

文章编号:1671-6833(2021)01-0021-07

# 改进的 VMD-HT 在电能质量扰动检测中的应用

廖晓辉, 陈川川

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对电能质量扰动检测精度低和抗干扰性弱的问题,提出了一种基于能量收敛因子与 PSO 优化的 VMD-HT 方法。首先通过改进的 VMD 方法自适应地选择  $k$  和  $\alpha$  的最优取值,然后通过 Hilbert 变换求取 VMD 分解后 IMF 分量的瞬时幅值-频率仿真图,定位扰动发生的起止时刻,实现电能质量扰动的检测。通过加入白噪声模拟实际电能质量扰动和随机改变电能质量扰动数学模型的起止时刻,进行大量检测仿真实验。结果显示,其暂态振荡扰动信号在含 20 dB 白噪声的环境下发生的起止时刻检测精度相较于 HHT 分别提高了 0.007 s 和 0.006 s,且其检测误差在 0.003 s 内的概率达到 99.84%。复合电能质量扰动等检测仿真实验结果也表明,改进的 VMD-HT 方法相较于传统的 HHT 方法具有更好的检测效果,避免了因 EMD 容易发生模态混叠的现象导致检测精度低、抗干扰性弱和容错性差的问题。

**关键词:**电能质量扰动;能量收敛因子;PSO;VMD-HT;HHT

**中图分类号:** TM930

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.01.004

## 0 引言

近年来,随着智能电网的快速发展,大量的非线性负载和冲击性负荷的增加,导致电流、电压发生畸变,电网的稳定性受到影响。精密的仪器设备对供电质量要求更高,实现电能质量扰动准确的检测,对改善和提高电能质量具有重要的意义。

目前国内外常用的电能质量扰动检测方法仍存在不少问题亟待解决,例如,短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)在处理非平稳信号时,选择窗的固定性导致分辨率单一;采用 S 变换求取的 S 矩阵的冗余信息过多,干扰了特征的提取,影响了信号识别精度<sup>[1-2]</sup>;而小波变换(wavelet transform, WT)中若不能保证基函数和分解尺度选取合适,则不能确保获得极佳的结果<sup>[3-4]</sup>。相较而言,希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)更成熟,HHT 具有很好的自适应性,很多极端情况均可适用,然而其不足之处在于会发生端部失真,产生模态混叠、虚假分量等相关弊端<sup>[5-6]</sup>。很多学者采用改进 HHT 的方法进行电能质量扰动的检测,其中胡雷等<sup>[6]</sup>采用移动平均法改进 HHT 算法,通过对 HHT 变换得

到的幅频参数进行平滑处理,减小了其波动,实现电能质量扰动的检测,但容易发生模态混叠和端点效应的现象。最近几年变分模态分解(variational modal decomposition, VMD)被广泛地应用到信号处理中,其中黄传金等<sup>[7]</sup>提出了一种基于 VMD 的电能质量扰动检测新方法,VMD 方法既可以处理不同时间支集的电能质量扰动信号,也可以分析频率相近的谐波和复合扰动,同时也避免了模态混叠的现象,得到的瞬时幅频分析结果更加精确,但 VMD 参数特征的选取主要依靠经验选取;罗亦泳等<sup>[8]</sup>对 VMD 参数选取进行了改进,提出采用最大相关系数法优化  $k$  值的选取方法,并将其运用到桥梁的固有频率和阻尼系数的识别,判断由于温度、多路径等环境因素导致桥梁发生的变化。

本文提出了一种基于能量收敛因子与粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)的变分模态分解和希尔伯特变换(variational modal decomposition and Hilbert transform, VMD-HT)的电能质量扰动检测方法。其不仅避免了 HHT 容易发生模态混叠的缺陷,通过能量收敛因子和 PSO 自适应地选择最优的 VMD 参数  $k$  和  $\alpha$  的值,电能质量

收稿日期:2020-10-20;修订日期:2020-12-25

基金项目:河南省科技攻关项目(182102210004)

作者简介:廖晓辉(1972—),女,湖北孝感人,郑州大学副教授,硕士,主要从事电能质量扰动检测与识别研究,E-mail:liao Xiaohui0001@zzu.edu.cn。

