 扰动起止时刻为 0.08~0.16 s; 电压尖峰, 骤降幅度  $\alpha=0.40$ , 扰动时刻为 0.04 s。

表 2 第一类暂态扰动检测结果

Table 2 Result of first kind of transient disturbance

扰动频段	扰动起始时刻/s			扰动终止时刻/s			扰动类型
	实际	检测	误差	实际	检测	误差	
1	0.06	0.0601	0.17%	0.1	0.1000	0	电压骤降
2	0.1	0.1011	1.1%	0.14	0.1384	0.92%	电压骤升
3	0.14	0.1400	0	0.18	0.1789	0.78%	电压中断

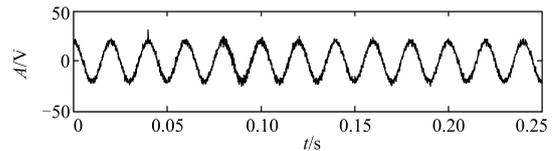


图 6 第二类暂态扰动信号

Fig. 6 Second kind of transient disturbance signal

将图 6 中的信号经 CEEMD 分解后, 通过能量门限法筛选出真实的扰动分量并叠加得到重构信号如图 7 所示。

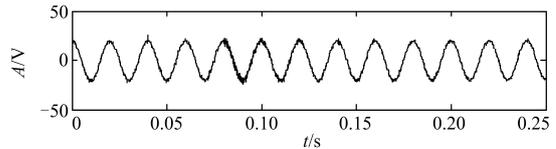


图 7 CEEMD 分解重构信号

Fig. 7 Reconstruction signal of CEEMD

分析图 7 的重构结果可知, 暂态振荡和电压尖峰复合的第二类暂态扰动信号没有很好地分解重构

出来,原始信号混叠了噪声分量。主要由于 CEEMD 去噪再重构的方法是将信号中的高低频分量按由高到低的次序分解出来, 去掉高频分量而保留低频部分达到去噪的目的。而振荡和尖峰扰动本身就属于高频扰动, 这就导致了在分解得到的高频分量中既包含扰动特征也包含了高频噪声。

为了能保证在高频去噪的同时在低频分量中完整地保留扰动特征, 提出了在 CEEMD 对原始信号分解的基础上, 再对所有的 IMF 再进行 CEEMD 分解一次, 采用两次 CEEMD 分解可以将扰动分量和噪声分量分离。并采用小波阈值去噪重构算法和基于  $3\delta$  准则的 EMD 阈值去噪重构算法与本文方法对比<sup>[11]</sup>。对于小波算法, 选用的母小波是 db2 和 db8, 分解层数为 6 层。图 8(a)、8(b)、8(c)分别是 db2 小波、db8 小波和基于 EMD 的阈值的去噪重构算法, 图 8(d)是本文方法。

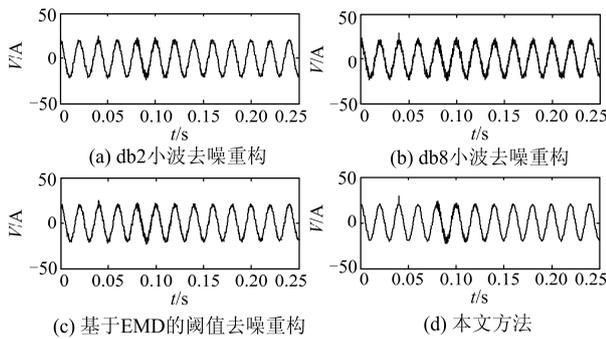


图 8 扰动信号去噪重构对比

Fig. 8 Disturbance signal denoising reconstruction

对比图 8 可知, 本文所提方法得到的波形明显优于小波方法和阈值去噪方法, 波形更加完美保留更多重构信息量。

最后, 将图 8(d)的 CEEMD-CEEMD 重构信号分别求取二阶导数和进行 Hilbert 变换, 得到模极大值点和瞬时幅值。通过模极大值点定位信号扰动突变点如图 9(a)所示; 通过瞬时振幅变化特征判断扰动类型如图 9(b)所示。

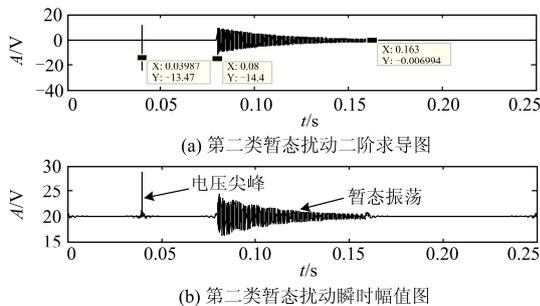


图 9 第二类暂态扰动特征检测

Fig. 9 Second kind of transient disturbance feature

扰动突变检测时间和类型如表 3 所示, 分析表 3 可知, 对重构信号直接采取二阶导数定位扰动点, 能够精确定位电压尖峰扰动, 暂态振荡的起始时刻有着较大的峰值, 容易被定位, 但由于暂态振荡的高频扰动特征, 其幅值呈指数递减, 对结束时刻的定位有所偏差。暂态振荡终止时刻检测误差达到 1.87%, 但影响不大仍能对扰动信号进行定位, 检测精度能够满足实际检测要求。

