

基于 HHT 的电力系统暂态复合扰动信号的提取分析与研究

杨存祥, 仝战营, 万钰昊, 庞小波

(郑州轻工业学院电气信息工程学院河南省信息化电器重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对电力系统非线性和非平稳性暂态复合扰动信号的提取要求, 采用经验模态分解(EMD)从信号的时间尺度特征出发对信号进行分解, 实现了信号自适应的频带划分, 在此基础上进行 Hilbert 变换, 分离出了各扰动信号的时间、频率和幅值特征, 仿真结果表明该方法对电力系统非平稳的扰动信号具有较好的分析效果。

关键词: HHT; 暂态复合扰动信号; 非平稳性; EMD; Hilbert 变换

Analysis and research of the transient composite disturbance signal of power system based on HHT

YANG Cun-xiang, TONG Zhan-ying, WAN Yu-hao, PANG Xiao-bo

(Institute of Electrical and Information Engineering, Key Lab of Information-based Electrical Appliances of Henan Province, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: For the extraction requirements of non-linear and non-stationary nature of the transient composite disturbance signal of the power system, EMD method is applied to decompose these signals from the time scale of its characteristics to realize adaptive signal of the band. And then the characteristics of time, frequency and amplitude of each disturbance signal are extracted on the basis of a Hilbert transformation. Simulation results show that the method has a better analysis result to non-stationary power system disturbance signals.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60773122) and Science Foundation of Youth of Henan Province(No.074100510004).

Key words: HHT(Hilbert Huang Transform); transient composite disturbance signal; non-stationary nature; EMD (empirical mode decomposition); Hilbert transform

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0006-04

0 引言

暂态信号分析是电力系统故障诊断及暂态保护的基础和依据^[1]。电力系统涉及的各种暂态信号大多属于非平稳信号, 并且由于负载的复杂多样性和随机性, 以及外部干扰等因素, 这些非平稳的暂态信号往往交织叠加形成复合扰动信号作用于正常的电力信号, 对这种暂态复合扰动信号进行分析成为研究动态电能质量的一个重要方面。

传统的 Fourier 变换由于其全局变换特性, 无法反映这些信号的时变特征, 也就不能准确地描述和提取出所需的信息, 不适合用于分析这类非平稳的暂态信号, 需要用在时域和频域都有较高分辨率的时变信号分析方法来提取相关信息。

近年来研究和应用较多的小波变换理论, 能够在时域和频域内同时得到较高的分辨率, 但其本质上是一种窗口可调的傅立叶变换, 小波变换的基函数是预先确定的, 分解的效果取决于基函数的选择, 仍未根本摆脱 Fourier 变换的局限性, 所以不能保证最优的分解效果。

本文采用希尔伯特-黄变换(HHT-Hilbert Huang Transform)对电力信号进行分析, 通过对采集的信号进行 EMD 分解及 Hilbert 变换求取瞬时频率和幅值实现了电力系统中谐波和其他暂态信号的提取和区分; 它依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解, 无须预先设定任何基函数。这一点与建立在先验性的谐波基函数和小波基函数上的傅里叶分解与小波分解方法具有本质性的区别。正是由于这样的特点, EMD 方法在理论上可以应用于任何类型的信号的分解, 因而在处理非平稳及非线性数据上^[2,3], 具有非常明显的优势。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60773122); 河南省青年自然科学基金(No. 074100510004)

1 HHT 方法原理

1.1 经验模态分解

经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition) 是 1998 年由 Huang 提出来的一种新的信号处理方法, 该方法认为任何复杂的时间信号 $x(t)$ 都是由一些相互不同的、简单的、并非正弦函数的固有模态函数 IMF (Intrinsic Mode Function) 组成。基于此可从复杂的时间信号直接分解成从高频到低频的若干阶固有模态函数, 即基本时间信号。一个固有模态函数必须满足以下两个条件^[4,5]:

1) 在整个数据长度中, 极值点和过零点的数目必须相等或至多相差一个;

2) 在任意数据点, 局部极大值的包络和局部极小值的包络的均值必须为零。具体的分解过程如下^[3-5]:

(1) 找出信号 $x(t)$ 所有的极大值点并将其用三次样条函数插值成为原数据序列的上包络线 $v_1(t)$; 找出信号 $x(t)$ 所有的极小值点并将其用三次样条函数插值成为原数据序列的下包络线 $v_2(t)$, 并求出其上包络线和下包络线的平均值:

$$m_1(t) = \frac{1}{2} [v_1(t) + v_2(t)]$$

(2) 将原数据序列减去平均包络后即可得到一个去掉低频的新数据序列:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t)$$

