

DOI: 10.7667/PSPC171577

基于ESMD和HT相结合的谐波检测新方法

张宇华, 赵晓轲, 申庆祥, 方艺翔

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对现有的电力系统谐波信号检测方法精度不高的问题, 以及研究较多的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)在谐波检测中出现的模态混叠问题, 结合极点对称模态分解(Extreme-point Symmetric Mode Decomposition, ESMD)理论和算法, 提出基于ESMD和希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)相结合的谐波检测新方法。首先对信号进行极点对称模态分解, 得到一系列不同特征尺度的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF), 再对IMF分量进行希尔伯特变换得到各谐波瞬时幅值和瞬时频率信息。该方法能够根据信号自身特征进行自适应分解, 理论上由于扩展了IMF定义并采用内部插值方法, 使得该方法具有简单、精度高的优势。仿真结果表明, 该方法在谐波检测中自适应分解能力强, 检测精度高, 实时性好, 并且能够在不添加噪声的情况下有效避免EMD方法在谐波检测中出现的模态混叠现象。

关键词: 极点对称模态分解; 经验模态分解; 谐波检测; 模态混叠; 固有模态函数

New method in harmonic detection based on ESMD and HT

ZHANG Yuhua, ZHAO Xiaoke, SHEN Qingxiang, FANG Yixiang

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The problem of low accuracy in harmonic signal detection method of power system and mode aliasing in harmonic detection based on Empirical Mode Decomposition (EMD) is studied, a new method of harmonic detection based on Extreme-point Symmetric Mode Decomposition (ESMD) and Hilbert Transform (HT) is proposed according to the theory of ESMD algorithm. Firstly, the mode decomposition of the signal is carried out, and a series of Intrinsic Mode Functions (IMF) with different scale characteristics are obtained. Then, the instantaneous amplitude and instantaneous frequency of IMF are obtained by Hilbert Transformation (HT). This method can be used to decompose signal according to the characteristics of the signal itself. In theory, it has advantages of simple and high precision due to the expansion of IMF definition and internal interpolation method. The simulation results show that the method is adaptive in harmonic detection, better in accuracy and real-time. What's more, it avoids the EMD aliasing in harmonic detection without adding noise.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 15ZR1418000).

Key words: extreme-point symmetric mode decomposition; empirical mode decomposition; harmonic detection; mode aliasing; intrinsic mode function

0 引言

近年来, 随着分布式电源在电网中渗透率的不断增加, 大量分布式电源接入电网造成的电能质量问题日益凸显; 此外, 越来越多的电力电子整流器、变频器等非线性负载的使用, 使谐波污染越来越严重, 电能质量更加恶化^[1-2]。实时、准确的谐波检测

是进一步谐波治理的可靠保证。如何快速有效地检测出电网谐波分量一直是一个重要的研究问题^[3]。

目前, 在谐波检测方法中快速傅里叶算法应用最为广泛, 该方法具有简单、快速的特点, 但仅是频域分析方法, 无法给出谐波出现的具体时刻, 且在检测过程中会出现“旁瓣”和“频谱泄露”等现象, 难以实现非平稳信号分析^[4]。小波变换^[5-7]具有良好的局部化性质, 可同时获得时域和频域信息, 但该方法只适合线性、非平稳信号分析, 且受到

基金项目: 上海市自然科学基金项目资助(15ZR1418000)

Heisenberg 测不准原理束缚, 存在小波基选择困难等问题。EMD^[8-13]是一种非线性、非平稳信号时频分析方法, 不需要基函数选择, 根据信号的特征尺度进行自适应分解, 但当信号中出现间歇情况时, 直接将 EMD 方法用于检测谐波容易出现模态混叠现象。继而, 文献[14-16]提出基于总体平均经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)的谐波检测方法, 该方法在一定程度上抑制了模态混叠, 但 EEMD 方法是在信号处理中添加噪声信号, 并且噪声选择和处理具有不确定性, 检测结果对选择的噪声依赖性较强。文献[17]提出一种基于自适应噪声的完全集合经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)和 Teager 能量算子的谐波检测方法, 有效解决了模态混叠问题, 但还是需要加入噪声, 增加了循环次数和计算量。为解决这一问题, 本文提出基于 ESMD 的谐波检测新方法。ESMD 是 EMD 的改进, 原理相同, 因此, 也同样适用于谐波检测。

