

# 基于 LMD 法的电力系统暂态扰动检测技术研究

韩剑鹏, 鲁改凤, 曹文思

(华北水利水电大学 电力学院, 河南 郑州 450045)

**摘 要:** 为了实现电力系统暂态扰动信号的精确识别, 针对暂态扰动信号的非线性、不规则性和突变性特点, 采用局部均值分解(local mean decomposition, LMD)法检测电力系统暂态扰动; 并用 LMD 法分析了电压暂降、电压暂升、电压中断、振荡暂态、脉冲暂态、频率偏移、谐波加电压暂升信号以及某智能变电站采集的实际扰动信号等典型扰动; 同时与希尔伯特-黄变换(HHT)法的分析结果进行比较. 研究结果表明: 用 LMD 法检测电力系统的暂态扰动信号是有效的, 且在定位精度、运算速度方面比 HHT 法更具优越性.

**关键词:** LMD 法; 暂态扰动; 端点效应; 智能变电站; 电能质量检测; HHT

**中图分类号:** TM74 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.201509013

## 0 引言

随着国民经济的高速发展, 电力系统出现了大量的具有非线性、不平衡负荷、冲击性特征的应用设备<sup>[1-4]</sup>, 同时, 电力系统发生的各种故障、开关操作、负荷波动和雷击等原因, 都会引起电能的暂态扰动<sup>[5-7]</sup>, 这些扰动足以危及调速电动机、整流装置以及其他灵敏设备的安全运行. 因此, 对暂态扰动信号分析是电力系统故障诊断及暂态保护的基础和依据<sup>[7-8]</sup>.

目前, 检测电能质量暂态扰动的方法有傅里叶变换、小波变换、S 变换、希尔伯特-黄变换(HHT)等<sup>[9-11]</sup>. 传统的傅里叶变换由于全局变换特性, 不能处理非线性、非平稳的信号, 且在处理谐波时还存在频谱泄漏和栅栏现象等缺点; 小波变换不是真正的自适应变换, 采用小波理论必须构造分频严格、能量集中的小波基函数, 无法保证最优的分解效果; S 变换是对加窗傅里叶变换和连续小波变换思想的延伸或推广, 在 S 变换中, 窗函数是一个可随频率的变化而伸缩的高斯函数, S 变换受噪音的影响较大; HHT 算法易出现过包络、欠包络现象, 端点效应污染较大, 瞬时频率常出现难以解释的负值.

局部均值分解(LMD)法已成功应用于脑电信号的检测和机械故障诊断中<sup>[11-12]</sup>. 文献[13]

应用 LMD 法分析了电力系统中的谐波和间谐波扰动信号, 文献[14]分析了某些单一的暂态扰动信号, 但没有进一步分析暂态脉冲和频率偏移等暂态扰动及多扰动. 笔者把 LMD 法应用于电力系统暂态扰动信号的扰动时间、频率和幅值的检测, 通过仿真和实验对比分析, 能够精确定位扰动时刻、扰动幅值和扰动期间的频率, 且端点效应好、具有较快的运算速度, 并且其所求参数的精度高, 特别是求取的频率值始终是正值, 在稳态时几乎和理论值完全相等, 为电力系统暂态扰动信号检测提供了一种新的方法.

## 1 LMD 法

LMD 法的信号处理过程如下.

1) 对原始信号  $x(t)$  确定信号中的所有局部极值点  $n_i$ .

2) 计算任意两个相邻的局部极值点平均值  $m_i = \frac{1}{2}(n_i + n_{i+1})$  和幅值包络估计值  $a_i = \frac{1}{2}|n_i + n_{i+1}|$ , 用滑动平均法得到局部均值函数  $m_{11}(t)$  和幅值包络估计函数  $a_{11}(t)$ . 滑动平均处理计算公式为

$$y_s(i) = \frac{[y(i+n) + y(i+n-1) + \cdots + y(i-n)]}{2n+1} \quad (1)$$

收稿日期:2015-09-07; 修订日期:2015-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201101)

通信作者:鲁改凤(1963—), 女, 河南南阳人, 华北水利水电大学教授, 学士, 主要从事电气工程及其自动化的研究, E-mail:280624367@qq.com.

引用本文:韩剑鹏, 鲁改凤, 曹文思. 基于 LMD 法的电力系统暂态扰动检测技术研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1):29-33, 59.

式中:  $2n + 1$  为滑动宽度, 当  $i < n$  时, 应相应减小跨度, 以不超过序列端点为限.

