

希尔伯特 - 黄变换在电力系统故障检测中的应用研究

刘毅华¹, 赵光宙²

(1 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 2 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 电力系统中的故障暂态信号多为非线性非平稳信号, 希尔伯特 - 黄变换 (HHT) 被认为是专门针对非线性非平稳信号的分析方法。将 HHT 引入到电力系统故障检测中, 利用经验模态分解 (EMD) 获得故障电流信号的本征模态函数 (MF), 通过选取 MF 并对其进行 Hilbert 变换, 提取出 MF 分量的瞬时频率和瞬时幅度。利用合成的 MF 分量的 Hilbert 谱分布, 对故障暂态进行了时间 - 频率 - 振幅的联合分析。仿真研究表明: 基于 HHT 的故障检测方法能充分提取故障信息, 故障定位准确, 提高了故障检测的可靠性。

关键词: 希尔伯特 - 黄变换; 经验模态分解; 瞬时频率; 电力系统; 故障检测

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897 (2006) 14-0004-03

0 引言

高压输电线路和电力设备发生故障时产生的暂态信号是非线性、非平稳的。在常用的分析方法中, 虽然傅里叶变换在分析线性、平稳信号时具有良好的性能, 但在分析非线性、非平稳信号时, 由于其是整个时间轴上的积分平均, 所以无法反映非平稳信号的时变特征。小波分析方法虽然具有“多分辨率”的特点, 但由于小波基函数的长度是有限的, 进行小波变换时会产生能量的泄漏, 无法对信号进行精确的时频分析, 而且一旦选择了小波基和分解尺度, 所得到的是对某一固定频段信号的分析结果, 而且这一频段只与信号的采样频率有关而与信号本身无关, 无法反映信号的本质特征。

希尔伯特 - 黄变换 HHT (Hilbert - Huang Transform)^[1,2] 是近年来发展起来的一种新的时间序列信号分析方法, 被认为是对以傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破^[3], 是针对非线性非平稳信号的分析方法。HHT 通过经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition) 把信号分解为若干个本征模态函数 MF (Intrinsic Mode Function), MF 的特点是具有合理的瞬时频率 IF (Instantaneous Frequency) 定义, 然后对 MF 进行 Hilbert 变换, 得到每一个 MF 的随时间变化的瞬时频率和瞬时幅值, 由此可以构建信号的时间 - 频率 - 能量分布, 即 Hilbert 谱, 无论在时间域还是频率域都具有良好的分辨率, 并且三维的分布能够更好地反映出信号的内在本质特征。

本文分析了 HHT 方法的原理及特点, 在此基础上利用 HHT 方法对电力系统故障电流信号进行了

时频谱分析, 通过对 MF 的瞬时频率分析, 提取出了故障特征, 为电力系统故障检测提供了一种新的途径。同时亦表明基于 EMD 的方法具有良好的抗噪性能。

1 HHT 方法

HHT 方法由 EMD 和 Hilbert 变换两部分组成, 特别适用于分析非线性非平稳信号。一般的信号均包含有多种振荡模态, 直接对其进行 Hilbert 变换得到的瞬时频率是毫无意义的。EMD 基于信号的局部特征时间尺度, 可以将任意复杂的信号分解为少量 MF 的组合, 而 MF 能对瞬时频率给出有意义的物理解释。对 MF 进行 Hilbert 变换可获得瞬时频率和瞬时振幅, 二者皆为时间的函数, 时间 - 频率 - 振幅可以构成信号的 Hilbert 谱分布。下面作具体介绍。

对于任一连续的时间信号 $X(t)$, 可得到它的 Hilbert 变换 $Y(t)$ 为:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

其反变换为:

$$X(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Y(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (2)$$

则 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 形成复共轭对, 由其构成的解析信号为:

$$Z(t) = X(t) + jY(t) = a(t) e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

式中: $a(t)$ 为瞬时振幅, $\theta(t)$ 为相位。

$$a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \quad (5)$$

瞬时频率可按式计算:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

由式(6)可以看出: $f(t)$ 是时间 t 的单值函数, 即某一时间对应某一频率, 因此, 为了使瞬时频率有意义, 作 Hilbert 变换的时间序列必须是单组分的, 而 EMD 后的 MF 序列恰好满足这一要求。

