

文章编号: 1673- 9620 (2007) 03- 0058- 04

基于 HHT 的电力系统谐波分析^{*}

蔡冠玉¹, 王正洪²

(1. 江苏工业学院 信息科学系, 江苏 常州 213164; 2. 江苏工业学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213164)

摘要: 鉴于现有电力系统谐波检测与分析方法的不足, 用希尔伯特- 黄变换 (HHT) 进行谐波分析。该方法由两部分组成。首先对谐波信号作经验模态 (EMD) 分解, 得到满足一定条件的固有模态信号 (IMF), 然后用希尔伯特变换求其瞬时频率和瞬时幅值。该方法适用于非线性非平稳信号的分析, 具有概念清晰、计算简单的优点。仿真研究表明, 用 HHT 方法进行电力系统谐波分析是可行的, 与傅立叶变换和小波变换等现有方法比较, 有很多独特的优点。

关键词: 电力系统; 谐波分析; 希尔伯特- 黄变换

中图分类号: TM 711 文献标识码: A

Harmonic Analysis of Power System Based on HHT

CAI Guan- yu¹, WANG Zheng- hong²

(1. Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Jiangsu, Chanzhou 213164, China;
2. Department of Computer Science and Technology, Jiangsu Polytechnic University, Chanzhou 213164, China)

Abstract: Because of the drawback in existing methods of harmonic detection of power system, Hilbert- Huang Transform is applied to detect the harmonic signal. HHT is composed of two sections. At first the harmonic signal is decomposed by the EMD method, the intrinsic mode function IMFs satisfying specific requirements are obtained. Then the instantaneous frequency and amplitude are computed by the hilbert transform. The method is suitable for analysis of nonlinear and nonstationary signals, has advantages of distinct concept and is easy to use. Simulations show that the HHT- based method is practicable for harmonic analysis of power system, and has many distinctive advantages over fourier transform and wavelet transform.

Key words: power system; harmonic analysis; Hilbert- Huang Transform

谐波是由于电力系统中某些设备和负荷的非线性特性所造成的波形畸变。谐波电流和谐波电压的出现, 对公用电网是一种污染, 它使用电设备所处的环境恶化, 也对周围的通信系统和公用电网以外的设备带来危害。目前, 各种电力电子装置的迅速普及使公用电网的污染日趋严重, 由谐波引起的各

种故障和事故不断发生, 其危害的严重性引起了人们的高度关注。消除电网谐波的最有效措施是滤波, 而滤波的基础是谐波电流和电压的检测和分析。由于电力系统谐波的随机性和非线性特性, 对其进行准确的检测和分析有一定难度。

* 收稿日期: 2006- 12- 18

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目 (06KJD470051)

作者简介: 蔡冠玉 (1962-), 女, 江苏海门人, 实验师。

目前, 电力系统谐波检测的主要方法有^[1,2]: 采用模拟带通或带阻滤波器检测、基于瞬时无功功率的谐波检测、基于傅立叶变换的谐波检测、基于神经网络的谐波检测、基于小波变换的谐波检测等^[3,4]。本文研究基于希尔伯特-黄变换的电力系统谐波检测方法, 并阐述了该方法的优越性和尚需解决的问题。

1 传统谐波检测方法的主要优缺点

使用模拟滤波器的谐波检测方法, 由于其滤波器中心频率对元件参数很敏感, 易受外界环境的影响, 检测精度低, 电路复杂等原因, 目前已很少采用。

基于瞬时无功功率的谐波检测方法是针对三相三线电路以及谐波总量检测的, 不大适合于单相电路和各次谐波的检测。基于傅立叶变换的谐波检测是当前谐波检测中应用最广泛的一种方法, 但傅立叶变换的本质是针对稳态和线性应用场合的, 且当信号频率和采样频率不一致是会产生频谱泄漏和栅栏效应, 影响检测精度。可以采用加窗等方法进行改进, 但仍有所局限。基于神经网络的谐波检测是一种较新和有较好应用前景的方法, 但目前尚处于初步探讨阶段, 在实际应用中还存在一些问题需要解决, 如规范的神经网络构造方法问题, 需要大量的训练样本问题等, 实现技术尚需完善。基于小波变换的谐波检测方法和神经网络方法的优点类似, 且同样存在一些需解决的问题, 如最佳小波基的选取等。

