

# A New Power Quality Disturbances Detection Algorithm Based on EMTDC/PSCAD and HHT

Yiqi PENG<sup>1</sup>, Jiaqiang WU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan, China

<sup>2</sup> Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou, China

Email: cindy87848536@163.com

**Abstract:** As the power quality disturbance is becoming increasingly serious in power system, the classification and identification for power quality disturbances has become a research hotspot recently. For correct identification of disturbance types and the purpose of providing accurate characteristic parameters for the process, we've proposed a method which is based on the HHT and PSCAD/EMTDC. HHT is able to extract instantaneous amplitude, frequency and disturbance duration of multiple power disturbances signals accurately, and has the advantage of few extracted parameter kinds and precise representation of disturbance features and degree of signals. We use the PSCAD/EMTDC to establish identification rules on the basis of the characteristics of each power disturbance, and to utilize the judgment and reasoning of the rules for the identification for power disturbance.

**Keywords:** EMTDC/PSCAD, HHT, power quality disturbance, Empirical mode decomposition(EMD)

## 基于 EMTDC/PSCAD 和 HHT 的电能扰动检测新算法

彭一琦<sup>1</sup>, 吴家强<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学电气工程学院, 武汉, 中国, 430072

<sup>2</sup> 广东电网公司广州供电局, 广州, 中国, 510620

Email: cindy87848536@163.com

**摘要:** 近年来电能扰动问题受到越来越普遍的关注, 成为研究热点。Hilbert-huang 变换(HHT)是基于瞬时频率概念提出的一种新的信号处理方法, 它基于经验模态分解法(EMD)能够分析含有多种信号分量的非平稳信号。利用 EMTDC/PSCAD 软件建立能够产生电能扰动信号的仿真模型, 再用 HHT 对仿真信号进行分析得出检测结果。仿真结果表明, 基于 EMTDC/PSCAD 和 HHT 的电能扰动检测算法能够检测动态和稳态电能扰动问题。

**关键词:** EMTDC/PSCAD, Hilbert-huang 变换, 电能扰动, 经验模态分解

### 1 引言

电能质量问题主要包括电力系统发生扰动及投切操作等所伴随的暂态现象, 诸如频率偏差, 电压偏差, 暂态振荡, 电压波动与闪变, 三相不平衡, 暂态或瞬态过电压, 波形畸变, 电压暂降与短时间中断等<sup>[1]</sup>。录取扰动时的信号波形, 继而提取信号波形的特征量, 并利用特征量进行扰动识别与定位是研究电能质量的一个方面。

电能质量问题主要的分析方法可以分为时域、频域和基于数学变换的分析方法三种, 在这三种方法中, 时域仿真方法在电能质量分析中的应用最为广泛, 目前使用较多的仿真软件有 EMTDC、NETOMAC 等系

统暂态仿真程序和 MATLAB、PSPICE、SABER 等电力电路仿真程序两大类。基于数学变换的分析方法有快速傅立叶变换 (FFT), 小波变换, HHT 变换, S 变换, 形态学等<sup>[2]</sup>。基于时频的信号分析方法有多种, Hilbert-huang 变换(HHT)是基于瞬时频率概念提出的一种新的信号处理方法, 它的前提是被分析信号须是单分量的, 而电力系统的扰动信号通常情况下是多分量的非平稳信号, 因此采取经验模态分解法(EMD)对原信号进行分解, 它不但能较准确的测出各分量的瞬时频率和瞬时幅值, 还能观测出扰动持续时间, 且具有良好的抗噪声能力, 完全符合用于电能扰动识别的扰动信号特征量的提取。

本文先介绍基于 EMD 分解的 Hilbert 变换的原理,接着介绍利用 HHT 检测电能扰动信号的方法,最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真建模验证本方法用于电能扰动检测的准确性。