MF 表征了内蕴于数据的振荡模态, 它与数据的局部时间尺度有关。为了给出合理的瞬时频率, 本征模态函数须满足以下两个条件:

1) 在整个数据长度上, 信号极值点的数量与过零点的数量相同或者至多相差 1 个;

2) 在任意点, 由局部极大值点构成的包络线和局部极小值点构成的包络线的平均值为零。

第一个条件与传统的平稳高斯过程中关于窄带的定义类似。第二个条件则是对信号的局域特性做了要求, 而非传统的整体性要求, 它排除了由于波形不对称而引起的瞬时频率的波动。通过信号局部极大值定义的极大值包络以及局部极小值定义的极小值包络的均值为零来强迫信号局部对称。

由于在任意给定的时间可能包含不止一个振荡模态, 绝大部分的信号不满足 MF 的条件, 需要通过 EMD 方法把复杂的信号分解为一系列的 MF。EMD 方法的本质是通过信号特征时间尺度辨别本征振荡模态, 然后据此分解信号。时间尺度定义为信号极大值与相邻极小值间的时间间隔, 相互交联的局部极值点和过零点构成了复杂的数据。MF 的提取通过“筛选”算法完成, 下面是时间序列数据 $x(t)$ 进行经验模态分解的一种算法:

1) 初始化: $r_0(t) = x(t)$, $i = 1$

2) 得到第 i 个 MF:

初始化: $h_0(t) = r_i(t)$, $j = 1$;

找出 $h_{j-1}(t)$ 的局部极值点;

对 $h_{j-1}(t)$ 的极大和极小值点分别进行插值, 形成上、下包络线;

计算上、下包络线的平均值 $m_{j-1}(t)$;

$$h_j(t) = h_{j-1}(t) - m_{j-1}(t)$$

若 $\sum_{t=0}^T \frac{|h_j(t) - h_{j-1}(t)|^2}{h_j(t)^2} \leq K$ (K 为设定的

阈值), 则 $mf_i(t) = h_j(t)$; 否则, $j = j + 1$, 转到

3) $r_i(t) = r_{i-1}(t) - mf_i(t)$ 。

4) 若 $r_i(t)$ 的极值点数不少于 2 个, 则 $i = i + 1$, 转到 2); 否则, 分解结束, $r_i(t)$ 是残余分量。

算法最后得到:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n mf_i(t) + r_n(t) \quad (7)$$

即原始数据数列可表示为若干个 MF 和一个残余项的和。

对 MF 进行 Hilbert 变换, 可获得其时变的瞬时频率 $f_i(t)$ 和幅度 $a_i(t)$, 则 $(t, f_i(t), a_i(t))$ 就构成了信号的 Hilbert 谱, 即在时频面上信号能量的分布。Hilbert 谱是加权的结合时间-频率-振幅的分布, 每一频率的加权值是本身局部的振幅。它是由信号的局域特征得到的时频分布, 能够揭示出信号的非平稳性和时变性。

与傅里叶分析方法相比, HHT 得到的每个 MF 的振幅和频率是随时间变化的, 消除了为反映非线性、非平稳过程而引入的多余简谐波。与小波分析方法相比, HHT 具有小波分析的全部优点, 吸取了小波变换的多分辨的优势, 同时克服了小波变换中需要选取小波基的困难; 在分辨率上消除了小波分析的模糊和不清晰, 具有更准确的谱结构; HHT 方法从信号本身的尺度特征出发对信号进行分解, 能够尽快地分析出信号的特征, 具有良好的局部自适应性。

2 故障电流信号的时频分析

故障信号来源于 Matlab/Simulink 软件仿真产生的三相传输线短路故障行波电流信号, 人为叠加白噪声, 信噪比为 47.2, 故障时刻为 300 ms 处, 如图 1 所示。图 2 是对故障信号进行经验模态分解后的本征模态函数图, 从上到下依次为 MF1 ~ MF8 组分, 最后一项为残余分量。

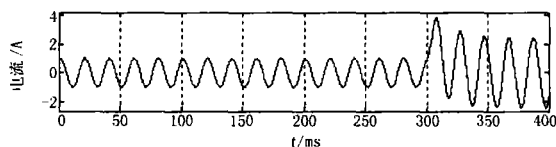


图 1 故障电流信号

Fig 1 Fault current signal

从图 2 中, 可以发现 MF1 组分对应信号的噪声部分, 后续各个组分均较平滑, 说明 EMD 具有十分优良的信噪分离功能, 基于 EMD 的算法均应具有很好的抗噪性能。从 EMD 的原理上讲, 噪声的存在, 相当于在信号中引入微小的扰动, 有助于 EMD 对信号特征时间尺度的精确分析。