判断 $h_1(t)$ 是否为 *imf*, 若不满足 *imf* 条件, 将 $h_1(t)$ 看作新的 $x(t)$, 重复上述处理过程, 直到 $h_1(t)$ 满足 *imf* 条件时, 记 $c_1(t) = h_1(t)$, 视为 *imf*₁^[7];

(3) 将 $r(t) = x(t) - h_1(t)$ 看作新的 $x(t)$, 重复以上(1)和(2)步骤, 即可依次得到 *imf*₂, *imf*₃, ..., 直到 $c_n(t)$ 或 $r(t)$ 满足给定的终止条件时筛选结束;

最后, 原始的数据序列 $x(t)$ 即可由这些 *imf* 分量以及一个均值或趋势项 $r(t)$ 表示:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (1)$$

因此式(1)说明, 可以将信号 $x(t)$ 分解成频率从大到小也即变化由快到慢^[8]排列的 n 个 *imf* 分量与一个趋势项之和。由于每一个 *imf* 分量代表一个特征尺度的数据序列, 因此“筛”过程实际上将原始数据序列分解为各种不同特征波动序列的叠加。

1.2 Hilbert 变换

对 EMD 分解后的每一个 *imf* 分量进行 Hilbert 变换, 将 *imf* 视为函数 $X(t)$, 其 Hilbert 变换可以定义为函数 $X(t)$ 与 $1/\pi t$ 的卷积, 借用变量 τ , 其 Hilbert

变换 $Y(t)$ 表示为: $Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau$, 其反变

换为: $X(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Y(\tau)}{\tau-t} d\tau$, $X(t)$ 和 $Y(t)$ 形成一复共轭对, 其解析信号为:

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

式中: $a(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$, $\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)}$

$a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别表示解析信号 $Z(t)$ 的瞬时包络和相位, 因而, 经过 Hilbert 变换得到的解析信号 $Z(t)$ 强调了原始信号 $X(t)$ 的局部特性; 而其极坐标表达式进一步地表明了其局部特性, 即它表示幅值与相位随时间变化的三角函数对 $X(t)$ 的最佳局部拟合, 将瞬时频率定义为: $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}$ 。

2 基于 HHT 的实例仿真

在本文仿真分析中, 叠加两类不同特征的非平稳暂态信号合成为复合扰动信号作用于理想的电力信号, 通过 HHT 变换及算法的优化处理准确定位复合扰动信号的发生和恢复时刻、信号瞬时频率和幅值的时域变化特性, 并通过 HHT 分解变换的数据计算暂态扰动信号的幅频参数, 准确刻画各扰动信号的量化特征。

2.1 暂态谐波和电压凹陷复合扰动信号^[3]

复合扰动信号中暂态谐波信号设定为

$$S_1(t) = A_1 \sin 2\pi ft + \sum_{i=3,5,7} p_i(t) A_i \sin(2\pi m_i ft + \theta_i)$$

式中: $A_1=1$, $A_3=0.5$, $A_5=0.3$, $A_7=0.2$, $f=50$ Hz, $m_3=3$, $m_5=5$, $m_7=7$, $\theta_3=\pi/6$, $\theta_5=\pi/8$,

$\theta_7=\pi/7$ 。当 $0.02 \text{ s} \leq t \leq 0.16 \text{ s}$ 时, $P_1(t)=1$; 其他时刻 $P_1(t)=0$ 。电压凹陷信号 $S_2(t)$ 发生的时间为 $0.04 \sim 0.16 \text{ s}$, 凹陷幅值为 0.4 , $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 的复合信号 $S(t)$ 的波形如图 1(a) 所示, 对 $S(t)$ 进行 EMD 分解, 得到 *imf*₁、*imf*₂ 和 *imf*₃ 分量分别如图 1(b)、(c) 和 (d) 所示, 可以看出 *imf*₁ 分量提取出谐波中时频变化最快的高频部分, 而其幅值较小能量较低, 对其作 Hilbert 变换求出瞬时频率如图 1(e), 显示出复合信号 $S(t)$ 在给定时间区间上的瞬时频率变换特性。对其时频特性数据进行分析, 提取出频率突变的时刻为 0.0399 s 、 0.0787 s 和 0.1599 s , 准确提取了两类暂态扰动的发生和恢复时刻。进一步将各 *imf* 分量作 Hilbert 变换, 求出其各次谐波的幅值和频率, 其中谐波的幅值时间曲线如图 1(f) 所示, 对结果数据求平均得 $A_3=0.5003$, $A_5=0.2725$, $A_7=0.1975$; 各

次谐波频率均值为 $f_3=147.11$, $f_5=248.62$, $f_7=355.67$, 仿真和计算结果直观和准确地提取出了复合扰动信号中的谐波信息。