表 3 第二类暂态扰动检测结果

Table 3 Result of second kind of transient disturbance

扰动频段	扰动起始时刻/s			扰动终止时刻/s			扰动类型
	实际	检测	误差	实际	检测	误差	
频段 1	0.04	0.0399	0.25%	-	-	-	电压尖峰
频段 2	0.08	0.0800	0	0.16	0.1630	1.87%	暂态振荡

### 3.3 稳态电能质量扰动分析

在实际电网中, 稳态扰动主要包括谐波、间谐波和电压闪变, 同样采用 3.1 节的分析方法, 构造稳态扰动信号模型如式(13)。

$$y(t) = 15[1 + 20 \sin(20\pi t)] \sin(100\pi t) + u(t) \quad (13)$$

其中,  $u(t)$  为谐波与间谐波信号

$$u(t) = \sum_{i=1}^N A_i \times \sin(2\pi f_i + \theta_i) \quad (14)$$

式(14)中:  $N = 3$ ,  $f_1 = 125$ ,  $f_2 = 150$ ,  $f_3 = 250$ ;  $A_1 = 4.5$ ,  $A_2 = 10$ ,  $A_3 = 5.4$ ;  $\theta_1 = \pi/4$ ,  $\theta_2 = \pi/3$ 。

将式(13)进行三角分解, 可得稳态扰动模型包含 40, 50, 60 频率分量, 并且含有 3 次、5 次谐波和 2.5 次间谐波。采样参数保持, 在信噪比为 20 dB 的随机噪声环境下生成原始扰动信号如图 10 所示。

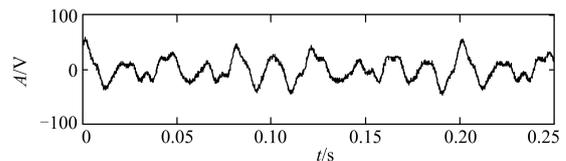


图 10 稳态扰动信号

Fig. 10 Steady state disturbance signal

对图 10 中的信号经 CEEMD 分解后, 通过能量门限法筛选出真实的扰动分量, 并通过 Hilbert 变换代入式(11)、式(12)求出各扰动分量的瞬时幅值和瞬时频率检测结果如表 4 所示。

表 4 为各分量特征参数的检测结果。对信号幅值、频率检测平均误差分别为 0.99%、1.12%, 对幅值检测精度略高于频率检测, 对谐波的检测效果要优于间谐波。

表 4 稳态扰动特征参数检测结果

Table 4 Result of steady state disturbance detection

分量	幅值/V			频率/Hz		
	理论值	检测值	误差	理论值	检测值	误差
$C_1$	1.5	1.487	0.87%	40	40.479	1.20%
$C_2$	15	14.978	0.15%	50	50.853	1.71%
$C_3$	1.5	1.487	0.87%	60	61.145	1.91%
$C_4$	5.4	5.333	1.24%	125	126.538	1.23%
$C_5$	4.5	4.421	1.78%	150	149.445	0.37%
$C_6$	10	10.101	1.01%	250	250.525	0.21%

为了精确提取出闪变扰动的包络信息, 传统包络提取方法采用调制方法<sup>[12]</sup>, 其具体方法为: 将表 4 中分解后的各频率分量  $C_1 \sim C_6$  直接相加重构得到重构信号  $\hat{x}(n)$ , 再将各频率分量  $C_1 \sim C_6$  通过 Hilbert 变换得到变换信号  $\hat{x}_H(n)$ , 最后, 利用式(13)求得电压闪变包络  $v(n)$ 。提取的闪变包络如图 11 所示。

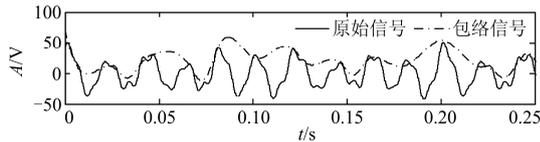


图 11 传统方法闪变信号包络

Fig. 11 Traditional envelope fitting of flicker signal

由图 11 可得, 由于闪变信号中含有谐波与间谐波分量的干扰, 提取的闪变包络出现“过冲”和“欠冲”现象, 包络信号未能与原始扰动信号切合存在较大波动。

因此为了能够对闪变包络有效提取, 提出先去除谐波与间谐波分量的干扰, 再提取闪变包络信号的方法, 即提取包络时, 只考虑闪变信号频率分量(表 4 中  $C_1 \sim C_3$ ), 利用 Hilbert 变换得到包络信号如图 12 所示。