2 希尔伯特-黄变换

1996 年, 美籍华人 Norden E. Huang 等人对瞬时频率的概念进行深入研究后, 创立了希尔伯特-黄变换 (HHT) 的新方法^[5~7]。这一方法创造性地提出了固有模态信号 (IMF) 的新概念以及将任意信号分解为固有模态信号的组成的方法——经验模态分解法 (EMD), 从而赋予了瞬时频率合理的定义、物理意义和求法, 初步建立了以瞬时频率为表征信号交变的基本量, 以固有模态信号为基本时域信号的时频分析方法。

希尔伯特-黄变换首先假定: 任一信号都是由若干固有模态信号组成的, 如果固有模态信号相互重叠, 便形成复合信号。其中固有模态信号是满足以下两个条件的信号: ①整个数据中, 零点与极点数相等或至多相差 1; ②信号上任意一点, 由局

部极大值点确定的包络线和由局部极小值点确定的包络线的均值为 0, 即信号关于时间轴局部对称。

在希尔伯特-黄变换中表征信号交变的基本量不是频率, 而是瞬时频率。瞬时频率可以通过希尔伯特变换获得, 即先对信号 $s(t)$ 作希尔伯特变换得到解析信号:

$$z(t) = s(t) + jH[s(t)] = a(t)e^{j\phi(t)}$$

幅值函数

$$a(t) = \sqrt{s^2(t) + H^2[s(t)]}$$

相位函数

$$\Phi(t) = \arctan \frac{H[s(t)]}{s(t)}$$

再对相位函数求导数即得瞬时角频率和瞬时频率

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}, f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

但 Norden E. Huang 等人分析认为, 通过以上过程求得的瞬时频率只对固有模态信号才具有物理意义。实际信号常常是复合信号, 因此对实际信号进行时频分析时, 需要先将信号分解成 IMF 的和。为此, 希尔伯特-黄变换的创立者又提出了一种经验模态分解方法 EMD, 这是一种经验筛选法, 其过程如下: 对任一信号 $s(t)$, 首先确定所有的极值点, 然后将所有极大值点和所有极小值点分别用一条包络线连接起来, 使两条曲线间包含所有的信号数据。把上下包络线的平均值记作 m , $s(t)$ 与 m 的差记作 h , 则

$$s(t) - m = h$$

将 h 视为新的 $s(t)$, 重复上述操作, 直到当 h 满足一定的条件 (如 m 变化足够小) 时, 记

$$c1 = h$$

将 $c1$ 视为一个 IMF, 再作

$$s(t) - c1 = r$$

将 r 视为新的 $s(t)$, 重复以上过程, 依次得到第 2 个 IMF $c2$, 第 3 个 IMF $c3$, ...。当 r 满足给定的终止条件 (如分解出的 IMF 或残余函数 r 足够小或 r 成为单调函数) 时, 筛选过程终止, 得分解式

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

其中, r 称为残余函数, 代表信号的平均趋势。

对每个 IMF 分别作希尔伯特变换后得

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\Phi_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt}$$

这里省略了残余函数 r , Re 表示取实部。称展开式为希尔伯特幅值谱, 简称希尔伯特谱, 记作

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt}$$

以上的 EMD 和与之相应的希尔伯特谱信号分析方法统称为 希尔伯特- 黄变换。

3 HHT 电力系统谐波分析

设一个仿真谐波信号为

$$s(t) = \begin{cases} \sin(2\pi \times 50t) + 0.5\sin(2\pi \times 150t) & 0 \leq t < 0.1s \\ \sin(2\pi \times 50t) + 0.3\sin(2\pi \times 250t) & 0.1 \leq t \leq 0.2s \end{cases}$$

信号 $s(t)$ 从时间上分为前后两部分, 前一部分是 50 Hz 基频和 3 次谐波的组合, 后一部分是基频和 5 次谐波的组合。原信号及其快速傅立叶变换的结果分别如图 1 和图 2 所示。