扰动检测的精度、抗干扰性和容错能力都得到了有效的提高。

# 1 变分模态分解及改进

## 1.1 VMD 算法原理

VMD 算法的实质是将信号分解过程转变为求解变分问题的过程,将输入实值信号  $f$  分解为  $k$  个单分量调幅-调频的固有模态函数 (intrinsic modal function, IMF)  $u_k(t)$ 。相应变分问题的目标函数把  $k$  个模态估计带宽之和最小且模态之和等于  $f$  作为约束条件,其数学模型表达式如下<sup>[9-10]</sup>:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}, \\ \text{s.t. } \sum_k u_k = f. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\delta(t)$  为狄拉克函数;  $\omega_k(t)$ 、 $u_k(t)$  分别为第  $k$  个 IMF 分量的中心频率、模态函数。

引入二次惩罚因子  $\alpha$  和 Lagrange 乘数  $\lambda$ , 构建 Lagrange 方程, 如式 (2) 所示, 求取式 (1) 最优解。

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] \right\|_2^2 + \\ & \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Lagrange 方程采用交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM), 不断迭代更新  $u_k^{n+1}$ 、 $\omega_k^{n+1}$ 、 $\lambda^{n+1}$ , 寻求该函数的最优解<sup>[11]</sup>。  $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 、 $\omega_k^{n+1}$ 、 $\hat{\lambda}^{n+1}(\omega)$  的数学表达式为:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\lambda(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}; \quad (3)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}; \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau(\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega)). \quad (5)$$

式中:  $\hat{\cdot}$  表示傅里叶变换;  $\tau$  为保真系数;  $n$  为迭代次数。

VMD 算法步骤如下:

步骤 1 初始化  $\hat{u}_k^1(\omega)$ 、 $\omega_k^1$ 、 $\hat{\lambda}^1(\omega)$  和  $n(n=0)$ ;

步骤 2  $n \leftarrow n+1$ , 并由式 (3) 和式 (4) 更新  $\hat{u}_k$  和  $\omega_k$ ;

步骤 3 由式 (5) 更新  $\hat{\lambda}$  的取值;

步骤 4 重复步骤 2 和步骤 3, 当式 (6) 满足

时, 停止迭代, 输出结果, 得到  $k$  个模态分量及其中心频率。

$$\frac{\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \varepsilon. \quad (6)$$

## 1.2 基于能量收敛因子确定 $k$ 值

由于电能质量扰动检测点环境的不确定性, 分解模态的个数  $k$  值很难确定最优值, 这对 VMD 分解的自适应性和效果具有很大的影响。为了解决模态分量  $k$  值选取的问题, 本文构造了能量收敛因子来确定 VMD 分解中的 IMF 分量  $k$  的个数, 相邻  $k$  值分解后的余量与原始能量比值的差值满足阈值的条件, 此时 VMD 分解相对完全, 避免了频率相近造成的过分解和欠分解的现象。能量收敛因子计算过程即通过 VMD 算法将原始信号  $s$  分别分解为  $m$  个 IMF 分量与  $m+1$  个 IMF 分量, 将信号分解为  $m$  个 IMF 的余量与  $s$  的能量的比值称为  $E_m$ , 将信号分解为  $m+1$  个 IMF 的余量与  $s$  的能量的比值称为  $E_{m+1}$ , 则  $\Delta_{m+1} = E_m - E_{m+1}$ ,  $\Delta_{m+1}$  为能量收敛因子, 其数学表达式如下:

$$\Delta_{m+1} = \frac{\|s\|_2^2 - \sum_{i=1}^{m-1} \|u_m\|_2^2}{\|s\|_2^2} - \frac{\|s\|_2^2 - \sum_{i=1}^m \|u_{m+1}\|_2^2}{\|s\|_2^2}. \quad (7)$$

通过分析多组扰动信号的实验结果, 本文阈值  $\eta$  取 0.02。详细实现过程如下:

步骤 1 初始化模态分量个数值  $m=1$ ;

步骤 2 运用 VMD 分解原理将原始信号分别分解为  $m$  和  $m+1$  个模态分量;

步骤 3 分别计算模态分量个数为  $m$  和  $m+1$  的余量能量和原始信号  $s$  的能量;

步骤 4 代入式 (7), 得能量收敛因子  $\Delta_{m+1}$  的值, 并更新 VMD 算法分解的模态分量个数  $m=m+1$ ;

步骤 5 重复步骤 2~4, 直到达到能量收敛因子  $\Delta_{m+1} < \eta$ , 迭代终止, 即可自适应确定信号经过 VMD 算法分解的最优分解个数  $m=k$ 。

## 1.3 基于 PSO 算法确定惩罚因子

惩罚因子  $\alpha$  与分解的 IMF 分量的带宽成反比,  $\alpha$  越小 IMF 带宽越大, 相反  $\alpha$  越大 IMF 带宽越小。PSO 算法是一种群体随机搜寻、不断迭代寻优的过程, 将个体粒子的极值与群体目前的最优解进行比较, 通过不断地迭代和更新粒子的位置, 获得全局的最优取值<sup>[12-13]</sup>。包络熵的大小用来评价信号的稀疏特性。通过对分解后每个模态

