

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209509

基于 AVMD 与改进能量算子的非稳态谐波分析*

计志勇, 唐 求, 李雅鑫, 滕召胜, 邱 伟
(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘 要:针对非稳态谐波分析中时频参数检测精度较低的问题,提出一种基于自适应变分模态分解(AVMD)与改进能量算子的非稳态电力谐波分析方法。首先,采用 AVMD 对非稳态谐波信号进行分解,其中采用波形特征匹配法对非稳态谐波信号进行延拓以减轻边界效应影响,并提出能量差和相关系数作为 AVMD 中模态分解个数的判据;结合模态分量,提出改进间隔采样能量算子快速提取谐波的瞬时幅值和频率,根据差分信号完成其起止时刻的定位,实现非稳态谐波时频参数的快速准确测量。仿真与实测结果表明,本文方法能够在电网工频波动、间谐波以及噪声干扰等情况下有效完成非稳态谐波的准确检测,实现暂态谐波的精确定位,且对非稳态谐波频率、幅值的最大检测误差分别为 0.094 9% 和 0.931 4%。

关键词:谐波分析;波形特征匹配;自适应变分模态分解;改进能量算子;非稳态信号

中图分类号: TM935 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Power system harmonic analysis under non-stationary situations based on AVMD and improved energy operator

Ji Zhiyong, Tang Qiu, Li Yaxin, Teng Zhaosheng, Qiu Wei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The detection accuracy of time-frequency parameters in non-stationary harmonic analysis is low. To address this issue, a new method based on the adaptive variational mode decomposition (AVMD) and the improved energy operator is proposed. Firstly, AVMD is used to decompose the unsteady harmonic signal, in which the waveform feature matching method is used to extend the unsteady harmonic signal to reduce the influence of boundary effects. The energy difference and correlation coefficient are utilized as the modal decomposition factors in AVMD. Combined with the modal components, an improved sampling energy operator is proposed to quickly extract the instantaneous amplitude and frequency of harmonics, and complete the positioning of its start and end times according to the difference sum signal. In this way, the detection of time-frequency parameters of unsteady harmonics is realized. The simulation and actual measurement results show that the method can effectively complete the accurate detection of non-steady harmonics under the condition of power frequency fluctuation, inter-harmonic and noise interference, and realize the accurate positioning of transient harmonics. The maximum detection errors of non-steady harmonic frequency and amplitude are 0.094 9% and 0.931 4%.

Keywords: harmonic analysis; waveform feature matching; AVMD; improved energy operator; non-stationary signal

0 引 言

随着电力电子器件的广泛使用和分布式能源的并网,大量非线性、冲击性负荷接入电网,造成电网的非稳态波动^[1]。当系统发生扰动、故障等情况时,丰富的非稳态谐波成分注入电网^[2-3]。电网信号中暂态谐波的存在、

基波频率偏差以及含噪声等非稳态波动都会影响谐波分析的准确性^[3]。因此,如何从电网信号中快速准确地检测出非稳态谐波的时频参数对确保电力系统安全、经济运行具有重要意义^[4]。

现行的谐波检测方法主要有快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)^[5]、小波变换^[6]、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)^[7]等。FFT 是谐波分

收稿日期:2022-03-28 Received Date: 2022-03-28

* 基金项目:国家自然科学基金(52077067)、湖南省自然科学基金(2021JJ30124)项目资助

析的传统方法,计算量小、实时性好,但在信号非同步采样时会产生频谱泄漏和栅栏效应,且没有时域信息,无法描述非稳态谐波的局部时变特征^[8]。小波变换可以较好地提取信号的局部时频特征,但需要选择合适的分解层数和小波基函数^[9]。HHT 算法能够自适应分解非线性、非平稳信号,但存在边界效应与模态混叠等问题,其改进而来的 CEEMD 方法在滤除高频分量的同时会丢失部分有效信息^[10]。

变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 是一种自适应信号处理方法^[11],其对信号不同频率成分具有很好地频带划分能力,且分解后各模态具有显著的时间信息,切合非稳态谐波尤其是暂态谐波的检测需求。但在实际工程应用中 VMD 存在边界效应^[12]以及 K 值(分解参数)难以预先确定的问题^[13]。

为减小信号分解时的边界效应,提高检测精度,专家学者们提出了极值延拓、数据预测、波形延拓等方法,但这些方法难以准确地反映信号的真实变化趋势。为使波形延拓后的趋势符合其自然走向,波形延拓时需要综合考虑波形形状和幅值上的相似性^[14]。VMD 的分解参数严重影响分解结果,现行的分解参数确定方法主要分为两类,第 1 类方法采用优化算法对 VMD 参数寻优^[15-17],该类方法分解效果较好,但计算量大、实时性差^[18],且都采用原始的镜像延拓方法,边界效应明显,对于谐波分解难以适用;第 2 类方法通过信号特征如频谱谱峰个数^[19]、损失系数^[20]等确定 K 值,速度快,但对于复杂谐波信号适用性差,易造成欠分解,丢失信号成分。因此,需要根据谐波信号的特性设定一种适用于谐波信号分解的 VMD 参数确定方法。在信号完全分解后,为准确检测暂态谐波,需精确提取各模态的时间信息,文献[21]通过求信号瞬时幅值的突变点确定暂态信号起止时刻,主观性强,且容易误判;基于奇异值分解的突变定位方法复杂度高,且难以检测过零点处的短时突变^[22]。