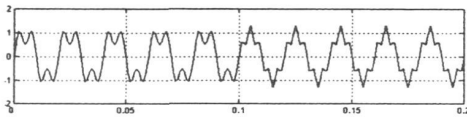


图 1 谐波信号

Fig. 1 Harmonic signal

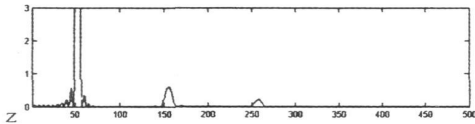


图 2 谐波信号的傅立叶频谱

Fig. 2 Fourier spectrum of harmonic signal

从图 2 可见, 该谐波信号含有 3 个频率, 分别为 50 Hz、150 Hz 和 250 Hz。但是不能区分各个频率的发生时刻。现在用 HHT 方法用 MATLAB 编程进行 EMD 分解, 得到两个 IMF, 即 c_1 和 c_2 , 如图 3 所示。 c_1 包含 3 次和 5 次谐波, c_2 是基波。在此基础上求出瞬时频率和幅值如图 4 所示。

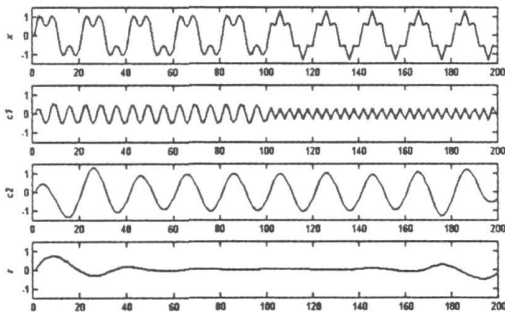
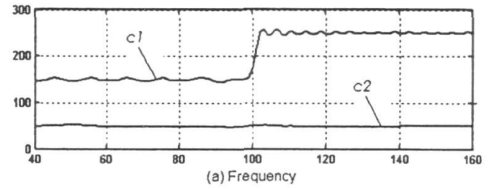


图 3 谐波信号经 EMD 分解后的 IMF 信号

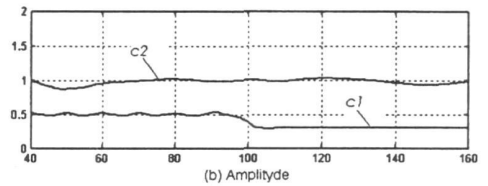
Fig. 3 IMF of harmonic signal by EMD

图 4 (a) 是瞬时频率, 从中可以看出 c_1 包含两个频率, 一个是 150 Hz, 另一个是 250 Hz, 而

且可以清晰地看出这两个频率的分界处 (对应于 0.1s)。图 4 (b) 是幅值, 基频 c_1 的幅值是 1, c_2 的幅值有两段, 与 3 次谐波对应的是 0.5, 与 5 次谐波对应的是 0.3, 和原信号一致。显然, 希尔伯特- 黄变换的分析效果明显优于傅立叶变换。



(a) Frequency



(b) Amplitude

图 4 IMF 信号的频率和幅值

Fig. 4 Frequency and amplitude of IMF

在实施希尔伯特- 黄变换的过程中, 首先要找出原信号的极大值和极小值, 并分别用两条包络线把极值连接起来, 这时左右两个端点的包络线会出现所谓“端点飞翼”, 即包络线的初始和终了的走向发生偏离, 使图中的 IMF 信号两端的波形略有不规则现象, 瞬时频率和幅值也会受到影响。本文在图 4 (b) 中舍去了两端小范围的数据, 相当于端值延拓的边界处理方法。

以下分析 1 个实例。把 3 个不同性质的三相负载同时接入一个三相变压器, 第 1 个是三相线性负载, 第 2 个是三相驱动装置, 第 3 个是可能产生非整数次谐波分量的非线性负载。从理论上分析, 带有三相非线性负载的变压器, 会产生 5 次和 7 次谐波, 尤其以 5 次谐波为主。由于 5 次谐波是负序谐波, 如果该线路的负载中同时还含有电动机, 则负序谐波会对电动机产生反向扭矩和使电动机过热。谐波可以使变压器发热, 带有非线性负载的变压器需进行周期性检查, 以确保其在一定限度下正常工作。变压器二次线圈 (负载) 电流的谐波频谱可反映出谐波的次数和幅值。如果负载均衡, 只须测量一相就足够了。此外, 谐波的幅度通常随着频率的增加而下降。如果一个频率的谐波幅度明显高于低频率谐波的幅度, 可以怀疑在这个频率有谐振。