分量进行处理,形成一个概率序列  $P_i$ ,求出其熵值。信号  $x(i)$  的包络熵定义为:

$$\begin{cases} H_p = - \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i; \\ p_i = a_i / \sum_{i=1}^n a_i. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $a(i)$  为信号  $x(i)$  分解后的 IMF 分量经过 Hilbert 变换得到的包络信号。

经过 VMD 算法分解的模式分量中的噪音成分与包络熵的大小成正比,即噪音成分越多,包络熵越大;反之噪音成分越少,包络熵越小。不同粒子所处的不同位置代表惩罚因子  $\alpha$  不同的取值,计算此时 IMF 分量的包络熵,即 PSO 的适应度函数,当包络熵具有最小值时,信号具有最佳的分解效果。因此将包络熵的最小值作为 PSO 算法在迭代寻优过程中的全局最优值。算法具体流程如图 1 所示。

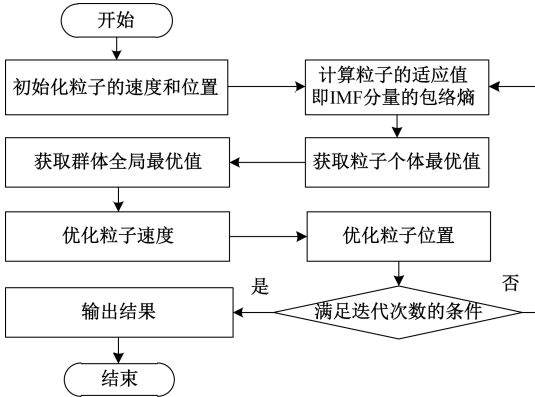


图 1 PSO 算法流程图

Figure 1 PSO algorithm flow chart

## 2 基于改进 VMD-HT 的电能质量扰动检测

首先对输入的电能质量扰动信号进行能量收敛因子的计算,确定  $k$  值;然后运用 PSO 优化算法确定惩罚因子  $\alpha$  的取值,运用 VMD 算法将电能质量扰动信号  $x(t)$  分解成  $k$  个 IMF 分量之和;最后,通过 Hilbert 变换得到相应 IMF 分量的瞬时频率和瞬时幅值<sup>[14]</sup>。具体步骤如图 2 所示。

## 3 仿真结果与分析

对电力系统中常见的单一电能质量扰动信号和复合扰动信号进行 MATLAB 仿真分析。电压暂降、中断等单一电能质量扰动信号构成简单,属于单一分量信号,本文直接进行 Hilbert 变换,分析其发生的起止时刻。暂态振荡、谐波等信号构成相对复杂,属于复杂分量信号,运用改进的

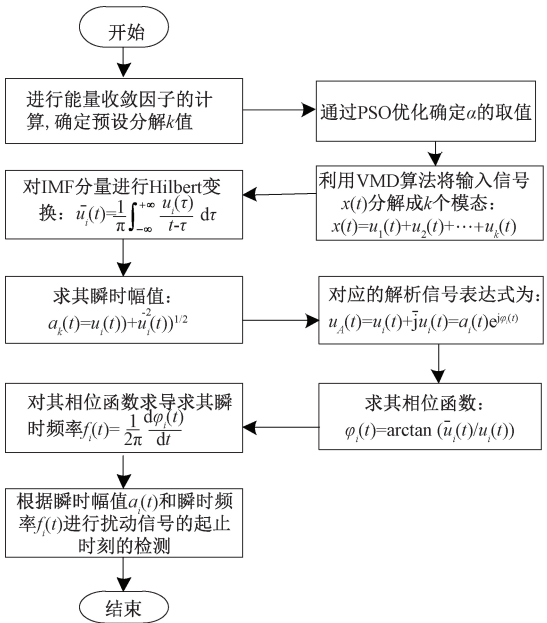


图 2 改进 VMD-HT 算法流程图

Figure 2 Improved VMD-HT algorithm flow chart

VMD-HT 对电能质量扰动进行检测,并将其与 HHT 检测结果进行对比分析。复合扰动信号其成分更加复杂,亦运用改进的 VMD-HT 对其进行扰动发生时刻的定位。