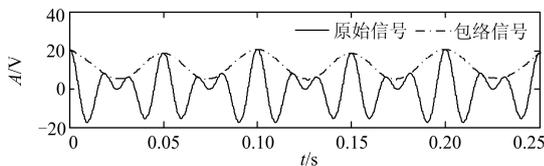


图 12 经改进闪变信号包络

Fig. 12 Improved envelope fitting of flicker signal

图 12 直观表明闪变包络信号与原始信号能够精确切合, 不存在波动成分。结果验证了去除谐波干扰再提取包络特征方法的可行性。

### 3.4 未知扰动分析

上文分析了单一的暂态扰动和稳态扰动问题。对于稳态和暂态的复合扰动问题, 传统的电能质量

分析方法通常先假定某几类特定的复合扰动信号再进行处理分析, 得知信号类型后再进行分析, 属于后验检测, 实际意义不大。而采用 CEEMD 与 Hilbert 变换相结合的方法可以实现对未知扰动问题进行有效的辨识与检测, 其具体步骤如下所述。

1) 首先对未知的扰动信号进行 CEEMD 分解, 再对各频率分量通过 Hilbert 变换求出各扰动分量的瞬时幅值和频率的特征参数;

2) 分析出 50 Hz 基波分量并对其瞬时幅值  $A_0(t)$  求二阶导数得到模极大值点;

3) 通过对模极大值点的判断和瞬时频率分量成分数对扰动问题进行分类研究: 若模极大值点存在且仅有 50 Hz 频率分量则判断为暂态扰动, 若模极大值点不存在且含有多条瞬时频率成分则为稳态扰动, 若模极大值点存在且含有多条瞬时频率成分则为复合扰动。表 5 给出了具体扰动判定依据和类型分类。

表 5 扰动类型判定

Table 5 Disturbance type judgment

未知 扰动	条件判据		扰动 类型
	模极大值点	瞬时频率成分数	
1	存在	仅 50 Hz	暂态扰动
2	无	多条	稳态扰动
3	存在	多条	复合扰动

扰动类型确定后可以采取前文分析方法对扰动特征进行检测提取, 对于复合扰动类型的检测, 本文所提方法同样适用, 由于篇幅问题不再进行深入研究。

## 4 实测数据验证

为了验证本文所提方法的实际检测性能, 在仿真测试的基础上, 分别以交流调压器负载实验和三电平实验平台为依托, 通过实测数据进行验证。

### 4.1 暂态实验验证

设计交流调压器负载投切实验, 交流调压器原副边变比为 10: 1, 负载额定功率为 300 W, 通过瞬间增加和减少负载电阻, 模拟电压骤降和骤升的暂态扰动。利用 Fluke435 电能质量分析仪对负载电阻电压进行检测, 记录扰动类型和扰动时刻, 实测电压波形如图 13 所示。

并将实测数据导入 Matlab 通过本文所提方法检测分析, 表 6 给出了本文方法和电能质量分析仪检测对比结果, 由表对比分析, 验证了本文方法的对暂态扰动检测的精确度。

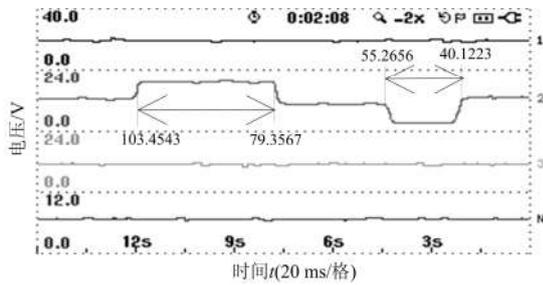


图 13 负载投切实验电压波形

Fig. 13 Load switching test voltage waveform

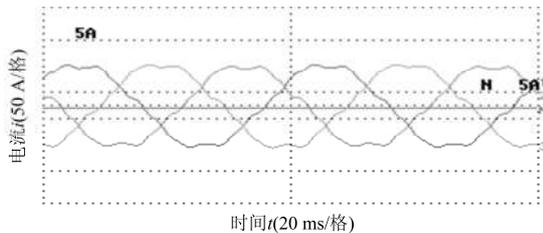
表 6 暂态实验结果对比

Table 6 Comparison of transient experiment results

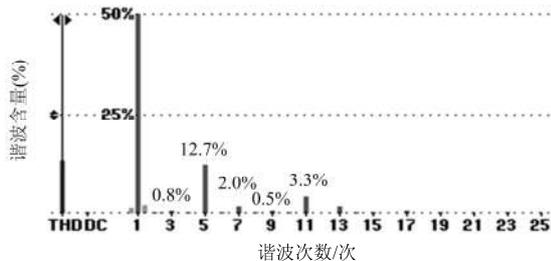
扰动 频段	扰动起始时刻/s		扰动终止时刻/s		扰动 类型
	仪器检测	本文方法	仪器检测	本文方法	
频段 1	40.1223	40.1356	55.2656	55.0344	电压 骤降
频段 2	79.3567	78.9776	103.4543	103.7698	电压 骤升