## 2. 经验模态分解法(EMD)原理简介

HHT 的特点是将求解信号瞬时频率的过程分成两步,首先将信号通过 EMD 分解成若干 IMF 分量和一个残量,然后再对于每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,求瞬时频率<sup>[3]</sup>。IMF 是 Huang 提出的新概念,他认为:任何复杂信号都是由若干个固有单模态信号(即 IMF 分量)叠加组成,每个 IMF 分量必须满足两个条件:1) IMF 分量中极值点与过零点的个数相等或最多相差一个;2) IMF 分量的极大值包络线与极小值包络线必须关于时间轴局部对称。对于 IMF 的提取, Huang 提出一种基于经验模式的分解方法(EMD),通过 EMD 分解方法可以从任何信号中分解出若干 M 分量,信号可以表示为:

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

式中  $c_i(t)$  为第  $i$  个 IMF 分量,  $r(t)$  为残量。

EMD 方法假设任何信号都是由不同的固有模态函数(IMF)组成,每个 IMF 可以是线性的,也可以是非线性的,IMF 分量必须满足下面两个条件:一是在整个信号长度上,一个 IMF 分量的极值点个数和过零点个数相同或最多相差一个;二是在任意时刻,由极大值点定义的上包络线和由极小值点定义的下包络线的平均值为零,也就是说 IMF 的上下包络线对称于时间轴。对于给定的时间信号  $x(t)$ , Huang 介绍的获得其各个 IMF 分量的 EMD 方法如下<sup>[4]</sup>:

(1) 确定信号  $x(t)$  的所有局部极值点,然后用三次样条曲线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线,用三次样条曲线将所有的局部极小值点连接起来形成下包络线,这样两条包络曲线包络了所有的信号数据。

(2) 将两条包络线的均值记为  $m_i$ , 由下式求得:

$$y_i(t) = x(t) - m_i \quad (2)$$

(3) 判断  $y_i(t)$  是否满足成为 IMF 分量的两个条件,若  $y_i(t)$  不满足 IMF 条件,则将  $y_i(t)$  作为原始数据,重复步骤(1),(2),直到  $y_i(t)$  满足 IMF 条件,此时,记  $y_i(t) = c_i(t)$ , 则  $c_i(t)$  为信号  $x(t)$  的第一个 IMF 分量,它代表信号  $x(t)$  中的最高频率的分量。

(4) 将  $c_i(t)$  从  $x(t)$  中分离出来,得到一个去掉高频分量的差值信号  $r_i(t)$ , 即有

$$r_i(t) = x(t) - c_i(t) \quad (3)$$

将  $r_i(t)$  作为原始数据,重复步骤(1), (2)和(3),得到第二个 IMF 分量  $c_2(t)$ , 重复  $n$  次,得到  $n$  个 IMF 分量。这样就有:

$$\left. \begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - c_2(t) \\ \vdots \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - c_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当  $c_n(t)$  或  $r_n(t)$  满足给定的迭代终止条件(通常使  $r_n(t)$  成为一个单调函数,或分解信号的上下包络值足够小)时,迭代循环结束,由(2.15)式和(2.17)式可以得到:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

式中  $r_n(t)$  为残量,代表了信号中的平均趋势,而各 IMF 分量  $c_i(t)$  则分别代表了信号从高到低不同频率段的成分,每一频率段所包含的频率成分是不同的,同一 IMF 分量中,不同时刻处的瞬时频率也是不同的,这种不同频率成分的局部时间分布是随信号本身的变化而变化的。

Huang 所提出的 EMD 分解方法可以理解为一个尺度滤波的方法,通过 EMD 分解之后从原信号的上、下包络中提取的各个 IMF 分量将信号真实存在的不同尺度波动或趋势从高到低分解出来,反映了信号的特征尺度,代表了信号的内在模态特征。并且所得的每个 IMF 分量都可以通过 Hilbert 变换构造相应的解析信号,从而求得 IMF 分量的局部瞬时频率,具有良好的局部适应性。

## 3. Hilbert 变换的方法和理论基础

Hilbert 变换是信号分析中的重要工具,对于给定的连续时间信号  $x(t)$ , 其 Hilbert 变换  $\tilde{x}(t)$  定义为<sup>[5]</sup>:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -\frac{x(t - \tau)}{\tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (6)$$