3) 求得信号  $h_{11}(t)$ ,

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) . \tag{2}$$

4) 求得调频信号  $s_{11}(t)$ ,

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} . \tag{3}$$

判断  $s_{11}(t)$  是否为一个纯调频信号, 判断条件是对  $s_{11}(t)$  重复上述步骤, 得到  $s_{11}(t)$  的幅值包络估计函数  $a_{12}(t)$ , 若  $a_{12}(t) = 1$ , 则说明  $s_{11}(t)$  是一个纯调频信号, 否则  $s_{11}(t)$  不是纯调频信号, 需重复上述迭代过程, 直至  $s_{11}(t)$  为一个纯调频信号, 如下式所示:

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t); \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t); \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t). \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)}; \\ s_{12}(t) = \frac{h_{12}(t)}{a_{12}(t)}; \\ \vdots \\ s_{1n}(t) = \frac{h_{1n}(t)}{a_{1n}(t)}. \end{cases} \tag{5}$$

迭代终止的条件为:  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n}(t) = 1$ . 为避免过多分解次数, 设一个迭代终止阈值  $\Delta$ , 当  $1 - \Delta \leq a_{1n}(t) \leq 1 + \Delta$  时, 迭代终止;

5) 求得幅值包络信号  $a_1(t)$ , 即瞬时幅值函数:

$$a_1(t) = a_{11}(t) a_{12}(t), \cdots, a_{1n}(t) = \prod_{k=1}^n a_{1k}(t) . \tag{6}$$

6) 将得到的幅值包络信号  $a_1(t)$  与纯调频信号  $s_{1n}(t)$  做乘积, 得到原始信号  $x(t)$  的第一个乘积函数分量为

$$PF_1(t) = a_1(t) s_{1n}(t) . \tag{7}$$

该函数分量包含了原始信号中最高频率信号的所有瞬时幅值与瞬时频率, 其瞬时频率函数  $f_1(t)$  可由纯调频信号  $s_{1n}(t)$  求出, 即

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d[\arccos(s_{1n}(t))]}{dt} . \tag{8}$$

7) 原始信号  $x(t)$  分离出第一个乘积函数分量后得到剩余信号  $u_1(t)$ , 将  $u_1(t)$  作为新的原始信号重复以上步骤, 循环  $k$  次, 直到  $u_k(t)$  为单调函数为止, 计算过程为

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t); \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t); \\ \vdots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t). \end{cases} \tag{9}$$

原始信号可以由  $u_k(t)$  和所有乘积函数分量得到, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^k PF_i(t) + u_k(t) . \tag{10}$$

2 电能质量扰动数学模型

在理想情况下, 公用电网应当以恒定频率、正弦波形和标准电压为用户提供稳定可靠的电能服务. 在三相交流系统中, 还要求各相电压和电流的幅值大小相等、相位对称且互差  $120^\circ$ , 但是由于非线性负荷、冲击负荷、敏感设备使用、外来干扰和各种故障等因素的存在, 会引起电能的暂态扰动, 从而导致上述理想的电能状态不能在实际中存在.

暂态扰动主要包括电压暂升、电压暂降、电压中断、暂态振荡、暂态脉冲、频率偏移等. 以 IEEE 1159—2009 标准为基础, 将信号归一化处理后的暂态扰动信号数学模型如表 1 所示. 表 1 中的标准信号为正弦曲线, 其余为 6 种典型暂态扰动信号的数学模型, 其中  $\varepsilon(t)$  代表单位阶跃函数,  $t_1$  和  $t_2$  分别代表扰动信号的起始时间和终止时间,  $\alpha$  代表扰动幅度,  $\beta$  代表频率系数,  $c$  代表暂态振荡衰减系数. 下一节我们将采用 LMD 法分解这 6 类典型的扰动信号.