### 3.1 单一电能质量扰动

#### 3.1.1 单一分量电能质量扰动

对某三相系统做仿真分析,其电压幅值为 311 V、频率为 50 Hz,采样频率  $f=1\,000$  Hz。设某一相的电压在 0.15~0.25 s 之间发生了电压暂降,其理想数学模型如式(9)所示,在 0.2~0.3 s 之间发生电压中断,其理想数学模型如式(10)所示。对单一分量电能质量扰动直接进行 Hilbert 变换,波形如图 3、图 4 所示。其扰动发生的起止时刻(起始时刻  $t_1$ 、终止时刻  $t_2$ )如表 1 所示。

$$u(t) = 220 \times \sqrt{2} \times (1 - 0.37 \times (\varepsilon(t - 0.15) - \varepsilon(t - 0.25))) \times \cos \omega t; \quad (9)$$

$$u(t) = 220 \times \sqrt{2} \times (1 - 0.98 \times (\varepsilon(t - 0.2) - \varepsilon(t - 0.3))) \times \cos \omega t. \quad (10)$$

表 1 单一分量信号的检测误差分析

Table 1 Detection error analysis of single component signal

扰动类型	理论值			测量值		
	$t_1/s$	$t_2/s$	$U/V$	$t_1/s$	$t_2/s$	$U/V$
电压暂降	0.150	0.250	190.0	0.149	0.251	195.8
电压中断	0.200	0.300		0.199	0.300	

#### 3.1.2 复杂分量电能质量扰动

对于复杂分量的电能质量扰动,采用本文提

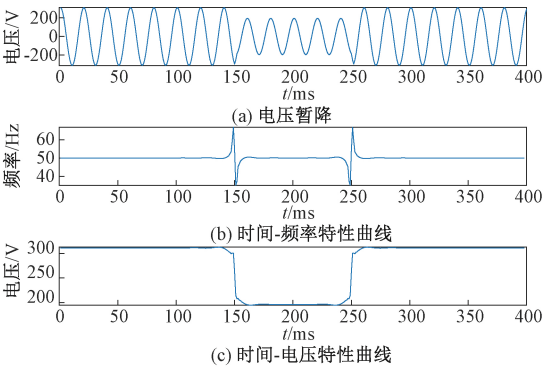


图 3 电压暂降 Hilbert 变换

Figure 3 Voltage sag Hilbert transformation

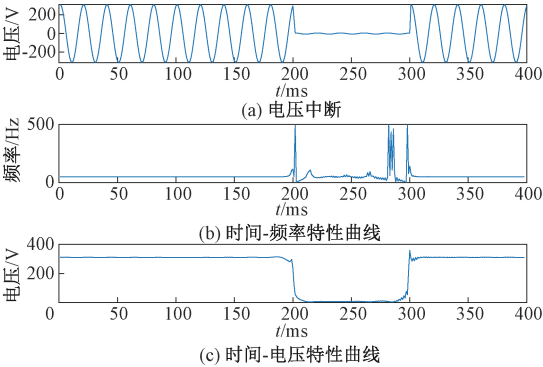


图 4 电压中断 Hilbert 变换

Figure 4 Voltage interruption Hilbert transformation

出的能量收敛因子与 PSO 优化的 VMD-HT 进行检测,例如暂态振荡,其数学模型如下:

$$x(t) = 220 \times \sqrt{2} \times (\cos \omega t + 0.7e^{-25(t-0.12)} \times (\varepsilon(t-0.08) - \varepsilon(t-0.17)) \cos 3\omega t)。(11)$$

首先对暂态振荡扰动信号的分解模态个数  $k$  值进行确定,根据能量收敛因子的步骤计算出不同模态下  $E_m$  的取值结果。当  $m=1、2、3$ ,分别对应的  $E_m$  取值为 1、0.028 3、0.019 1。相邻模态的差值  $\Delta_{12}=0.971\ 7,\Delta_{23}=0.009\ 2<\eta$ ,因此分解模态个数  $k$  值取 2。

然后通过 PSO 算法对  $\alpha$  取最优值,PSO 参数种群个体数目  $N$ ,学习因子  $C1、C2$ ,最大迭代次数  $M$ ,惯性权重最大值和最小值  $w_{\max}、w_{\min}$ ,随机权重方差  $rande$ ,其初始值设定如表 2。

表 2 PSO 算法参数的初始值

Table 2 PSO algorithm parameter initialization						
$N$	$C1$	$C2$	$M$	$rande$	$w_{\max}$	$w_{\min}$
200	2	2	50	0.1	0.8	0.4