为解决非稳态谐波检测精度较低且难以准确检测暂态谐波的问题,本研究建立一种基于自适应变分模态分解(adaptive VMD, AVMD)与改进能量算子的新型非稳态电力谐波分析方法:

1) 谐波信号分解:建立基于 AVMD 的非稳态电力谐波分析方法。首先采用波形特征匹配法对信号进行延拓,然后通过能量差和相关系数自适应确定 VMD 中的分解个数,再对信号进行 AVMD 分解。

2) 非稳态谐波时频参数检测:通过改进的 Teager 能量算子快速求取各模态的瞬时幅值、频率;根据瞬时幅值的差分(difference sum, DS)信号精确提取暂态信号的突变信息,根据突变信息分段求取信号幅值及频率,完成非稳态谐波时频参数检测。

3) 实验验证分析:搭建高速 ADC+ARM 的硬件采样平台,通过算例仿真与实实验证本文算法对非稳态谐波检测的有效性和准确性。

1 AVMD 谐波分解算法建立

1.1 波形特征匹配延拓

VMD 适用于非稳态信号的分解,然而,其端点效应会导致得到的模态分量的瞬时幅度谱和瞬时频谱两端存在剧烈抖动,影响检测精度。为此,本文提出一种自适应 VMD 分解方法,该方法第 1 步为波形特征匹配延拓,以综合考虑信号波形形状及幅值的相关程度,使延拓后信号符合其自然趋势,减小 VMD 边界效应的影响;第 2 步为 K 值自适应选取。

在特征匹配延拓方法中,需选取适当的延拓信号点,本文提出一种基于波形相似度指标的信号延拓方法。信号波形形状的相似性可由相关系数表征,相关系数 r 可以衡量信号幅值的相关性,其定义为:

$$r(x(t), y(t)) = \frac{\text{cov}(x(t), y(t))}{\sqrt{\sigma(x)} \sqrt{\sigma(y)}} \quad (1)$$

式中: $\text{cov}(\cdot)$ 表示协方差; $\sigma(\cdot)$ 表示方差; $x(t)$ 与 $y(t)$ 分别为特征波与匹配波。

结合两点间的欧几里德距离可以衡量信号在幅值上的差异,设 x, y 是 n 维空间中的两个点,则距离为:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

将距离值归一化,则有:

$$s = \frac{d_i}{d_{\max}} \quad (3)$$

式中: s 为归一化匹配距离; d_i 表示第 i 个匹配波与特征波的距离; d_{\max} 为匹配波与特征波的最大距离。为了表征两个波形在幅值和形状上的相似度,定义波形相似度指标 P ,其表达式为:

$$P = \frac{s}{r + \varepsilon} \quad (4)$$

式中: ε 为非常小的正数。 s 越小表示信号幅值越接近; r 越大表明信号波形相似度越高。由此可知, P 越小波形匹配度越高,反之则匹配度越低。

设非稳态谐波为 $u(t)$, 波形特征匹配延拓步骤为:

1) 标记信号的左端点 S_1 , 第 1 个极小值点 N_1 , 极大值点的集合 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_j\}$, 记 S_1 到 M_1 的水平距离为 l , S_1 到 N_1 的水平距离为 L 。

2) 如图 1 所示,通过长度 l 和 L 依次确定极大值点 M_i 的左端点 S_i 和右端点 N_i , 将确定的匹配波的 M_i 与 M_1 对齐,计算相似度指标 P_i 。

3) 记录 P_i 取得最小值时特征波的 M_p 和 S_p 的坐标。

4) 以 S_1 到 S_p 前一点作为延拓波, 根据给定延拓点数对信号进行左端点延拓。

5) 同理, 进行右端点延拓, 得到延拓后信号 $u'(t)$ 。

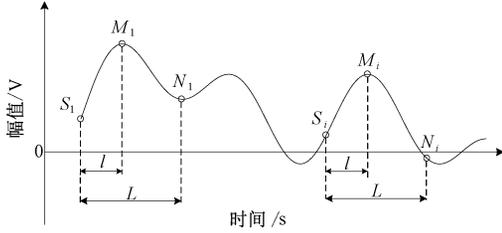


图1 波形特征匹配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of waveform feature matching

为评价波形特征匹配延拓的效果, 采用含7个谐波分量的信号进行仿真, 谐波幅值逐渐减小, 基波频率设置为49.8 Hz。3种不同信号预处理情况下谐波幅值检测的相对误差如图2所示。由图2可知, 相比另外两种方法, 波形特征匹配延拓由于更好地减小了边界效应, 可以明显地提高谐波幅值检测的精度。

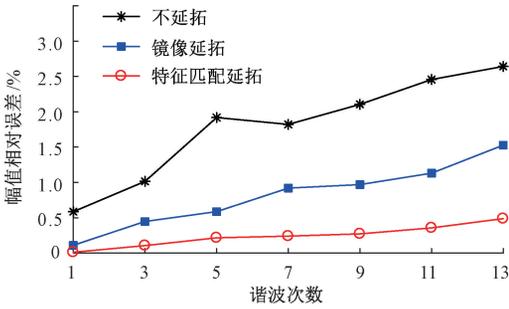


图2 不同边界效应处理算法幅值估计相对误差

Fig. 2 Different boundary effect processing algorithms

1.2 基于AVMD的非稳态谐波分解

为实现非稳态电力谐波的精准检测, 利用AVMD的频带划分能力对谐波信号进行分解。AVMD算法旨在将延拓后的信号 $u'(t)$ 分解成多个模态分量 $u_k(t)$, 且使得各个模态分量的估计带宽之和最小, 即满足下述约束变分模型。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_k u_k(t) = u'(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_K\}$ 和 $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ 分别为分解后的各模态及其中心频率; $k = 1, 2, \dots, K$ 为模态分量个数; “*” 为卷积符号。求解上述模型的过程即为AVMD分解。