表 1 扰动信号模型

Tab. 1 Disturbance signal mode

| 扰动类型 | 数学模型及参数  |
|------|--|
| 标准信号 | $x(t) = \sin \omega t$ $\omega = 2\pi f, f = 50 \text{ Hz}$  |
| 电压暂升 | $x(t) =  1 + \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]  \sin \omega t$ $0.1 \leq \alpha \leq 0.8, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$   |
| 电压暂降 | $x(t) =  1 - \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]  \sin \omega t$ $0.1 \leq \alpha \leq 0.9, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$   |
| 电压中断 | $x(t) =  1 - \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]  \sin \omega t$ $0.9 \leq \alpha \leq 1.0, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$   |
| 暂态振荡 | $x(t) = \sin \omega t +$ $\alpha \cdot e^{-c(t-t_1)} \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)] \cdot \sin \beta \omega t$ $0.2 \leq \alpha \leq 0.8, 10 \leq c \leq 20$ $6 \leq \beta \leq 18, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$ |
| 暂态脉冲 | $x(t) = \sin \omega t + \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$ $1.0 \leq \alpha \leq 3.0, 0.05T \leq t_2 - t_1 \leq 0.15T$  |
| 频率偏移 | $x(t) = \sin \omega_s t + \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$ $\omega_s = 2\pi f_s, f_s \text{ 为偏移频率}$   |

3 暂态扰动信号的检测与分析

3.1 基于 LMD 法的暂态扰动信号检测

本算法采用符合智能变电站要求的频率 4 000 Hz,即每周波采样 80 点. 每组仿真数据均截取 960 个采样点进行分析. 对 6 种暂态扰动信号进行检测,生成扰动信号的数学模型如表 2 所示,其中  $T=0.02$ .

单一扰动信号经过 LMD 法分解,得到图 1 ~ 6 的计算结果,其中每组图分别为原始暂态扰动信号波形图、幅值函数曲线图和分解频率曲线图.

表 2 单一暂态扰动仿真信号模型  
Tab.2 Transient disturbance signal simulation model

| 扰动类型 | 数学模型   |
|------|--|
| 电压暂升 | $x(t)=\{1+0.45[\varepsilon(9.5T)-\varepsilon(4.5T)]\}\sin\omega t$   |
| 电压暂降 | $x(t)=\{1-0.55[\varepsilon(8.53T)-\varepsilon(4.01T)]\}\sin\omega t$   |
| 电压中断 | $x(t)=\{1-0.92[\varepsilon(7.0T)-\varepsilon(3.97T)]\}\sin\omega t$  |
| 暂态振荡 | $x(t)=\sin\omega t+0.8e^{-20(t-t_1)}[\varepsilon(7.25)-\varepsilon(6.25)]\cdot\sin(10\omega t)$                                    |
| 暂态脉冲 | $x(t)=\sin\omega t+1.7\times[\varepsilon(6.25T)-\varepsilon(6.12T)]$   |
| 频率偏移 | $x(t)=\begin{cases}\sin\omega t, & t<4T, \quad t>8T \\ \sin\omega_s t, & 4\leq t\leq 8T, \quad \omega_s=50.5\text{ Hz}\end{cases}$ |