如图 5 所示,当迭代到第 6 代时,适应度函数趋于稳定并取到最小值,即包络熵最小,此时  $\alpha=565$  即原始信号经 VMD 算法分解效果最佳。

将暂态振荡扰动运用本文提出的改进 VMD-HT 电能质量检测方法进行仿真,其波形如图 6、图 7 所示。

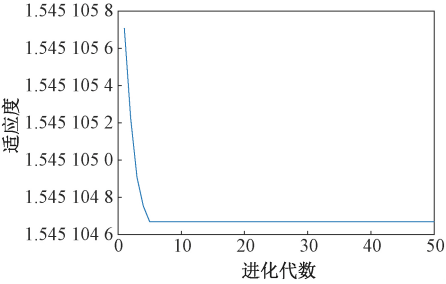


图 5 暂态振荡适应度值随迭代变化图

Figure 5 Transient oscillation fitness value iterative change graph

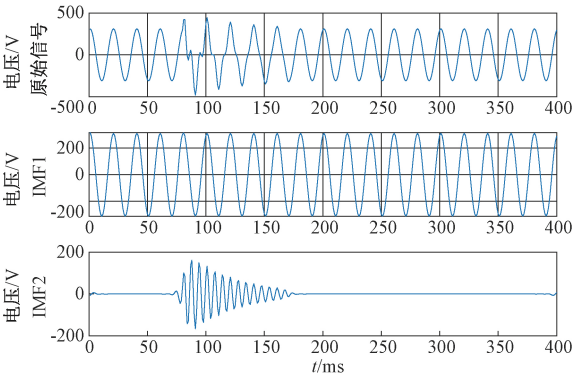


图 6 暂态振荡 VMD 分解图

Figure 6 VMD exploded graph of transient oscillation

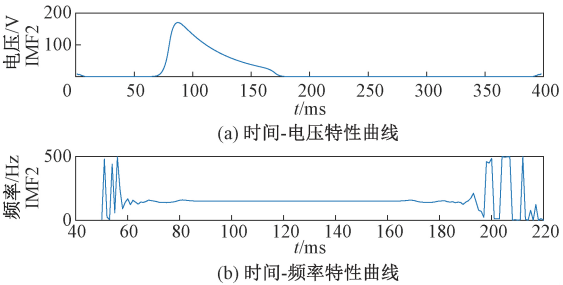


图 7 暂态振荡 VMD 分解的模态分量 Hilbert 变换

Figure 7 Hilbert transform of modal component of transient oscillation VMD decomposition

然后再将理想的暂态振荡扰动信号进行 HHT 变换,对其起止时刻进行检测分析如图 8、图 9 所示。通过分析两种不同算法的波形将其定位扰动发生的起止时刻进行对比,同时与加入 20 dB 白噪声的暂态振荡信号检测结果进行对比见表 3。由表 3 可知,改进的 VMD-HT 算法在理想环境下检测扰动发生起始时刻的误差和终止时刻的误差均较 HHT 减少了 0.001 s,在含有 20 dB 白噪声环境下检测扰动发生的起始时刻的误差和终止时刻的误差较 HHT 算法分别减少了 0.007 s 和 0.006 s。



实验表明,改进的 VMD-HT 具有很好的抗干扰性。通过对暂态振荡模型的起止时刻进行随机改变,并采用本文改进的 VMD-HT 进行检测,其测试值和理论值误差小于 0.003 s 的概率达 99.84%,表明本文改进的 VMD-HT 方法具有较高的容错性。本文所提的改进 VMD-HT 算法较 HHT 具有更好的检测精度、抗干扰性和容错能力,同时其运行时间也略有增加,但相差不大。通过综合分析可知,改进的 VMD-HT 对暂态振荡的检测效果更好。