$x(t)$  与  $1/(\pi t)$  的卷积说明可以将 Hilbert 变换看成是  $x(t)$  通过一个线性时不变的系统输出,该系统的单位脉冲响应  $h(t) = 1/(\pi t)$ 。以  $x(t)$  为实部,  $\tilde{x}(t)$  为虚部,构成一个解析信号  $z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t)$ , 显然  $x(t)$  的包络  $A(t)$  的幅值函数可以表示为:

$$|A(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (7)$$

相位函数  $\varphi(t)$  表示为:

$$\varphi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \quad (8)$$

由 Fourier 变换的理论可知  $jh(t) = 1/(\pi t)$  的 Fourier 变换是符号函数  $\text{sgn}(w)$ , 因此 Hilbert 变换的频率响应为<sup>[6]</sup>:

$$H(jw) = -j \text{sgn}(w) = \begin{cases} -j & w > 0 \\ j & w < 0 \end{cases} \quad (9)$$

若记  $H(jw) = |H(jw)| \cdot e^{j\varphi(w)}$ , 那么幅、相频特性分别记为:

$$|H(jw)| = 1 \quad (10)$$

$$\varphi(w) = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} & \omega > 0 \\ \frac{\pi}{2} & \omega < 0 \end{cases} \quad (11)$$

上式说明 Hilbert 变换可以看成是幅频特性为 1 的全通滤波器, 信号  $x(t)$  通过 Hilbert 变换后, 幅值不变, 其负频率做  $+90^\circ$  的相移, 因此 Hilbert 变换又称为  $90^\circ$  相移滤波或垂直滤波。

求解瞬时频率的一个关键条件就是要用时间信号构成一个复信号, 复信号的实部是原信号函数, 复信号的虚部正是信号的 Hilbert 变换, 因此对于一个满足条件的单分量信号, 只要求其的 Hilbert 变换, 构成复信号, 然后根据瞬时频率定义, 便可求得信号在任一时刻处的瞬时频率<sup>[7]</sup>。下面简单介绍一下 Hilbert 变换的数值求解算法。

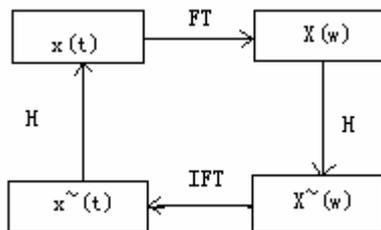


Figure 1.HHT numerical solution process

图 1. Hilbert 变换数值求解流程

一个时间信号的 Hilbert 变换仍然是时域信号, 在数值计算中要借助 Fourier 变换来实现, 如图 1 所示。图中  $FT$ 、 $IFT$  和  $H$  分别表示傅立叶变换、傅立叶

逆变换和 Hilbert 变换。根据前述  $\tilde{X}(w) = X(w) \cdot H(w)$  即输出  $x(t)$  的频域函数的频域函数  $\tilde{X}(w)$  为输入  $x(t)$  的频域函数  $X(w)$  与系统频率响应函数的乘积, 求出  $\tilde{X}(w)$  再经傅立叶逆变换求出 Hilbert 变换  $\tilde{x}(t)$ , 具体步骤如下:

1. 将待分析信号  $x(t)$  通过傅立叶变换得到它的频域函数  $X(w)$ 。
2. 将正频率相移  $-\pi/2$ , 负频率相移  $\pi/2$ , 得到经过相移的频域函数  $\tilde{X}(w)$ 。
3. 经过傅立叶逆变换得到时域信号  $\tilde{x}(t)$ , 它是信号  $x(t)$  的 Hilbert 变换。

设信号  $c_i(t)$  为一单分量信号, 对其做 Hilbert 变换, 求得对应的  $\tilde{c}_i(t)$ , 将  $c_i(t)$  和  $\tilde{c}_i(t)$  共同组合为一解析信号  $z_i(t)$  [8]。

$$z_i(t) = c_i(t) + j\tilde{c}_i(t) = A_i(t)e^{j\varphi_i(t)} \quad (12)$$

这里

$$A_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \tilde{c}_i^2(t)} \quad (13)$$

$$\varphi_i(t) = \arctan \left[ \frac{\tilde{c}_i(t)}{c_i(t)} \right] \quad (14)$$