ESMD 是王金良教授等人于 2013 年提出的一种新的非线性、非平稳信号时频分析方法^[18]。该方法最先应用于大气、海洋气候变化的数据分析^[19], 并且被应用于小电流系统故障诊断^[20]和轴承故障诊断^[21], 且均取得很好的效果。ESMD 根据信号的特征尺度将复杂信号分解为固有模态函数之和, 与 EMD 方法相比存在以下特点: 1) 极点对称概念比包络对称概念更广泛; 2) 扩展了模态函数的定义, 其物理意义更具有普遍性; 3) 最后余项可以有多个极值点, 可以通过优化手段获取最佳筛分次数。基于这些特点, ESMD 方法可以更快速地得到具有一定物理意义的分解结果, 且能够解决模态混叠现象。

本文提出将 ESMD 方法用于谐波检测中。首先对信号进行经验模态分解, 得到一系列 IMF 分量, 再对 IMF 分量进行希尔伯特变换得到各谐波瞬时幅值和瞬时频率信息。仿真结果表明, 该方法在谐波检测中自适应分解能力强, 检测精度高, 实时性好, 并且能够有效避免 EMD 方法在谐波检测中出现的模态混叠现象。

1 ESMD 原理

1.1 经验模态分解

经验模态分解由美国国家宇航局的 Norden E.Huang 于 1998 年提出。EMD 根据信号的局部特征时间尺度, 将信号分解为 IMF 和残余量之和。理论上, 每个 IMF 中只含有一种频率成分, 不同 IMF 分量的频率不同。若电压或电流信号中含有谐波或

间谐波, 对信号进行经验模态分解, 则各信号成分被按频率逐级递减的顺序分离开来。每个 IMF 必须满足以下两个条件^[21]: 1) 整个 IMF 信号中过零点与极值点个数相等或至多相差一个; 2) 由信号上局部极大值点确定的包络线和由局部极小值点确定的包络线的均值为零, 即信号关于时间轴局部对称。

经验模态分解的原理可以简单表述为

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + R \quad (1)$$

式中: R 为残余量; c_j 为信号经过 EMD 分解所产生的 IMF; n 为 IMF 个数; j 表示第 j 个 IMF 分量。各 IMF 是被分解出的由高频到低频的不同频率信号信息。

EMD 是一种自适应时频分析方法, 已被多个领域的学者研究利用, 但是仍存在一些问题没有解决。其中比较严重的问题是容易产生模态混叠, 具体表现在: 1) 一个单独的 IMF 中含有全异尺度; 2) 相同尺度出现在不同的 IMF 中^[14]。

1.2 极点对称模态分解

ESMD 方法本质上也是根据信号的特征尺度自适应地将复杂信号分解为多个 IMF 和残余量之和。没有先验的基函数, 但所分解出的固有模态函数可以被视为基函数。与 EMD 不同之处在于: ESMD 扩展了 IMF 的定义; 采取内部插值; 在对信号的分解步骤方面也做出很大改进。ESMD 方法可对做过必要预处理的数据进行直接分解, 无需去噪、加噪、平滑等处理手段加以辅助。ESMD 方法对 IMF 的定义扩展如下所述^[18]。

(a) 将所有相邻且相等极值点作为一个极值点, 函数的局部极大值点和极小值点要交错排列, 所有极大值都是为正数, 所有极小值都是负数。

(b) 广义上, IMF 分量应该几乎是包络对称或极值点对称的。

正是该方法对 IMF 的定义做出的扩展为在谐波检测中避免模态混叠现象提供了可能性。

对于任意输入信号 $x(t)$, 其分解步骤如下^[16]:

(1) 找出信号 $x(t)$ 的极值点, 并将其标记为 $E_i = (t_i, y_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$);

(2) 将相邻极值点用线段连接起来, 找到线段中点, 并记为 F_i ($i=1, 2, \dots, n-1$); 并补充边界点 F_0, F_n 。

$$F_i = \left(\frac{t_{i+1} + t_i}{2}, \frac{y_{i+1} - y_i}{2} \right) \quad (2)$$

(3) 利用所获取的 $n+1$ 个中点, 构造 p 条内部插值曲线 L_1, L_2, \dots, L_n ($p \geq 1$), 计算均值曲线 L^* , 即

$$L^* = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_p}{p} \quad (3)$$

(4) 对 $x(t) - L^*$ 重复上述步骤(1)一步骤(3), 直到至少满足以下两个条件之一。

(a) $|L^*| \leq \varepsilon$ (ε 是预先设定的容许误差, 通常选取 $\varepsilon = 0.001\sigma_0$, σ_0 为原始信号标准差);