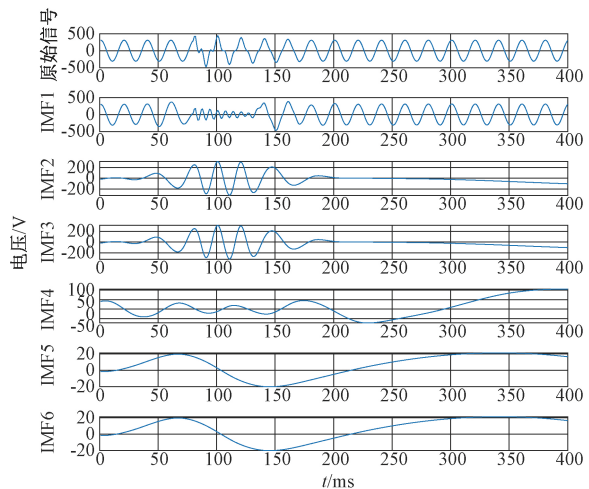


图 8 暂态振荡 EMD 分解图

Figure 8 EMD exploded graph of transient oscillation

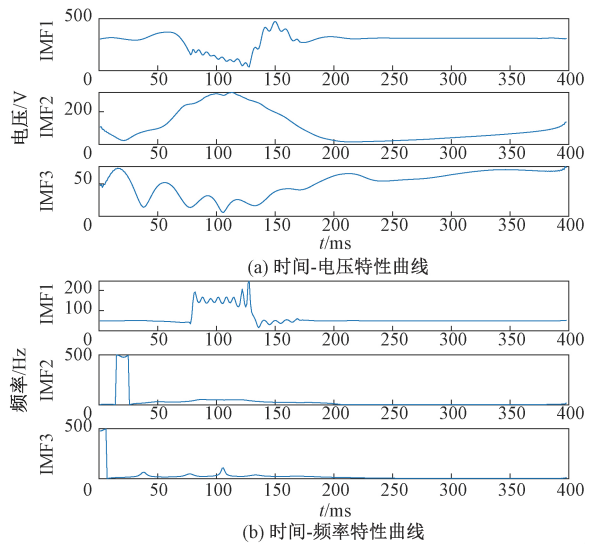


图 9 暂态振荡 HHT 变换

Figure 9 Transient oscillation HHT transformation

表 3 暂态振荡的扰动发生时间

Table 3 Time of disturbance of transient oscillation s

检测结果	$t_1$		$t_2$	
	VMD-HT	HHT	VMD-HT	HHT
理论值	0.080	0.080	0.170	0.170
测试值	0.081	0.078	0.169	0.168
测试值(20 dB)	0.082	0.071	0.168	0.178

3.2 复合电能质量扰动

在电网中可能存在谐波+暂降的复合扰动信号。现设一突变谐波+暂降的信号,信号基波频率为 50 Hz,在 0.23~0.34 s 时发生谐波突变,同时在 0.12~0.17 s 时发生暂降+谐波突变,其信号表达式为:

$$u(t)=220\times\sqrt{2}\times\cos\omega t+220\times\sqrt{2}\times(\varepsilon(t-0.23)-\varepsilon(t-0.34))\times\cos5\omega t-140\times\sqrt{2}\times(\varepsilon(t-0.12)-\varepsilon(t-0.17))\times\cos3\omega t。(12)$$

首先对谐波+暂降的扰动信号的分解模态个数  $k$  值进行确定,根据能量收敛因子的步骤计算出不同模态下  $E_m$  的取值。当  $m=1,2,3,4$  时,其分别对应的  $E_m$  取值为 1、0.262 9、0.195 4、0.179 2,相邻模态的差值  $\Delta_{12}=0.737\ 1,\Delta_{23}=0.067\ 5,\Delta_{34}=0.016\ 2<\eta$ ,因此分解模态个数  $k$  值取 3。

图 10 所示为 PSO 优化算法的适应度值函数迭代变化图。当迭代到 10 代,  $\alpha$  的取值 129 时,适应度函数值最小,即原始信号经 VMD 算法分解效果最佳。