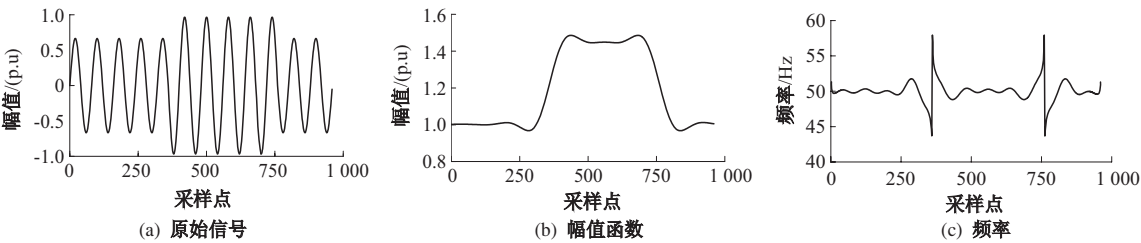


图 1 电压暂升信号检测对比分析图  
Fig.1 Voltage swell signal detection

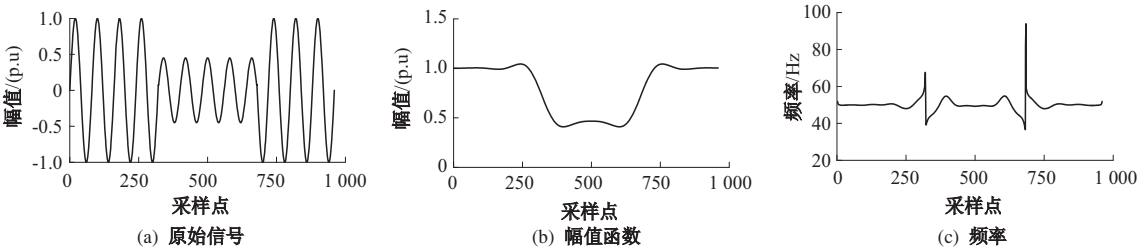


图 2 电压暂降信号检测对比分析图  
Fig.2 Voltage sag signal detection

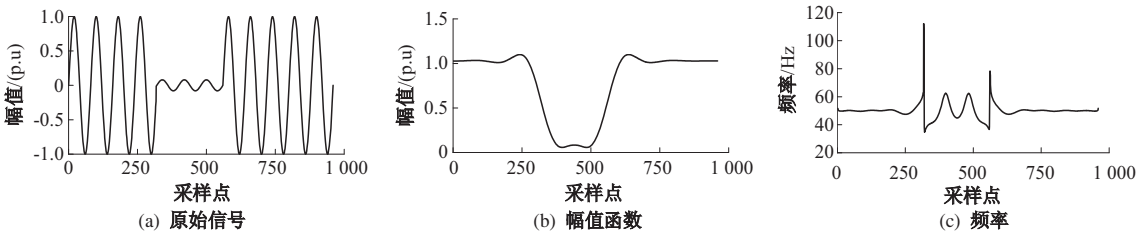


图 3 电压中断信号检测对比分析图  
Fig.3 Voltage interruption signal detection

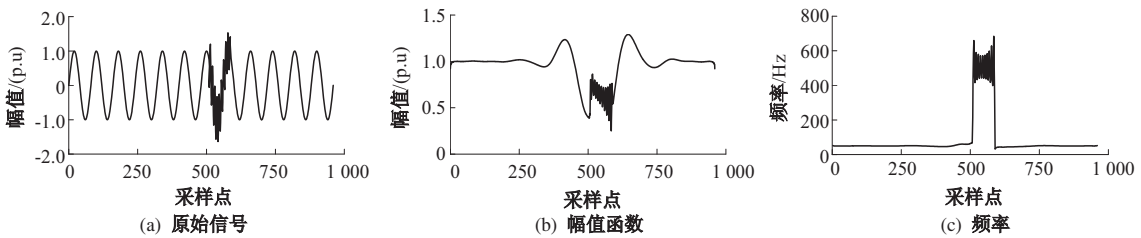


图 4 暂态振荡信号检测对比分析图  
Fig.4 Transient oscillation signal detection

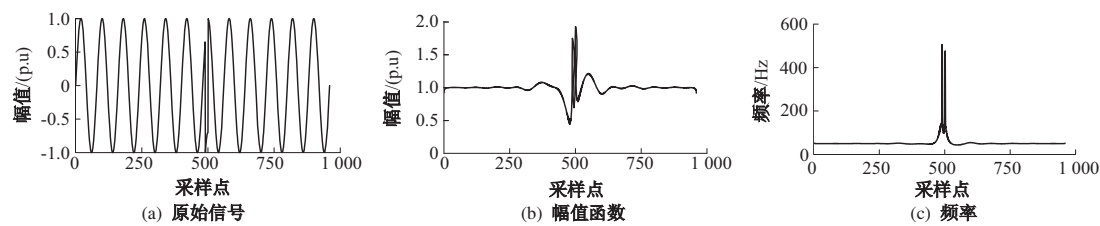


图 5 暂态脉冲信号检测对比分析图  
Fig.5 Transient pulses signal detection

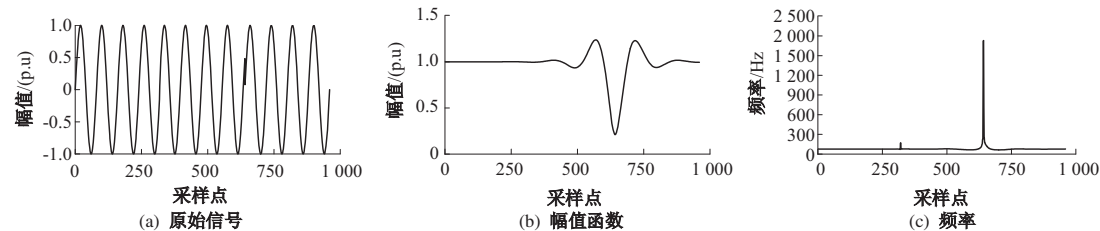


图 6 频率偏移信号检测对比分析图  
Fig.6 Frequency fluctuation signal detection

瞬时频率曲线中除端点外的两个最大值点为扰动起止时间. 分别对瞬时幅值曲线与瞬时频率曲线扰动时间内所有采样点对应值进行最小二乘拟合处理后,得到的稳态区间值即为检测结果中扰动幅值及频率值. 基于 LMD 法的暂态扰动检测结果汇总如表 3 所示.