用AVMD进行信号分解时需预先确定 K 值, 但实际情况下 K 值往往难以确定。为解决该问题, 本文从谐波

的特性出发, 提出一种基于分解能量差和相关系数的 K 值自适应选取策略, 从而构造AVMD方法。

由于AVMD分解之后的各模态具有准正交性, 因此可以通过分解后各IMF的能量之和与原信号的能量差来判断AVMD是否分解完全。各模态能量之和与原信号的能量差可以表示为:

$$e_k = \frac{\left| \sqrt{\sum_{k=1}^K E_k^2} - E_u \right|}{E_u} \quad (6)$$

式中: e_k 表示能量差, 值越小表明分解越完全; E_k 表示第 k 个模态的能量; E_u 表示原信号的能量。信号的能量计算公式为:

$$E_k = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N u_k^2(n)}{N}} \quad (7)$$

式中: $u_k(n)$ 为模态 $u_k(t)$ 的离散形式; N 为采样点数; E_k 为模态 $u_k(n)$ 的能量。

能量差法可控制信号的分解尺度却容易丢失与原信号相关的弱幅值谐波分量, 因此本文通过相关系数衡量弱幅值信号与原信号的相关程度, 以联合确定最佳 K 值。各模态与原信号的相关系数可通过式(1)计算。

在分解前设定初始层数 K_0 , 根据式(1)和(6), 从 $K=K_0$ 计算VMD的相关系数和能量差, 并利用式(8)自适应进行 K 值判断:

$$\begin{cases} r_k < \mu_1 \cdot r_{\max} \\ |e_{k-1} - e_k| < \mu_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mu_1 = 0.01$, $\mu_2 = 1 \times 10^{-5}$; r_{\max} 是单次VMD分解中的最大相关系数。当满足式(8)时停止迭代, 得到最佳分解结果。

本文提出的AVMD算法具体实现步骤如下:

1) 对谐波信号 $u(t)$ 进行特征匹配延拓;

2) 初始化 $K=K_0$;

3) $K=K+1$, 执行模态分解;

4) 计算分解能量差 e_k 和相关系数 r_k ;

5) 重复步骤3)和4), 直到满足式(8)时停止。即完成非稳态谐波信号 $u(t)$ 的AVMD分解, 得到 K 个有限带宽的模态分量 $u_k(t)$ 。

2 非稳态谐波时频参数检测方法构建

2.1 基于改进能量算子的谐波时频参数检测

非稳态谐波信号在经过AVMD后被分解成 K 个模态, 每个模态代表一种谐波的时域成分, 下一步即为快速提取 $u_k(t)$ 中幅值、频率、时间等特征信息。

Teager 能量算子是一种非线性算子,其能够快速跟踪信号的瞬时幅值、频率变化,且具有良好的时间分辨率^[23]。对分解后的模态 $u_k(n)$,其 Teager 能量算子为:

$$\psi[u_k(n)] = u_k^2(n) - u_k(n+1)u_k(n-1) \quad (9)$$

Teager 能量算子计算量小、便于实现,但容易受噪声影响,且对于突变时刻无明确指示信息。为此,提出间隔两点采样的改进 Teager 能量算子方法,提升其抗噪性,确保准确追踪信号瞬时幅值和频率;并求取瞬时幅值的差分 and 信号,用于指示信号突变时刻,以提升 Teager 能量算子对暂态扰动的定位精度。改进 Teager 能量算子可表示为:

$$\psi[u_k(n)] = u_k^2(n) - u_k(n+2)u_k(n-2) \quad (10)$$

将分解得到的模态 $u_k(n)$ 构造对称差分信号代入式(10)可得各模态的瞬时幅值 $a_k(n)$ 和瞬时频率 f_k 为:

$$a_k(n) = \left| \frac{\sqrt{2}\psi(u_k(n))}{\sqrt{\psi(u_k(n+2) - u_k(n-2))}} \right| \quad (11)$$

$$f_k = \frac{1}{4\pi} \arccos \left[1 - \frac{\psi(u_k(n+2) - u_k(n-2))}{2\psi(u_k(n))} \right] \quad (12)$$

由于差分 and 信号有助于提取信号的突变特征,为准确获取暂态谐波的起止时刻,对暂态谐波的瞬时幅值 $a_k(n)$ 进行差分 and 运算。首先,对 $a_k(n)$ 进行归一化处理得到信号 $p(n)$,其差分 and 信号 $q(n)$ 定义为:

$$q(n) = \begin{cases} |p(n) - p(n+1)|, & n = 1 \\ \sum_{i=1}^Q |p(k) - p(n+i)| + |p(n) - p(n-i)|, & \text{其他} \\ |p(n) - p(n-1)|, & n = N \end{cases} \quad (13)$$