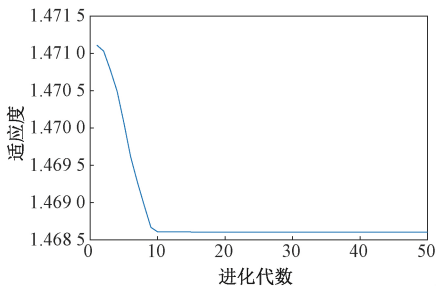


图 10 谐波+暂降适应度值随迭代变化图

Figure 10 Harmonic and sag fitness value iteration change graph

将谐波+暂降的复合扰动信号运用本文改进的 VMD-HT 电能质量扰动检测分析方法进行仿真,得到波形如图 11、图 12 所示。

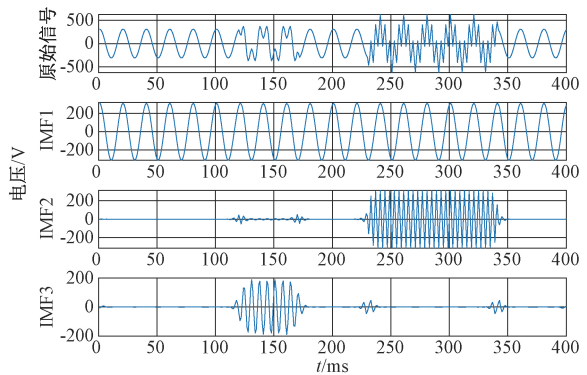


图 11 谐波+暂降 VMD 分解图

Figure 11 VMD exploded graph of harmonics and sag

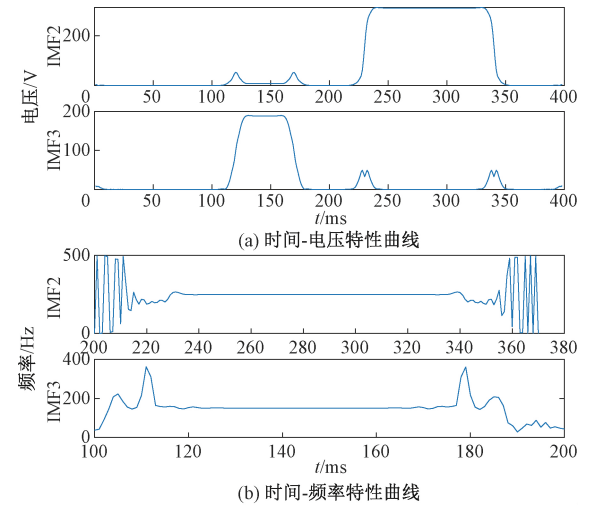


图 12 谐波+暂降 VMD 分解的模式分量 Hilbert 变换  
Figure 12 Hilbert transform of modal component of Harmonics and sag VMD decomposition

谐波+暂降的扰动信号 HHT 变换波形如图 13、图 14 所示。将其定位扰动的起止时刻与改进的 VMD-HT 检测结果进行比较,同时与加入 20 dB 白噪声的谐波和暂降复合扰动检测结果进行对比,如表 4 所示。由表 4 可知,采用本文改进的 VMD-HT 算法在理想环境下较 HHT 而言,谐波检测起止时刻的误差分别减小了 0.003 s 和 0.001 s,暂降起止时刻的检测误差均减小了 0.002 s;在含有 20 dB 白噪声的环境下,谐波检测的误差分别减小了 0.002 s 和 0.007 s,暂降检测误差分别减小了 0.005 s 和 0.004 s。实验表明,本文提出的改进 VMD-HT 具有更好的抗干扰性。通过对谐波+暂降的复合扰动模型的起止时刻进行随机改变,并采用本文改进的 VMD-HT 进行检测,扰动起止时刻的测试值与理论值的误差在 0.003 s 以内的概率为 99.55%,表明本文改进的

VMD-HT 方法具有较高的容错性。本文所提改进的 VMD-HT 算法较 HHT 检测的精度、抗干扰能力和容错性更高,同样其运行时间也略有增加,但相差不大。通过综合分析,本文所提的改进 VMD-HT 检测效果更好。