MF2 组分集中了信号的主要能量, 也保持了信号的主要特征, 这是将其作为故障检测分量的原因。对 MF2 进行 Hilbert 变换, 提取瞬时频率 (图 3) 和

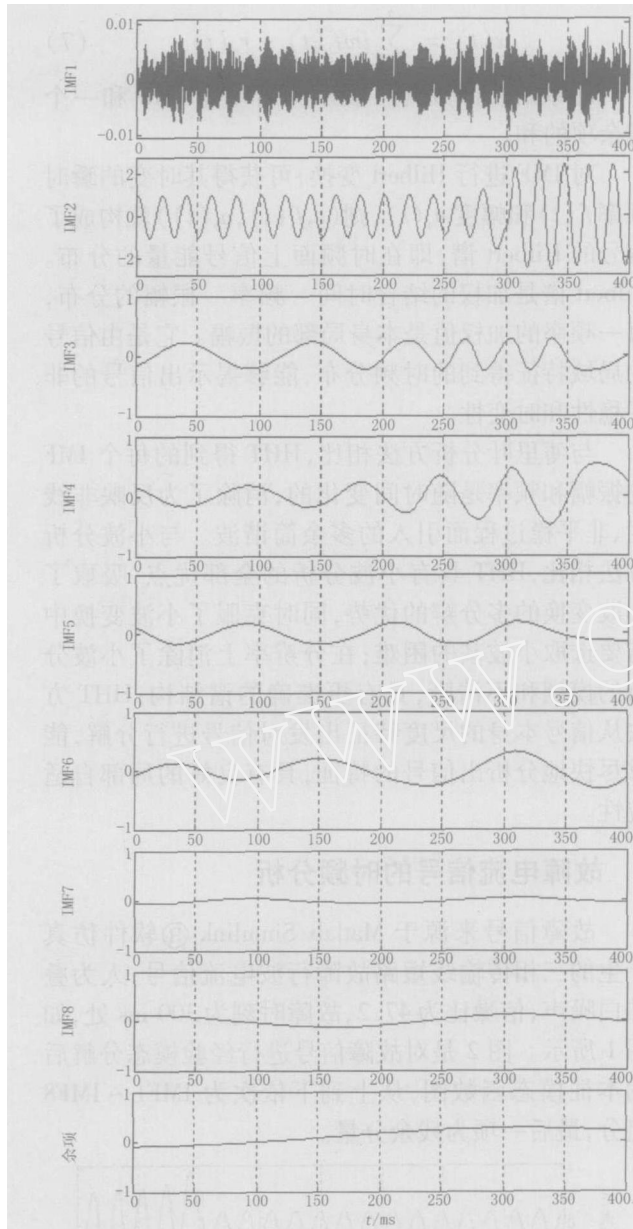


图 2 故障电流信号的本征模态函数图

Fig 2 Fault current signal's MFs

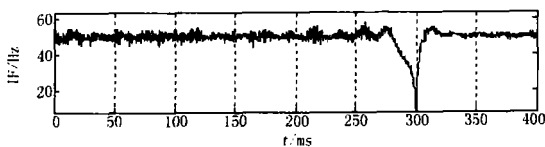


图 3 MF2的瞬时频率图

Fig 3 MF2's instantaneous frequency

瞬时振幅后,可以生成时间 - 频率 - 振幅的 Hilbert 谱分布,如图 4所示。从图 3中,可以清楚地得到故障的发生时间。而从图 4所示的 Hilbert谱中,不光可以得到故障时间,而且可以获得故障前后信号频