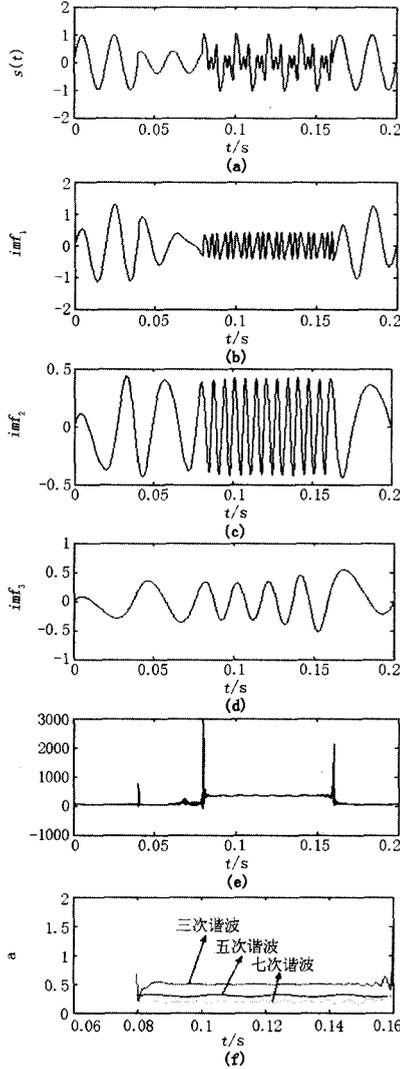


图1 暂态谐波和电压凹陷复合扰动信号的HHT时频分析

Fig.1 HHT time-frequency analysis of the composite disturbance signals on transient harmonic and voltage sag

2.2 短时谐波电压闪变与短时谐波失真复合扰动信号

复合扰动信号中短时谐波电压闪变信号设定为^[2]:

$$S_1(t) = A_1[1 + Mp_1(t)a(t)]\sin 2\pi ft$$

$a(t)$ 取为模拟电弧炉的调制信号, 表示为

$$a(t) = \sum_m \frac{1}{m} \cos m\Omega t$$

式中: $A_1=1$ V, $M=0.1$, $f=50$ Hz, $m=1,3$, $\Omega=6\pi$ rad/s,

$0.6\text{ s} \leq t \leq 2.4\text{ s}$ 时 $P_1(t)=1$,其他时刻 $P_1(t)=0$; 短时谐波信号:

$$S_2(t) = A_2 \sin 2\pi ft + p_2(t)A_i \sin(14\pi ft + \theta_i)$$

其中: $A_2=1$ V, $A_i=0.1$, $f=50$ Hz, $\theta_i=5\pi/7$, $0.9\text{ s} \leq t \leq 1.5\text{ s}$ 时 $p_2(t)=1$,其他时刻 $p_2(t)=0$ 。

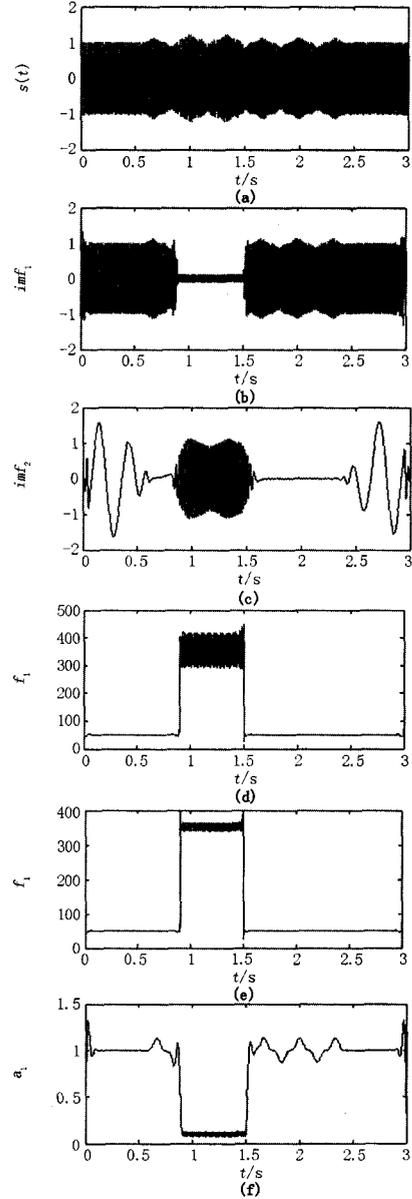


图2 短时谐波电压闪变与短时谐波失真复合扰动信号的HHT时频分析

Fig.2 HHT time-frequency analysis of short-term harmonic voltage flicker and harmonic distortion of short-term harmonic disturbance signals