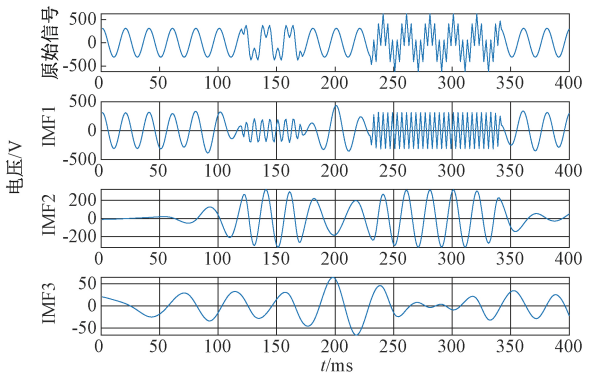


图 13 谐波+暂降 EMD 分解图  
Figure 13 EMD exploded graph of Harmonics and sag

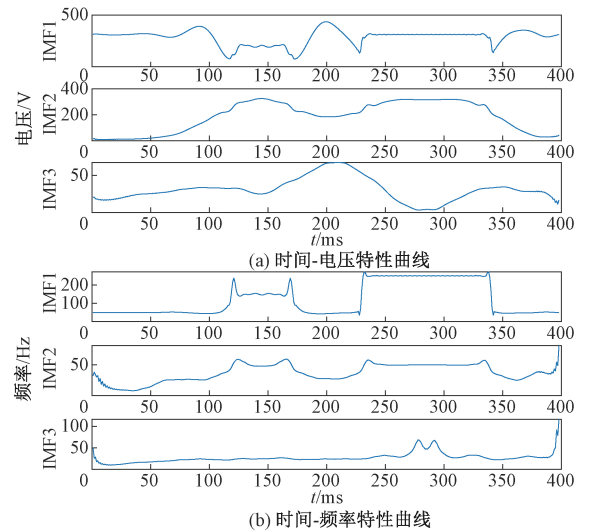


图 14 谐波+暂降 HHT 变换  
Figure 14 Harmonics and sag HHT transformation

表 4 谐波+暂降的扰动发生时间对比

扰动类型	$t_1$				$t_2$			
	VMD-HT		HHT		VMD-HT		HHT	
	理论值	测试值	理论值	测试值	理论值	测试值	理论值	测试值
谐波	0.230	0.230	0.230	0.233	0.340	0.339	0.340	0.338
暂降	0.120	0.121	0.120	0.123	0.170	0.169	0.170	0.167
谐波 (20 dB)	0.230	0.228	0.230	0.226	0.340	0.340	0.340	0.347
暂降 (20 dB)	0.120	0.119	0.120	0.114	0.170	0.169	0.170	0.175

4 结论

提出一种优化的 VMD-HT 电能质量扰动检测方法,主要是通过引入能量收敛因子和粒子群

优化算法寻优 VMD 参数  $k$  和惩罚因子  $\alpha$  的取值,使得 VMD 分解达到最优效果,然后通过 Hilbert 变换进行扰动发生起止时刻的检测。相比于传统依靠经验选取 VMD 参数的方法和缺少数学基础

的希尔伯特-黄变换对电能质量扰动的检测具有更好的检测效果。大量的对比实验表明,其暂态振荡检测误差在 0.003 s 内的概率达到了 99.84%。谐波和暂降组成的复合扰动检测等实验也均验证了本文提出的能量收敛因子与 PSO 优化的 VMD-HT 电能质量扰动检测方法具有可行性。较 HHT 检测算法而言,本文方法提高了电能质量扰动检测的准确性、抗干扰能力和容错性。

参考文献:

[1] 任祖华,王柏林.基于多分辨率 S 变换的电压闪变检测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1):27-31.

[2] 刘军,黄纯,江亚群,等.电能质量扰动分析中广义 S 变换算法的改进与实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3):35-41.

[3] 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.

[4] 王燕,李群湛,周福林.一种暂态电能质量扰动检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24):7121-7132,7426.

[5] 廖晓辉,赵肖健,梁恒娜.一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制,2017, 45(3):20-25.

[6] 胡雷,陈湘波,熊魁,等.基于改进 HHT 的电能质量扰动检测方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21):105-111.

[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.

[8] 罗亦泳,姚宜斌,黄城,等.基于改进 VMD 的变形特征提取与分析[J].武汉大学学报(信息科学版), 2020,45(4):612-619.

[9] 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.

[10] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE transactions on signal processing, 2014, 62(3):531-544.

[11] 郑小霞,陈广宁,任浩翰,等.基于改进 VMD 和深度置信网络的风机易损部件故障预警[J].振动与冲击,2019,38(8):153-160,179.

[12] 蒋丽英,卢晓东,王景霖,等.基于 PSO-VMD 的齿轮特征参数提取方法研究[J].制造技术与机床,2017(11):65-71.

[13] 龙志伟,肖松毅,王晖,等.基于粒子群算法的水资源需求预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(4):32-35,47.

[14] 刘宏波.基于改进 VMD-HT 的电力系统低频振荡模态辨识[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

Application of Improved VMD-HT in Power Quality Disturbance Detection

LIAO Xiaohui, CHEN Chuanchuan

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** To solve the problems of low power quality disturbance detection accuracy and weak anti-interference, a VMD-HT method based on energy convergence factor and PSO optimization was proposed in this paper. Firstly, the improved VMD method was used to adaptively select the optimal values of  $k$  and  $\alpha$ , and then the Hilbert transform was used to obtain the instantaneous amplitude-frequency simulation diagram of the IMF component after VMD decomposition, and to locate the start and end moments of the disturbance to realize the power quality disturbance detection. By adding white noise to simulate the actual power quality disturbance and randomly changing the start and end time of the power quality disturbance mathematical model, a large number of detection simulation experiments were conducted. The detection accuracy of the start and end moments of the transient oscillation disturbance signal in an environment containing 20 dB white noise, compares with the HHT, increased by 0.007 s and 0.006 s respectively, and the probability of its detection error within 0.003 s reaches 99.84%. The detection simulation results of composite power quality disturbances also showed that the improved VMD-HT method had better detection effect than the traditional HHT power quality disturbance detection method, and could avoid the problems of low detection accuracy, weak anti-interference and poor fault tolerance due to the phenomenon that EMD was prone to modal aliasing.

**Key words:** power quality disturbance; energy convergence factor; PSO; VMD-HT; HHT