当 $2 \leq k \leq N-1$ 时, Q 可表示为:

$$Q = \begin{cases} k-1, & 2 \leq k \leq s \\ s, & s < k \leq N-s \\ N-k, & N-s < k \leq N-1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: s 为局部观测窗的长度,其值不宜超过一个周期采样点数的 $1/10$ 。差分 and 运算的作用是产生指示突变时刻的脉冲。

对于图 3(a) 所示 AVMD 所得暂态谐波信号 $u_k(n)$,其经能量算子解调后的瞬时幅值如图 3(b) 所示。对瞬时幅值做差分 and 运算,可得如图 3(c) 所示的差分 and 信号 $q(n)$ 。为减小噪声影响,设置阈值 $\delta = 0.35 \max(q)$,舍弃小于阈值的部分。因此,阈值处理后 $q(n)$ 的极大值位置可用于精确确定暂态谐波起止时刻,定位脉冲 p 如图 3(d) 所示。

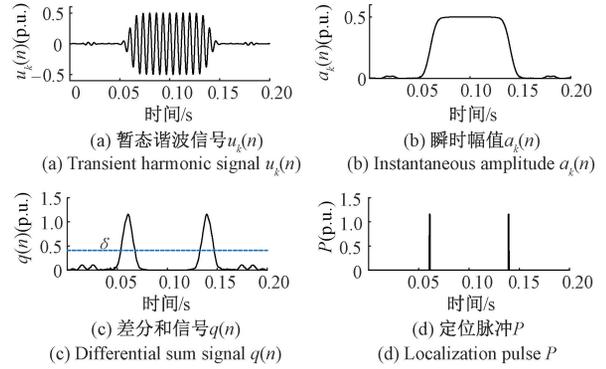


图3 暂态谐波起止时刻定位示意图

Fig. 3 Diagram of transient harmonic time localization

2.2 非稳态谐波分析算法流程

基于 AVMD 与改进能量算子的非稳态电力谐波分析方法的算法流程图如图 4 所示,具体步骤为:

1) 波形特征匹配延拓:对于采样后的谐波信号,分别计算各极大值点附近的波形匹配度参数 P ,选取 P_{\min} 对应波形作为匹配波形,完成信号的延拓。

2) 基于自适应 K 值的 AVMD 分解:设置初始模态分解数 K_0 ,给定惩罚因子 α 等参数;对延拓后的信号进行 AVMD,并计算能量差 e_k 和相关系数 r_k ,当满足条件时,输出最佳 K 值和 AVMD 分解结果。

3) 非稳态谐波时频参数检测:利用改进能量算子提取各模态的幅值 A 、频率 f ;根据瞬时幅值的 DS 信号确定暂态谐波起止时刻 T_s 、 T_e ,完成时频参数检测。

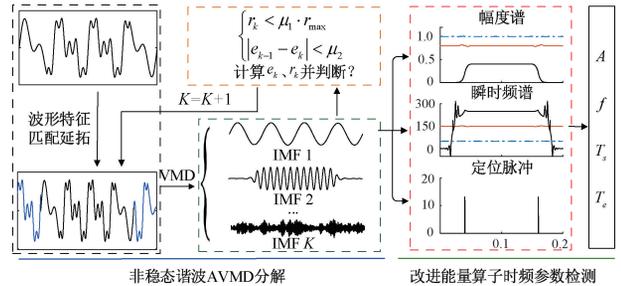


图4 基于 AVMD 与改进能量算子的非稳态谐波检测流程

Fig. 4 Harmonic detection based on AVMD and ITEO

3 非稳态电力谐波仿真实验研究

为验证本文提出方法的准确性,首先利用仿真实验进行验证。仿真时设置采样频率 $f_s = 10.24$ kHz,采样点数 $N = 2048$ 。

3.1 含白噪声的非稳态电力谐波仿真分析

为验证本文方法对非稳态谐波的检测性能,采用含间谐波和较强噪声情况下的谐波信号模拟真实的非稳态

谐波,谐波信号的模型为:

$$u(t) = \sum_{m=1}^9 A_m \cos(2\pi f_m t) + w(t) \quad (15)$$

式中: A_m f_m 为各频率成分的幅值和频率; $w(t)$ 是信噪比为 30 dB 的白噪声。信号由基波、3、5、7、9、11、13 次谐波及 2 个间谐波组成,具体参数如表 1 所示。

表 1 基波、各次谐波与间谐波参数

Table 1 Parameters of the simulated harmonic signal

频率成分	基波			谐波				间谐波	
	1 st	3 rd	5 th	7 th	9 th	11 th	13 th		
f_m/Hz	49.8	149.4	249	348.6	448.2	547.8	647.4	206	495
$A_m/(\text{p. u.})$	1.00	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.27	0.12

为验证本文提出的 AVMD 算法对非稳态谐波的分解性能,分别选择遗传算法 (genetic algorithm, GA) 优化 VMD^[17] 以及基于频谱自适应确定 K 值^[18] 的 AVMD 方法与本文分解算法进行对比。经仿真实验,文献[18]方法对复杂非稳态谐波适应性差,丢失频率成分; Ga-VMD 算法以包络熵作为适应度函数对参数进行寻优,寻优结果与本文方法所得参数一致,分解结果如图 5 所示。(限于篇幅,本文给出 4 个模态分量)