测量的电流波形如图 5 所示。将支路电流的采样值用 EMD 分解, 得到 4 个 IMF 如图 6 所示。计算 4 个 IMF 的幅值和瞬时频率如表 1 所示。为了消除最终得到的瞬时幅值和瞬时频率的波动现象

(这是 HHT 目前存在的缺陷之一), 这里取其各自的平均值。从表 1 可见, 分析结果和理论吻合。谐波成分中除了 50 Hz 电流外, 还有 250 Hz 和 350 Hz 信号, 分别为 5 次和 7 次谐波, 且随着谐波频率升高, 其幅度随之减小。26 Hz 分量是非线性负载造成的非整数次谐波分量。

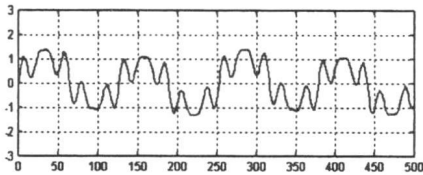


图 5 电流波形
Fig 5 Current waveform

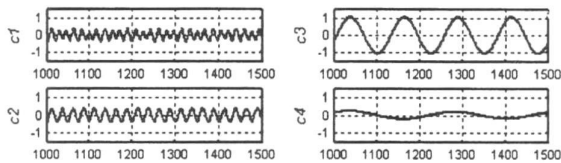


图 6 EMD 分解后的 IMFs
Fig. 6 IMFs obtained with EMD

表 1 谐波检测结果

Table 1 Harmonic detection results

谐波分量	幅值	频率
f_1	0.255 8	26.000 8
f_2	1.047 9	50.001 5
f_3	0.389 4	249.007 3
f_4	0.220 7	349.010 3

4 HHT 与小波变换方法的比较

小波变换是一种时间和频率的局部变换, 因而能有效地从信号中提取信息, 通过伸缩和平移等功能对信号进行多尺度分析, 克服了傅立叶变换在频域完全局部化而在时域完全无局部性的缺点。但是用小波变换方法需事先选取一个小波基, 且用不同的小波基会得到有一定差异的分析结果。目前在谐波分析方面还缺乏系统规范的最佳小波基的选取方法, 缺乏构造频域行为良好的小波函数以改善检测精度的规范方法。小波基的选取主要靠经验, 以及

通过试验来加以选择, 这一点在一定程度上限制了小波方法的应用。

希尔伯特-黄变换不需要事先选择基函数, 通过 EMD 得到的 IMF 是被检测信号所“固有”的, 因此具有自适应的特性。希尔伯特-黄变换吸取了小波变换的多分辨的优势, 且更为直接, 不出现多余的尺度, 因此分析效率更高。希尔伯特-黄变换能测定谐波的瞬时频率和幅值, 比小波变换更为方便。

5 结 论

希尔伯特-黄变换方法用于非平稳、突变的谐波检测和分析, 能够方便的通过 EMD 分解得到固有模态分量 IMF, 并测定各个谐波的瞬时频率和幅值, 以及谐波发生和突变的时刻, 与现有方法相比更为灵活和有效, 是电力系统谐波分析的一种新的有力工具。

参考文献:

[1] 姜建国, 朴晓光, 赵长和, 等. 电力系统的谐波检测与故障分析 [J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26 (1): 45- 47.
[2] 罗德凌, 唐朝晖. 电力系统谐波检测方法的研究现状及其发展 [J]. 国外电子测量技术, 2006, 25 (4): 5- 8.
[3] 王公宝, 张文博, 向东阳. 小波变换在电力系统谐波检测中的应用 [J]. 海军工程大学学报, 2005, 17 (2): 1- 5.
[4] 苏变玲, 苏涛. 基于组合小波的电力信号的谐波分析 [J]. 现代电子技术, 2003, 160 (17): 67- 69.
[5] 刘毅华, 赵光宙. 希尔伯特-黄变换在电力系统故障检测中的应用研究 [J]. 继电器, 2006, 34 (14): 4- 6.
[6] 李天云, 赵妍, 季小慧, 等. 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, 20 (6): 87- 91.
[7] 李天云, 赵妍, 韩永强, 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, 29 (2): 73- 77.
[8] Peng Z K, Peter W Tse, Chu F L. An improved Hilbert - Huang transform and its application in vibration signal analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286: 187- 205.