(b) 筛选次数达到了预先设定的最大值 K 。

此时, 分解出第一个模态 M_1 。

那么, 步骤(1)一步骤(4)就相当于不同截止频率的高通滤波器, 通过做均值曲线来筛选固有模态函数, 分解出的 M_1 即信号中含有的最高频率成分。

(5) 对 $x(t) - M_1$ 重复上述步骤(1)一步骤(4), 依次获得 M_2, M_3, \dots, M_n , 直到最后余项 $R(t)$ 极值点数目为预先设定数值。

(6) 让最大筛分次数 K 处于整数区间 $[K_{\min}, K_{\max}]$ 内变换并重复步骤(1)一步骤(5), 得到一系列分解结果, 进而计算方差比率 σ/σ_0 , 并画出它随 K 的变化图, 其中, σ 和 σ_0 分别为 $x(t) - R(t)$ 的相对标准差和原始信号 $x(t)$ 的标准差。

这个过程是为了找到分解结果最好的最大筛分次数。 σ/σ_0 最小时, 则意味着去掉余项的信号和原始信号最相近, 即分解效果最好。

(7) 找出最大筛选次数后, 重复步骤(1)一步骤(5)即得到最终分解结果。

综上, ESMD 是完备的, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n M_i + R(t) \quad (4)$$

含有谐波的信号是各次谐波和基波之和, 符合上式的分解形式。上述分解过程, 可以看做不同尺度的滤波器, 将不同频率尺度的成分分离开来。信号被分解成频率逐渐减小的各谐波、间谐波和基波之和。因此, ESMD 适合谐波检测。

根据曲线插值的条数 P 不同, 将 ESMD 分为 ESMD_I、ESMD_II、ESMD_III 等类型, 因 ESMD_II 在实时性与精确性方面有独特的优势, 本文选择该类型进行分析。本文基于 ESMD 方法提取谐波分量的流程图如图 1 所示。

1.3 Hilbert 变换

对于任一连续的时间信号 $x(t)$, 其 Hilbert 变换为

$$\hat{x}(t) = x(t) * h(t) \quad (5)$$

$$h(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (6)$$

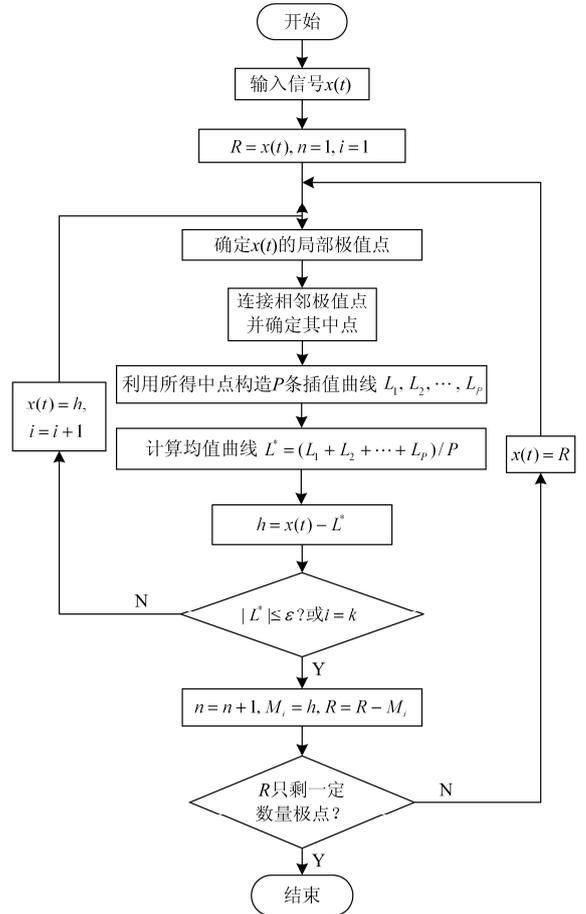


图 1 ESMD 算法流程图

Fig. 1 ESMD algorithm

$$H(w) = -j \operatorname{sgn}(w) = \begin{cases} -j, & w > 0 \\ j, & w < 0 \end{cases} \quad (7)$$

即 HT 是幅值特性为 1, 正频率分量相移 -90° , 负频率分量相移 $+90^\circ$ 的全通滤波器。

$x(t)$ 和 $\hat{x}(t)$ 可以组成复共轭对, 得到信号:

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (8)$$

则

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \\ \theta(t) = \arctan \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)中: $A(t)$ 为瞬时幅值; $\theta(t)$ 为相位。

那么, 瞬时频率为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (10)$$

2 谐波检测步骤

基于 ESMD 的谐波检测步骤:

(1) 不需要去噪、加噪, 直接用 EMD 或 ESMD

对谐波信号进行模态分解, 得到各 IMF 分量;