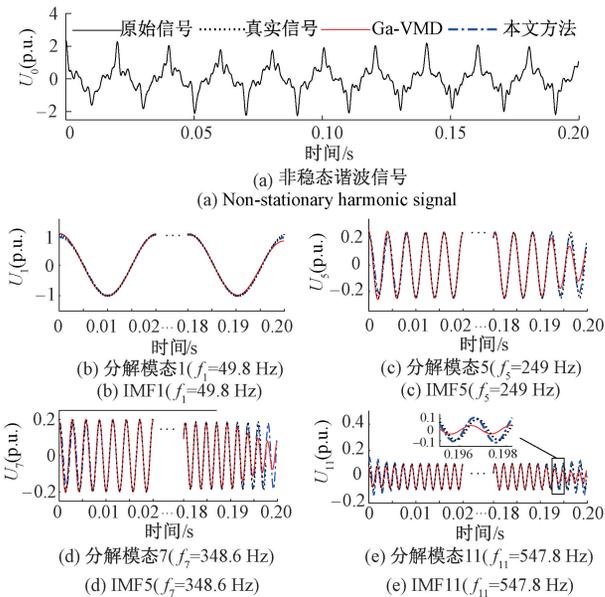


图 5 不同 AVMD 算法分解结果对比

Fig. 5 Comparison of the results of different AVMD

由图 5 可知,非稳态谐波被分解成多个模态,每个模态代表一种单一频率成分的谐波成分,分解结果未产生模态混叠现象,表明 Ga-VMD 算法与本文方法皆可实现对非稳态谐波的准确分解;但由于 Ga-VMD 算法未进行自适应特征匹配延拓,导致分解后波形边界出现明显畸

变。此外,由于遗传算法需要进行迭代寻优,耗时远高于本文算法。

为验证本文方法对谐波参数检测的准确性,仿真实验采用经典的加窗插值 FFT 算法^[5]、由 EMD 改进而来的 CEEMDAN 算法^[21] 以及基于 Ga 优化的 AVMD 方法^[16-17] 与本文方法作对比,检测结果如图 6、7 所示(检测结果取 50 次实验的平均值)。

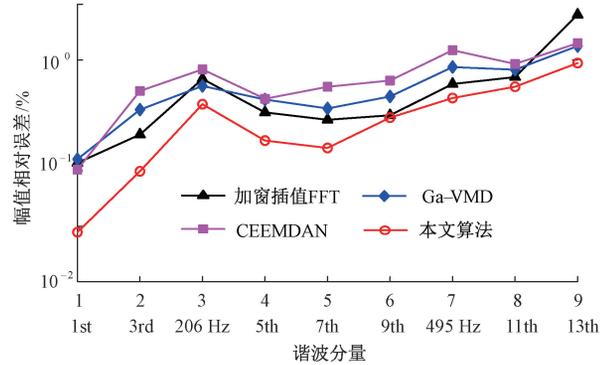


图 6 不同算法对各次谐波幅值测量的相对误差

Fig. 6 Relative error of amplitude for different methods

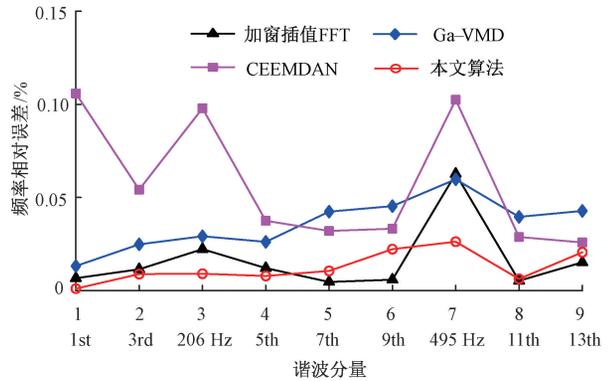


图 7 不同算法对各次谐波频率测量的相对误差

Fig. 7 Relative error of frequency for different methods

根据图 6 检测结果可知,本文方法在各分量幅值检测精度上均优于其他算法,在较高噪声和存在间谐波的非稳态情况下幅值检测误差 < 1%,满足非稳态谐波检测精度要求,具有较好的鲁棒性;加窗插值 FFT 算法易受噪声影响,且由于栅栏效应存在,对间谐波检测精度较低; Ga-VMD 方法由于分解后各模态存在边界效应,导致幅值检测精度较低。由图 7 检测结果可知,本文方法与加窗插值 FFT 算法对各次谐波频率检测精度高,频率检测误差 < 0.1%,但由于本文算法不存在栅栏效应,因此对间谐波检测精度明显高于 FFT 算法;CEEMDAN 算法通过添加噪声的幅值和选择集总分解次数提高算法分解性能,但这些参数通过经验方法确定,与本文方法相比其自适应性较差,频率检测波动性强,检测误差较大。由此可见,本文方法对非稳态谐波具有较高检测精度。

3.2 基波频率波动的非稳态电力谐波仿真分析

由于电网信号的波动性,电网基波频率会在小范围内波动。针对电网信号频率变动,设置式(15)信号的基波频率在49.5~50.5 Hz之间以步长0.1 Hz变化来模拟真实的基频波动,并采用本文方法进行非稳态谐波幅值检测,基波频率波动时各频率成分的幅值测量相对误差如图8所示。