3.2 LMD 和 HHT 法暂态扰动信号检测对比分析

以谐波加电压暂降扰动信号(式(11))为例,分别采用 LMD 法、HHT 法对扰动信号进行检测,可得瞬时幅值、频率曲线如图 7 所示.

$$x(t) = \{1 - 0.67[\varepsilon(9.66T) - \varepsilon(6.25T)]\} \cdot [\sin \omega t + 0.18\sin(3\omega t) + 0.11\sin(7\omega t)]. \quad (11)$$

表 3 基于 LMD 法的暂态扰动检测结果

Tab.3 Detection results Using LMD algorithm

| 扰动类型 | 扰动起始时间 |       |      | 扰动终止时间 |       |      | 扰动幅度  |       |      | 频率     |        |       |
|------|--------|-------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|--------|--------|-------|
|      | 理论值/s  | 测量值/s | 误差/% | 实际值/s  | 测量值/s | 误差/% | 实际值/% | 测量值/% | 误差/% | 实际值/Hz | 测量值/Hz | 误差/Hz |
| 暂升   | 0.090  | 0.090 | 0.00 | 0.190  | 0.191 | 0.53 | 0.45  | 0.449 | 0.22 | —      | —      | —     |
| 暂降   | 0.080  | 0.080 | 0.00 | 0.171  | 0.171 | 0.00 | 0.55  | 0.551 | 0.18 | —      | —      | —     |
| 中断   | 0.079  | 0.080 | 0.13 | 0.140  | 0.141 | 0.71 | 0.92  | 0.921 | 0.11 | —      | —      | —     |
| 振荡暂态 | 0.125  | 0.126 | 1.27 | 0.145  | 0.146 | 0.69 | 0.80  | 0.764 | 4.50 | 500.0  | 506.6  | 1.31  |
| 脉冲暂态 | 0.122  | 0.123 | 0.82 | 0.125  | 0.126 | 0.80 | 1.70  | 1.840 | 8.20 | —      | —      | —     |
| 频率偏移 | 0.080  | 0.080 | 0.00 | 0.160  | 0.160 | 0.00 | —     | —     | —    | 50.5   | 50.9   | 0.79  |

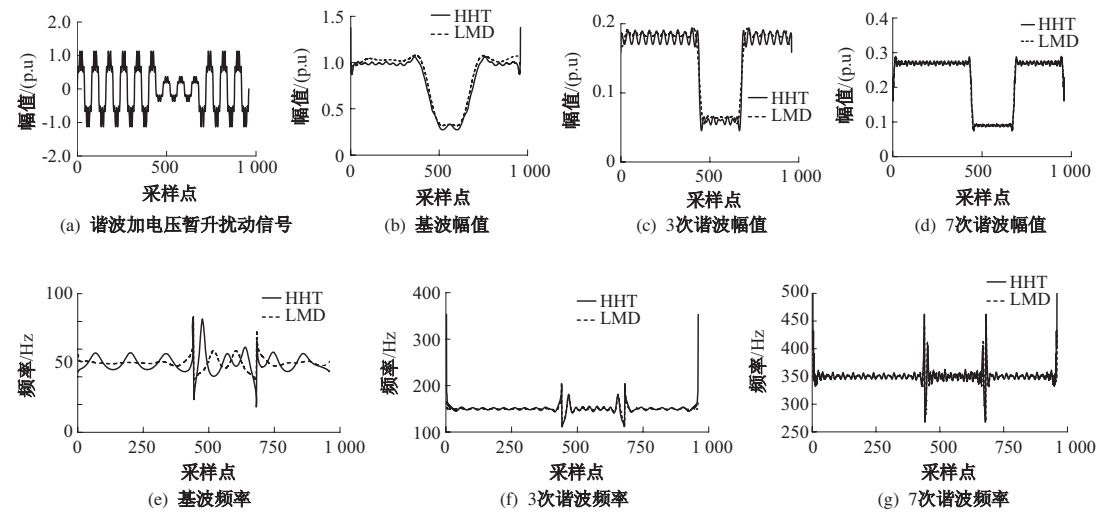


图 7 两种检测方法的谐波信号瞬时幅值、频率曲线图

Fig.7 Instantaneous amplitude and frequency curve using LMD algorithm and HHT algorithm

由图 7(b)~图 7(d)幅值函数可以发现,LMD 法的端点效果明显优于 HHT 法,在 0.11 s 扰动发生时刻,电压幅值为 0.825 5 p.u,在 0.19 s 扰动恢复时刻,电压幅值为 0.825 5 p.u.从图 7(e)~图 7(g)可知,分析瞬时电压骤降信号时,HHT 法虽然可以根据频率突变点确定扰动发生时

刻,但 LMD 方法得到的瞬时扰动频率明显比 HHT 法更精确,而且整个数据序列受端点效应的影响更小.