(2) 通过设定门限阈值, 运用能量门限法的方法进行虚假分量判断, 得到真正的谐波成分;

(3) 用 HT 方法求取各 IMF 分量的瞬时幅值和瞬时频率。

3 算例仿真

3.1 谐波检测

3.1.1 谐波含量较大时的仿真分析

设含有 3 次和 5 次谐波的归一化电压信号为

$$x(t) = \sin(2 \times 50\pi t) + 0.3 \sin(2 \times 150\pi t) + 0.2 \sin(2 \times 250\pi t) \quad (11)$$

分别用 ESMD 和 EMD 对信号进行分解并进行对比分析, 按照 EMD 和 ESMD 理论, 信号被分解为由高频到低频的 IMF 之和, EMD 分解过程中原始信号 $x(t)$ 、5 次谐波成分、3 次谐波成分分别用 IMF1、IMF2、IMF3 标识; ESMD 分解过程中原始信号 $x(t)$ 、5 次谐波成分、3 次谐波成分分别用 M1、M2、M3 标识。仿真结果如图 2 所示。

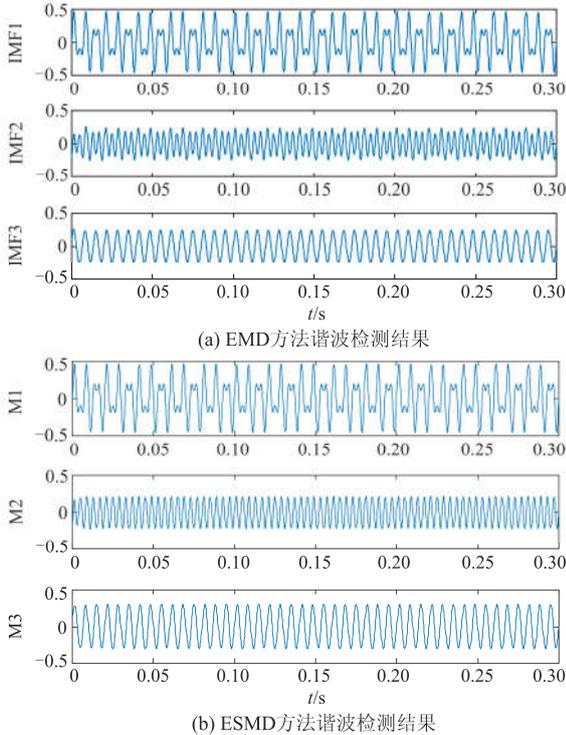


图 2 EMD 和 ESMD 谐波检测结果

Fig. 2 Harmonic detection results by EMD and ESMD

用快速傅里叶变换验证 EMD 方法和 ESMD 方法在谐波检测中是否存在模态混叠, 结果如图 3 所示。图 3(a)是对 EMD 分解出的 IMF2(5 次谐波分量)的频谱分析, 可以看出, IMF2 中出现 250 Hz 和 150 Hz 两种主频成分, 说明 EMD 方法在谐波检测

中出现模态混叠现象; 图 3(b)是对 ESMD 分解出的 M2(5 次谐波分量)的频谱分析, 该模态中仅含有 250 Hz 主频, 其他频率几乎为零, 和理论一致, 不存在模态混叠现象。

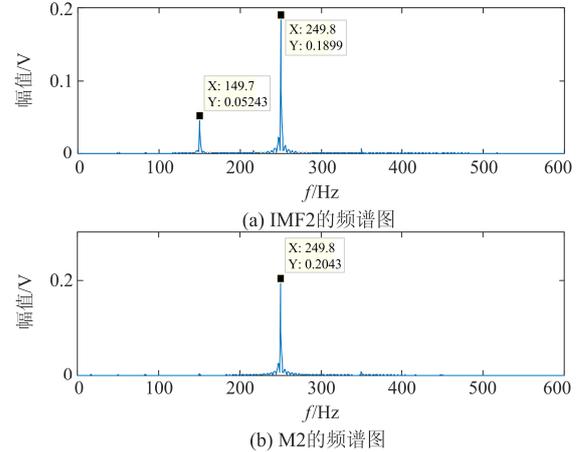


图 3 两种方法下 5 次谐波频谱图

Fig. 3 Fifth harmonics spectrum under two method

为检验 ESMD 的效果, 本文用 Matlab 中相关函数指令计算分解结果与实际值的相关度, 相关度为 1 表示最大的正相关, -1 表示绝对值最大的负相关。相关度越靠近 1, 说明理论值和实际值越相近。结果如表 1 所示。可以看出, ESMD 方法检测出的谐波分量和实际值相关度更大, 表明本文方法在检测谐波时具有较高的精确度。