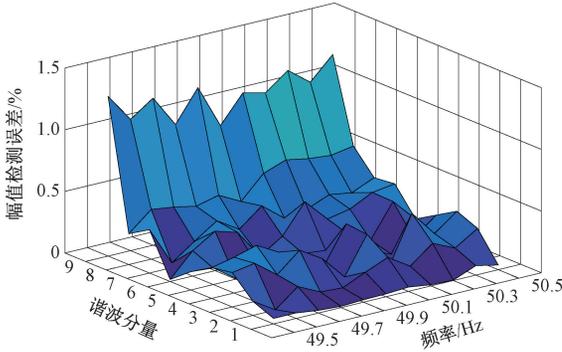


图8 基波频率波动时幅值测量的相对误差(谐波分量根据信号频率升序排列)

Fig. 8 Relative error of amplitude under frequency fluctuation (harmonic components in ascending order of signal frequency)

由图8可知,在基波频率波动时,13次谐波幅值测量误差较大,幅值相对误差<1.5%,其余谐波和间谐波分量的幅值误差都在0.6%以内。由此可见,本文算法可以有效克服基波频率波动对谐波参数测量精度的影响,完成非稳态谐波的准确测量。

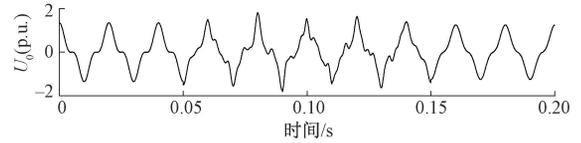
3.3 含暂态谐波的非稳态电力谐波仿真分析

复杂电网环境下,电网中可能存在暂态扰动,为验证本文方法对非稳态谐波检测的有效性,采用含有间谐波、时变谐波和短时谐波的复杂谐波信号进行仿真实验研究,设置仿真信号为:

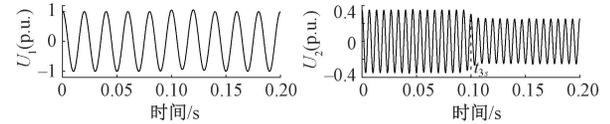
$$u(t) = \cos(2\pi \times 50t_1) + 0.35\cos(2\pi \times 150t_2) + 0.25\cos(2\pi \times 150t_3) + 0.20\cos(2\pi \times 174t_4) + 0.15\cos(2\pi \times 250t_5) + 0.12\cos(2\pi \times 350t_6) + 0.08\cos(2\pi \times 450t_7) + w(t) \quad (16)$$

式中: $0 \leq t_1 \leq 0.2$ s; $0 \leq t_2 \leq 0.1$ s; $0.1 < t_3 \leq 0.2$ s; $0.06 \leq t_4 \leq 0.14$ s; $0.05 \leq t_5 \leq 0.15$ s; $0.06 \leq t_6 \leq 0.11$ s; $0.09 \leq t_7 \leq 0.14$ s; 即基波为稳定谐波,3次谐波在0.1 s时刻发生幅值突变,间谐波与非稳态谐波短时存在; $w(t)$ 为SNR=40 dB的噪声。

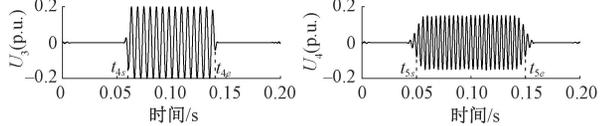
图9是AVMD算法对式(16)含暂态谐波信号的分解结果。由图9可知,本文算法可以清楚地区分基波、各次谐波/间谐波信号,且含有显著的时域信息。对分解后的各模态分量进行能量算子解调,得到谐波的时频信息,检测结果如表2所示。



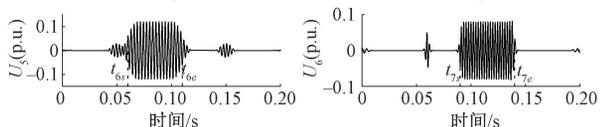
(a)含暂态谐波的非稳态谐波信号
(a) Non-stationary harmonic signals with transient harmonics



(b)分解模态1($f_1=50$ Hz) (b) IMF1($f_1=50$ Hz)
(c)分解模态2($f_2=150$ Hz) (c) IMF2($f_2=150$ Hz)



(d)分解模态3($f_3=174$ Hz) (d) IMF3($f_3=174$ Hz)
(e)分解模态4($f_4=250$ Hz) (e) IMF4($f_4=250$ Hz)



(f)分解模态5($f_5=350$ Hz) (f) IMF5($f_5=350$ Hz)
(g)分解模态6($f_6=450$ Hz) (g) IMF6($f_6=450$ Hz)

图9 含暂态谐波的AVMD分解结果

Fig. 9 AVMD results with transient harmonics

表2 含暂态谐波非稳态电力谐波检测结果

Table 2 Parameter estimation results of transient harmonics

理论值		检测值					
频率 /Hz	幅值 /(p. u)	T_s/s	T_e/s	频率 /Hz	幅值 /(p. u)	T_s/s	T_e/s
50	1.00	0	0.20	49.999 4	1.000 3	0	0.200 0
150	0.35	0	0.10	149.991 1	0.348 4	0	0.099 8
	0.25	0.10	0.20	150.062 1	0.251 1	0.099 8	0.200 0
174	0.20	0.06	0.14	174.106 8	0.201 7	0.059 9	0.139 7
250	0.15	0.05	0.15	250.152 9	0.148 4	0.050 3	0.149 8
350	0.12	0.06	0.11	350.304 5	0.117 9	0.061 3	0.109 9
450	0.08	0.09	0.14	449.409 0	0.077 6	0.089 4	0.139 6