#### 4.2 稳态实验验证

利用三电平 SAPF 为实验平台<sup>[13]</sup>, SAPF 参数设置: 电网电压频率 50 Hz; 电网线电压 380 V; APF 输出电感 1.5 mH、输出电阻 82.5 mΩ; 直流侧电容为 4.8 mF; 采样频率 10 kHz。谐波源为带负载的三相不可控整流器<sup>[14]</sup>, 整流器负载参数设置: 电容 2 200 μF, 电感 1.5 mH, 负载电阻 8 Ω。电网谐波源特征次数为 3~11 次奇次谐波, 利用 Fluke 对 SAPF 负载侧电流进行测试, 检测谐波电流波形、各项谐波 THD(谐波畸变率)频谱含量如图 14(a)、图 14(b)所示。



(a) 谐波电流波形



(b) L1相谐波电流频谱

图 14 稳态实验检测结果

Fig. 14 Steady state test results

取 L1 相分析, 通过本文方法对实测电流数据进行分析, 检测出谐波成分及计算出每次谐波 THD 含量如表 7 所示, 检测结果和实际仪器检测结果较为接近, 验证本文方法可以有效地检测稳态扰动。

表 7 稳态实验结果对比

Table 7 Comparison of steady state experiment results

谐波成分	3次	5次	7次	9次	11次
仪器检测	0.80%	12.70%	2.00%	0.50%	3.30%
本文检测	0.79%	12.72%	1.98%	0.50%	3.31%

## 5 结论

本文将 CEEMD 算法引入电能质量扰动检测中, 结合 Hilbert 提出了新的检测方法, 实现对暂态扰动时刻和扰动的类型的准确分析, 对稳态扰动的频率、幅值等特征参数的有效提取, 对未知的复合扰动的精确辨识区分。以 Matlab 仿真验证所提方法检测的精确度和有效性。并利用交流调压器负载实验和三电平实验平台的实测数据, 通过和电能质量分析仪检测结果的分析对比, 结果证明本文所提方法对电能质量扰动检测具有通用和可行性, 为电能质量分析与控制提供了一种新的思路和方法。

## 参考文献

- [1] 张逸, 林焱, 吴单岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-143.  
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-143.
- [2] 许珉, 刘玮. 加 8 项余弦窗插值 FFT 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 27-32.  
XU Min, LIU Wei. An interpolation FFT algorithm based on 8-term cosin window[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 27-32.
- [3] 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.
- [4] 王宇, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 离散正交 S 变换在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 93-97.  
WANG Yu, ZHAO Qingsheng, GUO Hehong, et al.

- Application of discrete orthonormal S-transform in detection of power quality disturbances[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 93-97.
- [5] 王丽霞, 何正友, 赵静. 基于数学形态学的电能质量扰动检测和定位[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 63-68.  
WANG Lixia, HE Zhengyou, ZHAO Jing. Detection and location of power quality disturbance based on mathematical morphology[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 63-68.
- [6] 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.
- [7] 张杨, 刘志刚. EEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 86-91.  
ZHANG Yang, LIU Zhigang. Application of EEMD in power quality disturbance detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 86-91.
- [8] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C] // 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011: 4144-4147.
- [9] HAO Z, YAO Z, LI S, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnički Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [10] 黄奂, 吴杰康. 基于经验模态分解的电能质量扰动信号定位方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 41-45.  
HUANG Huan, WU Jiekang. A method to locate power quality disturbing signal based on empirical mode decomposition[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 41-45.
- [11] 张明, 李开成, 胡益胜. 基于小波邻域阈值分类的电能质量信号去噪算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 84-89.  
ZHANG Ming, LI Kaicheng, HU Yisheng. A power quality signal denoising algorithm based on wavelet domain neighboring thresholding classification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 84-89.
- [12] 贾秀芳, 陈清, 赵成勇, 等. 电压闪变检测算法的比较[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2126-2132.  
JIA Xiufang, CHEN Qing, ZHAO Chengyong, et al. Comparison of the flicker detection methods[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2126-2132.
- [13] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [14] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.  
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Simulation Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.

收稿日期: 2016-02-22; 修回日期: 2016-05-08

作者简介:

吴新忠(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电能质量检测与控制; E-mail: zxcumt@126.com

邢强(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量检测与控制; E-mail: 635573004@qq.com

渠虎(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网谐波检测与治理。E-mail: tmac132180@163.com

(编辑 葛艳娜)