表 1 EMD 与 ESMD 算法分解结果相关度比较

Table 1 Performance comparison between

EMD and ESMD algorithm

算法	3 次谐波相关度	5 次谐波相关度
EMD	0.997 61	0.955 10
ESMD	0.998 16	0.997 99

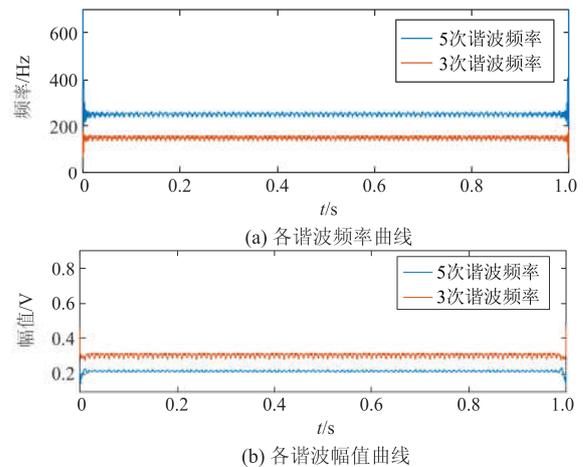


图 4 ESMD 方法分解下谐波参数

Fig. 4 Harmonic detection results by ESMD method

在分解出各谐波分量后,用 HT 得到各谐波瞬时幅值和瞬时频率,结果如图 4 所示。求取平稳区间的数据均值,得到表 2。

表 2 ESMD 和 EMD 算法检测结果

Table 2 Harmonic detection results by ESMD and EMD

算法	3 次谐波		5 次谐波	
	幅值/V	频率/Hz	幅值/V	频率/Hz
实际值	0.300 0	150.0	0.200 0	250.0
ESMD	0.304 0	149.995 6	0.204 3	250.001 1
EMD	0.240 8	149.990 7	无意义	无意义

仿真结果表明:ESMD 方法在谐波含量较大时能够根据信号的自身局部特性进行分解,具有较强的自适应分解能力;EMD 方法分解出的 5 次谐波幅值曲线在实际值的 75.8%和 129.35%之间波动,波动范围较大,此时求平均值无意义,ESMD 方法分解出的 5 次谐波幅值比较平稳,误差为 2.15%;EMD 方法分解出的 3 次谐波幅值误差为 19.73%,而 ESMD 方法分解出的 3 次谐波幅值误差为 1.33%,检测精度大幅度提高;EMD 方法分解出的 5 次谐波中含有 3 次谐波成分,此时求得的瞬时频率是无意义的,ESMD 方法分解出的 5 次谐波中不存在其他频率成分,能够有效避免 EMD 方法在谐波检测中出现的模态混叠现象。

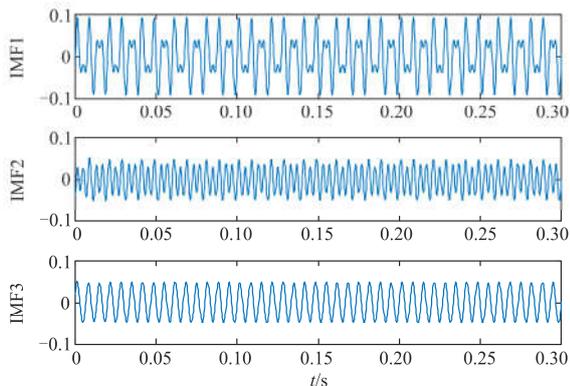
3.1.2 谐波含量较小时的仿真分析

设含有 3 次和 5 次谐波的归一化电压信号为

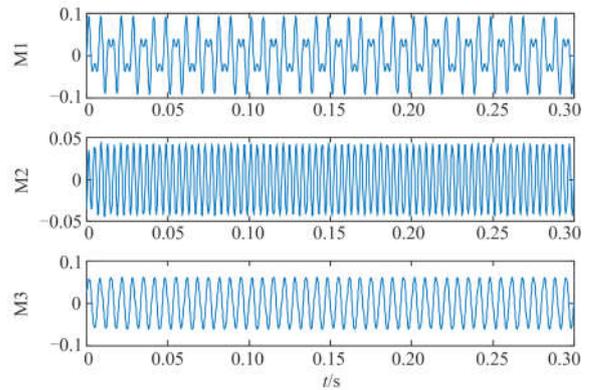
$$x(t) = \sin(2 \times 50\pi t) + 0.06 \sin(2 \times 150\pi t) + 0.04 \sin(2 \times 250\pi t) \quad (12)$$