注: T_s 与 T_e 分别为各谐波分量的起止时间

由表2可知,本文方法对谐波起止时刻检测误差小于0.001 3 s,检测结果误差小,可以精确定位谐波幅值突变和谐波发生的起止时刻;幅值和频率的平均检测误差分别为0.001 54 p. u.和0.175 4 Hz,对含暂态谐波的非稳态电力谐波具有很高的检测精度,很好地弥补了FFT对暂态谐波检测精度低、无法全面描述电网谐波局部时变特征的缺陷。

4 实验验证

为验证本文提出的基于 AVMD 与改进能量算子的非稳态谐波检测方法的有效性,搭建用于谐波检测的实验平台。实验平台的系统结构以及实物如图 10 所示。

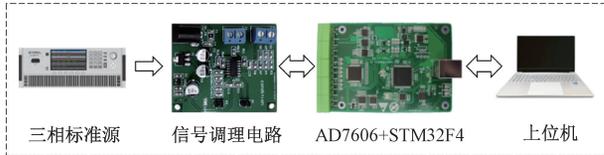


图 10 实验平台的系统结构与实物图

Fig. 10 System structure and physical map of the platform

实验过程中,由可编程三相标准源 PSA6000 产生非稳态谐波电压信号,其由频率为 49.7 Hz 的基波、3、5、7、9、11、13 次谐波以及频率为 204、382 Hz 的 2 个间谐波组成。采用 Tektronix TDS1012B-SC 示波器监测电压波形,通过信号调理电路对大电压信号进行调理,信号采集单元由 STM32F407 控制 16 位 8 通道同步采样芯片 AD7606 采集信号,实际采样频率设置为 8 kHz,并将采样数据传输给上位机进行处理,从而实现非稳态电力谐波的检测。VMD 方法与本文方法的实际测量结果如表 3 所示。

表 3 实验平台实测结果

Table 3 Test results of the experimental platform

频率成分	设定值		频率相对误差/%		幅值相对误差/%	
	频率/Hz	幅值/V	VMD	本文方法	VMD	本文方法
1 st	49.7	220	0.0131	0.046 2	0.337 9	0.356 3
3 rd	149.1	35	0.150 1	0.070 6	0.284 8	0.264 4
5 th	248.5	25	0.240 1	0.094 9	0.786 2	0.615 5
7 th	347.9	16	0.100 6	0.049 1	2.649 6	0.599 1
9 th	447.3	12	0.211 3	0.019 3	1.395 9	0.665 8
11 th	546.7	8	0.041 0	0.008 6	1.833 7	0.931 4
间谐波 1	204.0	20	0.272 9	0.190 9	0.567 7	0.142 1
间谐波 2	382.0	10	0.598 6	0.256 7	4.720 9	1.504 2

由表 3 可知,原始 VMD 方法由于边界效应明显,参数检测结果误差大。在间谐波存在且基频波动的情况下,本文方法对间谐波估计误差略大,但对基波与谐波幅值的测量相对误差 $\leq 0.931\%$,频率测量相对误差 $\leq 0.094\%$,实测结果表明本文方法可有效实现非稳态谐波的准确检测。

5 结 论

针对非稳态谐波分析精度不足的问题,本文提出了一种基于 AVMD 与改进能量算子的非稳态电力谐波检测方法,该方法首先对信号进行特征匹配延拓,综合考虑信号形状及幅值的相关程度,使延拓后信号符合其自然走向。幅值估计误差实验表明采用波形特征匹配延拓可以明显减小各模态的边界效应。然后通过能量差和相关系数联合确定分解层数 K ,对延拓后信号进行 AVMD 分解;30 dB 噪声下测试实验表明 AVMD 可有效改善模态混叠现象,对比实验表明本文方法切合谐波信号特性,能有效减小边界效应,分解效果良好。最后通过改进的能量算子实现非稳态谐波信号幅值、频率以及时间信息的准确检测。仿真与实测结果表明,本方法可有效抵抗电网基波频率波动、间谐波和噪声测试干扰。相比现有方法,本文方法可以准确检测非稳态谐波信号时频参数,抗干扰性强,实现了复杂环境下非稳态电力谐波的准确分析。

参考文献

[1] 邱伟,唐求,唐璐,等. 基于准同步序列重构的非稳态电力谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 456-464,676.
 QIU W, TANG Q, TANG L, et al. Power system harmonic analysis under non-stationary situations based on quasi-synchronous and sequence reconstruction [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 456-464,676.

[2] 王宁,田书娅,贾清泉. 主动配电网谐波治理设备综合优化配置方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 91-98.
 WANG N, TIAN SH Y, JIA Q Q, et al. Method for integrated optimal configuration of harmonic control equipment in active distribution network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 91-98.

[3] ORNELAS F, RICO J, MORFIN R, et al. Optimal dynamic harmonic extraction and suppression in power conditioning applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7909-7918.