此解析信号的极坐标形式反映了 Hilbert 变换的物理含义<sup>[9]</sup>: 它是通过一正弦曲线的频率和幅值调制获得信号局部的最佳逼近。根据瞬时频率的定义, 我们可以求得  $c_i(t)$  分量的瞬时频率<sup>[10]</sup>:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \omega_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \quad (15)$$

则通过 Hilbert 变换可以求得单分量信号  $c_i(t)$  的瞬时频率  $f_i(t)$ , 瞬时幅值  $A_i(t)$ , 实现了对单分量信号  $c_i(t)$  的频率特征和幅值特征的提取。

#### 4. 基于 PSCAD/EMTDC 的仿真实验验证

采用 PSCAD/EMTDC 软件仿真<sup>[11]</sup>, 设两侧电源为 M、N, 中性点接地。电源的相电压为 200kV, 两侧电源相位相差 20 度。总线路分为 Tline1 和 Tline2 两段, 每段 100km。假定在 Tline1 末端处发生单相接地故障, 接地电阻为 100 欧姆, 故障开始时间为 1s (此时仿真系统达到稳定), 持续时间 1s。并将系统的系统频率调为 50.56Hz, 则录取系统一项的电压波形, 系统存在扰动类型有频率波动和电压暂降。

系统仿真图形如图 2 所示:

取出系统仿真的电压信号波形，在 MATLAB 中利用 HHT 变换<sup>[12]</sup>，得出信号基波分量的固有模态分量如图 3a 所示：

信号基波分量的频率曲线图如图 3b 所示，幅值曲线如图 3c 所示：

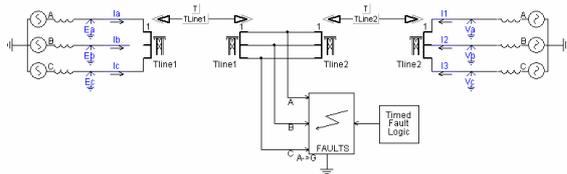


Figure 2. Simulation figure of system containing frequency fluctuation and voltage sag  
图 2. 含有频率波动和电压暂降的系统仿真图

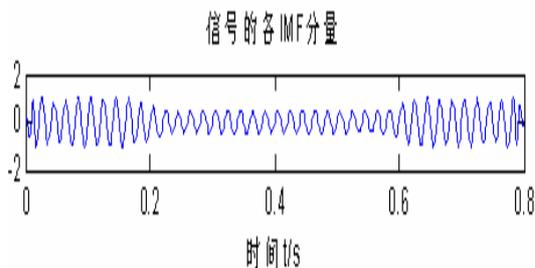


Figure 3a. Intrinsic mode component of signal fundamental component  
图 3a. 信号基波分量的固有模态分量

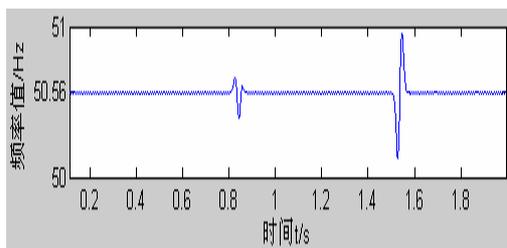


Figure 3b. Frequency curve of signal fundamental component  
图 3b. 信号基波分量的频率曲线图

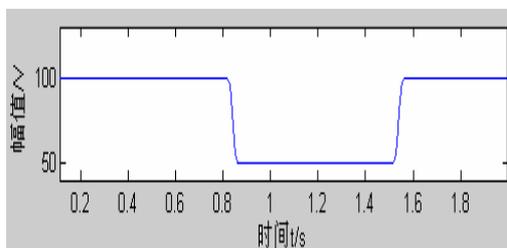


Figure 3c. Amplitude curve of signal fundamental component  
图 3c. 信号基波分量的幅值曲线图

由图 3b 和图 3c 所示，HHT 变换能准确测取由 PSCAD/EMTDC 仿真出的电能扰动信号的幅值和频率，并且能正确测取当发生电压暂降时的动态电能质量事件的频率和幅值。