分别用 EMD 和 ESMD 对信号进行分解,仿真结果如图 5 所示。理论上,IMF2 和 M2 中只含有 5 次谐波成分,IMF3 和 M3 中只含有 3 次谐波成分。

同样用傅里叶变换来分析分解效果。图 6(a)是对 EMD 分解出的 IMF2(5 次谐波分量)的频谱分析,可以看出,IMF2 中出现 250 Hz 和 150 Hz 两种主频成分,说明 EMD 方法在谐波检测中同样会出现模态混叠现象;图 6(b)是对 ESMD 分解出的 IMF3(5 次



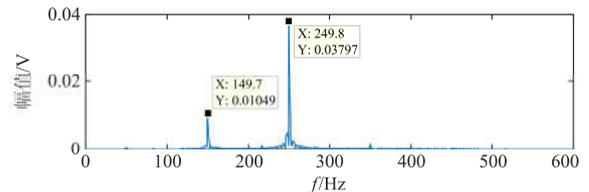
(a) EMD 方法谐波检测结果



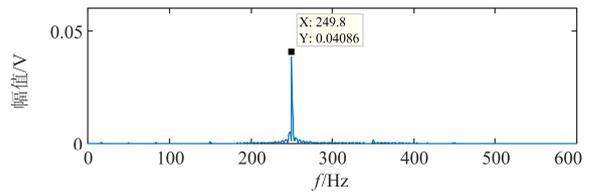
(b) ESMD 方法谐波检测结果

图 5 谐波检测结果

Fig. 5 Harmonic detection results



(a) IMF2 的频谱图



(b) M2 的频谱图

图 6 两种方法下 5 次谐波频谱图

Fig. 6 Fifth harmonics spectrum under two methods

谐波分量)的频谱分析,该模态中仅含有 250 Hz 主频,其他频率几乎为零,不存在模态混叠现象。

表 3 为两种方法下检测值和实际值的相关度,ESMD 方法得到的谐波分量与实际值相关度较大;用 HT 方法获取各谐波幅值和频率,如表 4 所示,EMD 方法分解出的 3 次谐波幅值误差为 19.67%,而 ESMD 方法分解出的 3 次谐波幅值误差为 1.33%,显然检测精度大幅度提高;EMD 方法分解出的 5 次谐波中含有 3 次谐波成分,出现模态混叠问题,而 ESMD 方法分解出的 5 次谐波中不存在其他频率成分,能够有效避免 EMD 方法在谐波检测中出现的模态混叠现象。

表 3 EMD 与 ESMD 算法分解结果相关度比较

Table 3 Performance comparison between EMD and ESMD algorithm

算法	3 次谐波相关度	5 次谐波相关度
EMD	0.997 56	0.955 06
ESMD	0.998 15	0.998 00

表 4 ESMD 和 EMD 算法检测结果

算法	3 次谐波		5 次谐波	
	幅值/V	频率/Hz	幅值/V	频率/Hz
实际值	0.060 0	150.0	0.040 0	250.0
ESMD	0.060 8	149.996 2	0.042 8	250.000 9
EMD	0.048 2	149.930 8	无意义	无意义

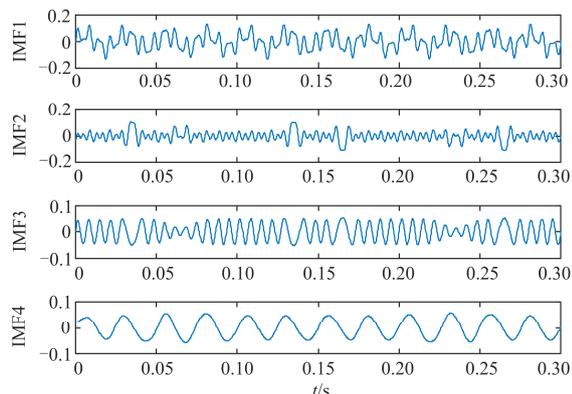
从以上两个仿真可以得出: 谐波含量较大或较小时, ESMD 方法都能够准确地检测出各谐波分量, 不存在模态混叠问题。文献[14]用加噪声解决这一问题, 在分解后会出现信号的失真, 造成物理意义上的分解错误, 并且噪声选择具有不确定性; 而 ESMD 方法无需添加噪声就能够解决这一问题, 所以具有很大的优势。