4 实验验证

笔者对某智能变电站采集的实测数据进行检测与识别处理后得到的分析结果如图 8 所示.

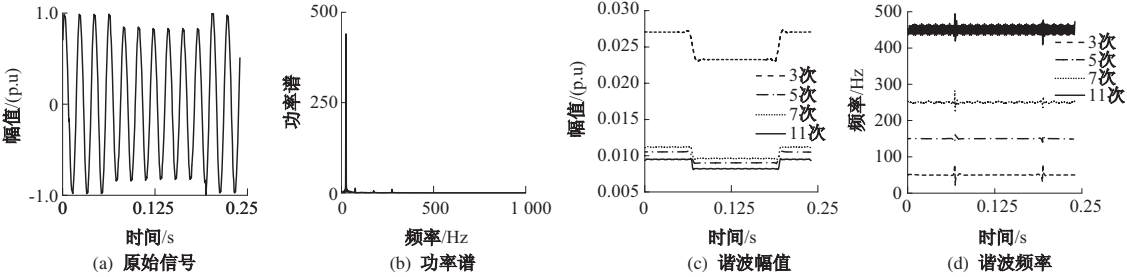


图 8 实测数据分析结果  
Fig. 8 Detection results of actual data

从检测结果可知,电压信号中所含扰动类型为谐波加电压暂降,其中归一化后得到的电压暂降幅度为 0.141 9 p.u,起止时间分别为 0.068 s 和 0.194 s,各次谐波含有率如表 4 所示.

表 4 实测数据中谐波含量  
Tab.4 Harmonic content of measured data

| 谐波电压次数 | 各次谐波电压<br>含有率/% | 总谐波电压<br>畸变率/% |
|--------|-----------------|----------------|
| 3 次    | 2.67            | 3.22           |
| 5 次    | 1.05            |                |
| 7 次    | 1.12            |                |
| 11 次   | 0.95            |                |

5 结论

根据 LMD 法获得的瞬时幅值函数可以精确定位扰动时刻、扰动幅值和扰动期间的频率,分析的效果优于 HHT 法;LMD 法的端点效应明显比 HHT 法好,“筛分”次数较少,向内污染数据的程度较轻,所求的参数在稳态时基本不变化,不需要进行数据拟合,而且所求参数的精度高,特别是求取的频率值始终是正值,在稳态时几乎和理论值完全相等;LMD 法不需积分运算,具有较快的运算速度.

参考文献:

[1] 张瑞金,汪爱娟. 基于改进的小波核主元分析故障检测[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(1):97-100.  
[2] 廖晓辉,梁恒娜,丁倩. 基于小波变换的电力电缆故障测距研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2013,34(3):6-9.  
[3] 赵凤展,杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降

扰动检测[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):28-34,109.  
[4] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(10):1-6.  
[5] 占勇,程浩忠,丁屹峰. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):51-56.  
[6] 李天云,赵妍,李楠. 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.  
[7] BOLLEN M. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances[J]. IEEE Transactions on power delivery,2000,15(4):1279-1284.  
[8] JOSE M, HARLEY R, HABELTER G. Sensorless speed measurement of AC machines using analytic wavelet transform[J]. IEEE Transactions on industry applications, 2001,38(5):40-46.  
[9] 周林,吴红春,孟婧,等. 电压暂降分析方法研究[J]. 高压技术,2008,34(5):1010-1016.  
[10] PARK C, LOONEY D, HULLE V. The complex local mean decomposition[J]. Neurocomputing, 2011,74(6):867-875.  
[11] 程军圣,张亢,杨宇. 局部均值分解方法在调制信号处理中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(4):362-367.  
[12] 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.  
[13] 黄传金,曹文思. 局部均值分解在电力系统间谐波和谐波失真信号检测中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):68-81.  
[14] 宋海军,黄传金. 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.