### 5. 结论

本文先用 PSCAD/EMTDC 软件仿真出简单的电力系统，并设置故障产生相应的电能扰动信号，录取电能扰动信号的波形数据，在 MATLAB 中 HHT 变换对其进行分解和提取，最终得出信号的基波频率曲线和幅值曲线，通过仿真验证基于 EMTDC/PSCAD 和 HHT 的电能扰动检测算法能够检测出含有诸如频率波动，电压暂降等多重扰动类型的电能扰动信号，表明该方法能实现对谐波频率和幅值的检测，以及对电能质量扰动信号（电压凹陷、电压凸起、电压间断、暂态震荡、暂态脉冲等）的扰动时间、频率和幅值的检测，为进一步实现电能扰动类型的识别提供依据。

### References (参考文献)

- [1] XIAO Xiangning, Analysis and Control of Power Quality [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.  
肖湘宁等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社. 2004.
- [2] ZHANG Ping, Fundamental and Application of MATLAB [M], Beijing: Beihang University Press, 2001.  
张平等. MATLAB 基础与应用简明教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2001.
- [3] HU Changhua, LI Guohua, LIU Tao, Power System Analysis and Design Based on MATLAB 6.x - Wavelet Analysis [M], Xi'an: Xidian University Press, 2004.  
胡昌华, 李国华, 刘涛, 周志杰. 基于 MATLAB 6.x 的系统分析与设计-小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社. 2004.
- [4] LEI Yingjie, XING Qinghua, WANG Tao, Artificial Intelligence Programming (object-oriented language) [M], Beijing: TSinghua University Press, 2005.  
雷英杰, 邢清华, 王涛等. 人工智能(AI)程序设计(面向对象语言)[M]. 北京: 清华大学出版社. 2005.
- [5] SUN Ying, WANG Kui, Automation of Electric Power Systems [M], Beijing: China Electric Power Press, 2004.  
孙莹, 王葵等. 电力系统自动化[M]. 北京: 中国电力出版社. 2004.
- [6] XU Bo, LIU Zheng, Engineering Applied Mathematics Based on MATLAB [M], Beijing: TSinghua University Press, 2004.  
许波, 刘征 等. MATLAB 工程数学应用[M]. 北京: 清华大学出版社. 2004.
- [7] LOU Shuntian, LIU Xiaodong, LI Bohan, Power System Analysis and Design Based on MATLAB 7.x - Signal Processing [M], Xi'an: University of Electronic Science and Technology Press, 2005.  
楼顺天, 刘小东, 李博菡. 基于 MATLAB 7.x 的系统分析与设计-信号处理[M]. 西安: 电子科技大学出版社. 2005.
- [8] LEI Yingjie, Language Course of Visual Prolog[M], Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002.  
雷英杰等. Visual Prolog 语言教程. 西安: 陕西科学技术出版社. 2002.

- [9] LI Tianyun, ZHAO Yan, LI Nan, A New Method for Power Quality Detection Based on HHT[J], *Proceedings of the Csee*, 2005,9(17),P52-56 (Ch).  
李天云, 赵妍, 李楠, 冯国, 高宏慧. 基于 HHT 的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报. 2005,9(17),P52-56.
- [10] LI Tianyun, ZHAO Yan, JI Xiaohui and LI Nan, Application of HHT Method for Analysis of Fault Signal in Electric Power System[J], *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2005, 6(6), P87-91(Ch).  
李天云, 赵妍, 季小慧, 李楠. HHT 方法在电力系统故障信号分析中的应用[J]. 电工技术学报. 2005, 6(6), P87-91.
- [11] CHEN Xiangxun, Wavelet-based Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances [J], *Proceedings of the Csee*, 2002, 10(10), P1-6 (Ch).  
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, 10(10), P1-6.
- [12] Wen Jifeng, LIU Pei, A New Method for Detection of Power Quality Disturbances [J], *Proceedings of the Csee*, 2002, 12(12), P17-20 (Ch).  
文继锋, 刘沛. 一种电能质量扰动检测的新方法[J], 中国电机工程学报, 2002, 12(12), P17-20.