3.2 含有谐波和间谐波的混合信号检测

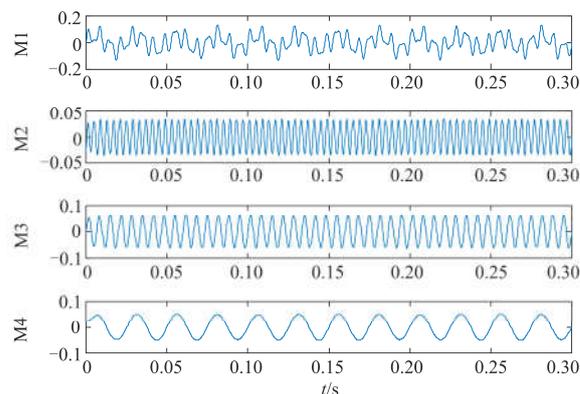
设含有 3 次、5 次谐波和间谐波的归一化电压信号为

$$x(t) = \sin(2 \times 50\pi t) + 0.06 \sin(2 \times 150\pi t) + 0.03 \sin(2 \times 250\pi t) + 0.05 \sin(80\pi t) \quad (13)$$

由于信号基波分量远大于谐波分量, 谐波之间能量相差不大, 电网信号出现间歇情况, 如图 7 中的 IMF1 所示。理论上, 两种方法均能够将上述信号各成分分离开。图 7 是 EMD 和 ESMD 对上述信号的分解结果, IMF2 和 M2 应只含有 5 次谐波, IMF3 和 M3 应只含有 3 次谐波, 但图 7(a) 中的 IMF2 和 IMF3 中出现不同频率成分, 明显出现模态混叠现象; M2 和 M3 则相对均匀, 对 ESMD 分解结果(图 7(b))做快速傅里叶变换, 得到图 8 的频谱分析结果, 可见, M2、M3 和 M4 中只含有单一频率信号, 不存在模态混叠现象, 和理论上相一致。在电力系统中, 信号形式十分复杂, 不可避免地会出现间歇情况, 这就使得 EMD 分解不可避免地存在模态混叠问题。



(a) EMD 方法谐波检测结果



(b) ESMD 方法谐波检测结果

图 7 谐波检测结果

Fig. 7 Harmonic detection results

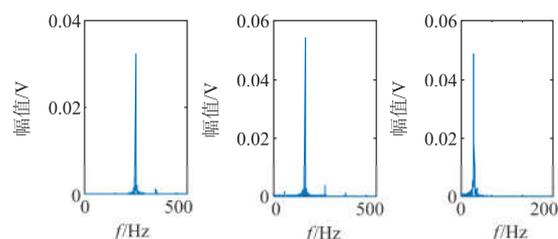


图 8 ESMD 方法下 5 次、3 次谐波和间谐波频谱图

Fig. 8 Fifth, third harmonics and interharmonic spectrum under ESMD

用 Matlab 中相关函数指令求得 ESMD 方法分解出的 3 次谐波、5 次谐波和间谐波信号与实际值的相关度分别为 0.997 1, 0.997 9, 0.998 7。用 HT 方法求取各谐波和间谐波的瞬时幅值和频率, 如表 5 所示, ESMD 方法分解出的 3 次谐波幅值误差为 0.833%, 40 Hz 间谐波幅值误差约为 0, 结果表明, 在检测含有谐波和间谐波的混合信号时, ESMD 方法同样能够较准确地检测出各谐波和间谐波参数。

表 5 ESMD 算法检测结果

输入信号		ESMD 分解结果	
幅值/V	频率/Hz	幅值/V	频率/Hz
0.03	250	0.033 8	249.999 8
0.06	150	0.060 5	149.996 5
0.05	40	0.050 0	39.992 4

4 结论

(1) 针对现有的电力系统谐波信号检测方法精度不高的问题, 以及研究较多的 EMD 在谐波检测中出现模态混叠而无法准确检测出谐波参数的问题, 结合 ESMD 理论, 首次提出基于 ESMD 和 HT