[4] 汪飞,全晓庆,任林涛. 电能质量扰动检测与识别方

- 法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4104-4121.
- WANG F, QUAN X Q, REN L T. Review of power quality disturbance detection and identification methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4104-4121.
- [5] 刘冬梅, 杨重良, 何怡刚, 等. 基于 Rife-Vincent 自卷积窗三谱线插值 FFT 电力谐波分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1351-1360.
- YANG D M, YANG CH L, HE Y G, et al. Harmonic analysis of power system based on Rife-Vincent self-convolution window triple-spectral-line interpolation FFT[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1351-1360.
- [6] 吴纯, 王文波. 基于 Synchrosqueezing 小波变换的谐波和间谐波检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(4): 630-635.
- WU CH, WANG W B. Harmonic and inter-harmonic detection method based on synchrosqueezing wavelet transform in power system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 630-635.
- [7] 张慧, 孟克其劳, 张占强, 等. 基于 CEEMDAN 和 HHT 的谐波检测方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(6): 83-87.
- ZHANG H, MENG K Q L, ZHANG ZH Q, et al. Harmonic detection method based on CEEMDAN and HHT [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(6): 83-87.
- [8] 滕召胜, 王永, 李建闽, 等. 一种新的谐波时频分解方法——K-S 分解[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(2): 234-242.
- TENG ZH SH, WANG Y, LI J M, et al. A new method of harmonic time-frequency decomposition: The K-S decomposition [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(2): 234-242.
- [9] 蔡星月, 高云鹏, 李云峰, 等. 基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱间谐波检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 199-207.
- CAI X Y, GAO Y P, LI Y F, et al. Detection method of multi-dense spectrum inter-harmonics based on adaptive TLS-ESPRIT and improved all-phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 199-207.
- [10] 付林军, 王凤随, 刘正男. 改进自适应 CEEMD 方法在心电信号去噪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 50-57.
- FU L J, WANG F S, LIU ZH N. Application of improved adaptive CEEMD method in denoising of ECG signals [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 50-57.
- [11] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [12] 陈陈, 李晓明, 杨玲君, 等. 变分模态分解在电力系统谐波检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 63-70.
- CHEN CH, LI X M, YANG L J, et al. Application of variational mode decomposition in power system harmonic detection [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 63-70.
- [13] 卿宗胜, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于自适应 VMD 和改进功率谱估计的球磨机负荷特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 234-241.
- QING Z SH, GAO Y P, WU C, et al. Feature extraction method of ball mill load based on the adaptive variational mode decomposition and the improved power spectrum analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 234-241.
- [14] 荣钦彪. 改进端点效应和抑制模态混叠的 EMD 方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- RONG Q B. Research on EMD method for improving end effect and suppressing modal mixing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [15] 肖洒, 陈波, 沈道贤, 等. 改进 VMD 和阈值算法在局部放电去噪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 206-214.
- XIAO S, CHEN B, SHEN D X, et al. Application of improved VMD and threshold algorithm in partial discharge denoising [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 206-214.
- [16] MEI L, LI S Y, ZHANG C, et al. Adaptive signal enhancement based on improved VMD-SVD for leak location in water-supply pipeline [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(21): 24601-24612.
- [17] 陈祥, 杨志强, 田镇, 等. GA-VMD 与多尺度排列熵结合的 GNSS 坐标时序降噪方法[J/OL]. 武汉大学学

- 报(信息科学): 1-16[2022-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20220104.0950.002.html>.
- CHEN X, YANG ZH Q, TIAN ZH, et al. A denoising method for GNSS time series based on GA-VMD and Multi-Scale permutation entropy [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-16[2022-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20220104.0950.002.html>.
- [18] 夏茂森, 江玲玲. 变分模态分解模型中关键参数 K 的辨识研究 [J]. 统计与信息论坛, 2021, 36(2): 23-35.
- XIA M S, JIANG L L. Research on identification of key parameter K in variational mode decomposition model[J]. Journal of Statistics and Information, 2021, 36(2): 23-35.
- [19] CAI G, WANG L, YANG D, et al. Harmonic detection for power grids using adaptive variational mode decomposition[J]. Energies, 2019, 12(2): 232-240.
- [20] 张民谣, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于自适应变分模式分解的非稳态电压闪变包络参数检测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 599-608.
- ZHANG M Y, GAO Y P, WU C, et al. Non-stationary voltage flicker envelope parameters detection based on adaptive variational mode decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 599-608.
- [21] 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 Z H, CHEN J Y, XING Q, 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.
- [22] LI Y X, TENG ZH SH, LIANG C B, et al. Detection and localization of short-duration variations using sliding window SVD and sparse signal decomposition[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6912-6920.
- [23] 吴聪, 高云鹏, 张韵琦, 等. 基于改进能量算子和 K-RV 互卷积窗的闪变参数检测 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 69-76.
- WU C, GAO Y P, ZHANG Y Q, et al. Flicker parameter detection based on improved energy operator and K-RV mutual convolution window [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 69-76.

作者简介



计志勇, 2020 年于湖南大学获得学士学位, 现为湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为智能检测与电能质量分析。

E-mail: jzy782608@163.com

Ji Zhiyong received his B. Sc. degree from Hunan University in 2020. He is currently pursuing his master degree at Hunan University. His main research interests include intelligent detection and power quality analysis.



唐求 (通信作者), 分别于 1995 年和 2010 年在湖南大学获得硕士学位和博士学位, 现为湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电能质量检测, 广域同步相量测量技术与应用。

E-mail: tangqiu@hnu.edu.cn

Tang Qiu (Corresponding author) received her M. Sc. and Ph. D. degrees both from Hunan University in 1995 and 2010, respectively. She is currently a professor and a Ph. D. advisor at Hunan University. Her main research interests include electric energy quality detection and wide area synchrophasor measurement technology and its application.