电压闪变信号 $S_1(t)$ 和短时谐波信号 $S_2(t)$ 的复合信号 $S(t)$ 波形如图2(a)所示, 经EMD分解后的 imf_1

和 imf_2 分量分别如图 2(b)和 2(c)所示, imf_1 提取出高频分量, imf_2 提取出较低频率分量, 进一步对 imf_1 进行 Hilbert 变换求出其瞬时频率和幅值, 图 2(d) 显示为 imf_1 的瞬时频率, 由此可以准确地定位复合信号中谐波扰动的开始和终止时刻为 0.872 4 s 和 1.504 2 s, 在这两个时刻点瞬时频率有明显的突变, 同时为了准确提取出谐波频率, 进一步对图 2(d) 的 f_1 求取幅值包络的平均值波形如图 2(e)所示, 直至对谐波频率有准确的检测, 采用该方法可求得短时扰动的谐波频率为 349.61 Hz, 与理论值的相对误差为 0.11%。 imf_1 的幅值波形如图 2(f)所示, 可以看出经 HHT 分解变换后幅值波形曲线真实地反应了闪变信号 $S_1(t)$ 的包络值, 根据图中突变点位置可以检测出闪变的起始和终止时刻, 同时可以提取出复合扰动中的谐波幅值, 求得谐波幅值的平均值为 0.101 1, 与理论值 0.1 的相对误差为 1.10%, 准确有效地提取了复合扰动信号的电压闪变和短时谐波的时频和幅值信息。

3 结论

通过对基于 HHT 的仿真分析可以看出 HHT 对于突变的非线性、非平稳信号具有较好的检测效果, 通过 EMD 分解能够根据信号时频特性的变化快慢实现频率的自适应分解, 从复合信号中比较准确地检测定位突变信号的发生和终止时刻, 以及瞬时频率和幅值信息, 从而将其量化特征提取出来, 克服了傅立叶算法不能处理非平稳信号的缺点, 吸收了小波变换多分辨率的优势而克服了其选取小波基的困难, 能敏感反应信号的变化, 具有良好的时频特性。

参考文献

- [1] 黄诚惕. 希尔伯特-黄变换及其应用研究(硕士学位论文)[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
HUANG Cheng-xi. Study on Hilbert-huang Transform and Its Application, Thesis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 张立, 傅容珊. 基于 HHT 提取重力固体潮的地震前兆信息[J]. 地震学报, 2007.
ZHANG Li, FU Rong-shan. Extraction of Seismic Precursory Information from Gravity Tide at Kunming Station Based on HHT[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007.
- [3] 汤宝平, 钟佑明, 等. 基于 HHT 的非平稳信号分析仪的

研究[J]. 仪器仪表学报, 2007.

- TANG Bao-ping, ZHONG You-ming. Research on Non Stationary Signal Analyzer Based on HHT[J]. China Journal of Scientific Instrument, 2007.
- [4] 李天云, 赵妍, 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.
LI Tian-yun, ZHAO Yan. Application of Hilbert-huang Transform Method in Detection of Harmonic and Voltage Flicker[J]. Power System Technology, 2005.
- [5] 王波. 短时电能质量扰动检测与间谐波参数测量(硕士论文)[D]. 成都: 四川大学, 2006.
WANG Bo. The Detection of Short-time Power Quality and Measurement of Interharmonics Parameters, Thesis[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [6] 高磊, 唐晓博, 李天云. EMD 方法在提取电力系统低频振荡特性中的应用[J]. 华北电力技术, 2008.
GAO Lei, TANG Xiao-bo, LI Tian-yun. Application of EMD in Drawing Characteristic of Low Frequency Oscillation in Power System[J]. Power System Technology, 2008.
- [7] 戴桂平, 刘彬. 基于小波去噪和 EMD 的信号瞬时参数提取[J]. 计量学报, 2007.
DAI Gui-ping, LIU Bin. Instantaneous Parameters Extraction Based on Wavelet Denoising and EMD[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007.
- [8] 孙艳争, 黄炜, 等. 基于 EMD 的非线性信号自适应分析[J]. 电子科技大学学报, 2007.
SUN Yan-zheng, HUANG Wei, et al. Adaptive Analysis of Nonlinear Signal Base on EMD[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007.

收稿日期: 2008-07-08; 修回日期: 2008-07-31

作者简介:

杨存祥(1966-), 男, 教授, 硕士, 从事电气测量与故障诊断技术的教学与研究工作; E-mail: yangzha@126.com
全战营(1981-), 男, 硕士研究生, 从事电气设备故障诊断方法的研究。