相结合的谐波检测新方法。

(2) 用 ESMD 检测谐波时, 无需去噪、加噪、平滑等处理手段加以辅助, 不受谐波含量多少和间谐波的影响。

(3) ESMD 在谐波检测中自适应分解能力强, 相对 EMD 方法检测精度高, 并且能够有效避免 EMD 方法在谐波检测中出现的模态混叠现象。

参考文献

- [1] 张桂南, 刘志刚, 向川, 等. 多频调制下电气化铁路电压波动特性分析及频率估计[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 251-257.
ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Voltage fluctuation characteristics and frequency estimation of multi frequency modulation in electrified railway[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 251-257.
- [2] 张宇辉, 贺健伟, 李天云, 等. 基于数学形态学和 HHT 的谐波和间谐波检测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 46-51.
ZHANG Yuhui, HE Jianwei, LI Tianyun, et al. A new method to detect harmonics and interharmonics based on mathematical morphology and Hilbert-Huang transform[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 46-51.
- [3] 李天云, 赵妍, 韩永强, 等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 73-77.
LI Tianyun, ZHAO Yan, HAN Yongqiang, et al. Application of Hilbert-Huang transform method in detection of harmonic and voltage flicker[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 73-77.
- [4] 高云鹏, 滕召胜, 温和, 等. 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 43-48.
GAO Yunpeng, TENG Zhaosheng, WEN He, et al. Harmonic analysis based on Kaiser window interpolation FFT and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 43-48.
- [5] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超, 等. 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, et al. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.
- [6] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 34-39.
LI Zhengming, XU Min, PAN Tianhong, et al. A harmonic detection method for distributed connected grid system by using wavelet transform and HHT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 34-39.
- [7] YASEMIN Ö, ÖMER N G, DOĞAN G. Detection of voltage flicker and voltage harmonic using Hilbert Huang transform[C] // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, September 21-24, 2014, Antalya, Turkey: 805-810.
- [8] 江辉, 王晓强, 彭建春, 等. 基于希尔伯特-黄变换的电压闪变测量方法[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 250-256.
JIANG Hui, WANG Xiaoqiang, PENG Jianchun, et al. Voltage flicker measurement method based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 250-256.
- [9] HUANG N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non stationary-time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [11] HUANG N E, CHEN X Y. On Hilbert spectral representation: a true time-frequency representation for nonlinear and nonstationary data[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2011, 3(1): 63-93.
- [12] 孟结, 李世明, 温伯坚. 基于希尔伯特振动分解的低频振荡在线辨识[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 72-78.
MENG Jie, LI Shiming, WEN Bojian. Online identification for low frequency oscillation based on hilbert vibration decomposition[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 72-78.
- [13] 张文民, 徐樊浩, 张慧娟, 等. 基于 EMD 的单通道变压器的振动信号盲分离[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 42-46.
ZHANG Wenmin, XU Fanhao, ZHANG Huijuan, et al. Blind separation of single channel transformer vibration signal based on EMD[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 42-46.
- [14] 朱宁辉, 白晓民, 董伟杰, 等. 基于 EEMD 的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 92-98.
ZHU Ninghui, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Harmonic detection method based on EEMD[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 92-98.
- [15] LIU Zhigang, CUI Yan, LI Wenhui, et al. A classification method for complex power quality disturbance using EEMD and rank wavelet SVM[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1678-1685.
- [16] 孙曙光, 庞毅, 王景琴, 等. 一种基于新型小波阈值去

- 噪预处理的 EEMD 谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 42-47.
- SUN Shuguang, PANG Yi, WANG Jingqin, et al. EEMD harmonic detection method based on the new wavelet threshold denoising pretreatment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42-47.
- [17] 任子晖, 成江洋, 邢强, 等. 基于 CEEMDAN 与 Teager 能量算子的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 56-62.
- REN Zihui, CHENG Jiangyang, XING Qiang, et al. A harmonic detection method based on CEEMDAN and Teager energy operator algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 56-62.
- [18] WANG J L, LI Z J. Extreme-point symmetric mode decomposition method for data analysis[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2013, 5(3): 1-40.
- [19] LI H F, WANG J L, LI Z J, et al. Application of ESMD method to air-sea flux investigation[J]. International Journal of Geosciences, 2013, 4(5): 8-11.
- [20] 王震, 袁海星, 张静, 等. 一种基于 ESMD 的小电流系统故障选线新方法[J]. 机电信息, 2015(18): 126-127.
- WANG Zhen, YUAN Haixing, ZHANG Jing, et al. A new fault line selection method for small current system based on ESMD[J]. Electromechanical Information, 2015(18): 126-127.
- [21] 张淑清, 徐剑涛, 姜安琦, 等. 基于极点对称模态分解和概率神经网络的轴承故障诊断[J]. 中国机械工程, 2017, 28(4): 425-431.
- ZHANG Shuqing, XU Jiantao, JIANG Anqi, et al. Fault diagnosis of bearings based on extreme-point symmetric mode decomposition and probabilistic neural network[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(4): 425-431.

收稿日期: 2017-10-25; 修回日期: 2018-03-01

作者简介:

张宇华(1975—), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事电能质量监测、谐波治理方面的研究工作; E-mail: zhyhdq@126.com

赵晓轲(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量检测与治理。E-mail: zxkshdl@163.com

(编辑 姜新丽)