率和幅值随时间变化的信息,这是以往的信号分析方法所不具有的特性,大大增强了信号分析的灵活性和有效性。

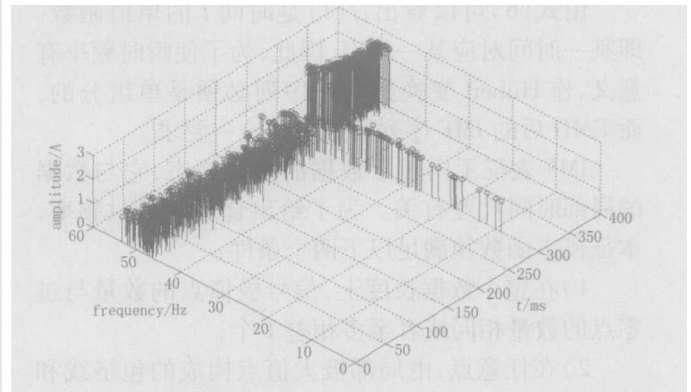


图 4 MF2的时 - 频 - 幅值谱图

Fig 4 MF2's time - frequency - amplitude spectrum

3 结论

HHT是针对非线性非平稳信号的分析方法,通过 EMD 将信号分解为 MF的组合,运用 Hilbert 变换对 MF进行瞬时频率、幅值的分析,根据生成的信号的 Hilbert谱,可以揭示信号的非平稳性和时变性。本文将希尔伯特 - 黄变换应用于电力系统故障检测中,取得了预期的效果,故障定位准确,提取的故障信息丰富,为电力系统故障检测提供了一种新的途径。

参考文献:

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Non-linear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998 903-995.
- [2] Huang N E, Shen Z, Long S R. A New View of Nonlinear Water Waves: the Hilbert Spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [3] Better Algorithms for Analyzing Nonlinear Nonstationary Data[EB/OL]. <http://tca.gsfc.nasa.gov>

收稿日期: 2006-01-15

作者简介:

刘毅华 (1976 -), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力系统故障检测、信号分析及其应用等; E-mail: yihua_liu@126.com

赵光宙 (1946 -), 男, 教授, 博士, 主要从事自动控制理论及应用、非线性系统分析与控制、计算机控制技术、信号分析与故障诊断等领域的研究和开发工作。

(下转第 19页 continued on page 19)

够将中性点集聚的多余电荷快速地释放掉,避免了其在间隙电弧时对振荡的放大作用,从而限制了内部过电压倍数。系统经接地变接地后,装设的接地保护对零序电流具有足够的灵敏度,为快速切除接地故障提供了可能性。经 Z型变接地方式不仅能够抑制弧光过电压,同样能够完全抑制电网中因电压互感器磁饱和引起的铁磁谐振过电压,提高了一部分绝缘较弱设备的安全性。另外这种接地方式对电容电流的变化及电网的发展适应范围很大。当然,系统经这种方式接地后,线路开关跳闸次数会明显增多。当配电变高低压侧接地网共为一体时,高压侧接地电流将影响到低压系统的电位,从而对通信设备造成影响。

参考文献:

- [1] 周泽存. 高电压技术 [M]. 北京:水利电力出版社, 1987.
ZHOU Ze-cun The Technology in High Voltage Field [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1987.
- [2] 李延强,李锦敏,贾常朱,等. 天津配电网低电阻接地

保护方式及整定计算的探讨 [J]. 继电器, 1998, 26 (2): 38-42

LI Yan-qiang, LI Jin-min, JIA Chang-zhu, et al Discussion on Low Resistance Earth Protection Mode and Its Setting Calculation in Tianjin Distribution Network [J]. Relay, 1998, 26 (2): 38-42

- [3] 于立涛. 35 kV 配电网中性点经小电阻接地改造方案分析 [J]. 继电器, 2004, 32 (16): 57-59

YU Li-tao Analysis of Improving Scheme for Grounding via Low Resistance in 35 kV Distribution Network [J]. Relay, 2004, 32 (16): 57-59

收稿日期: 2006-01-05; 修回日期: 2006-04-04

作者简介:

贺春 (1976 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护设备安装调试及运行维护工作; E-mail: hechun01@163.com

刘力军 (1968 -), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电子技术;

谢硕果 (1974 -), 男, 工程师, 主要从事继电保护工作。

Application of zigzag grounding transformers in the power system with low resistance via neutral grounding

HE Chun¹, LI Li-jun², XIE Song-guo¹, LI Wei³

(1. Tianjin High Voltage Power Supply Company, Tianjin 300171, China;

2. Information and Technology College, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050000, China;

3. Beijing Electric Power Transmission and Transformation Company, Beijing 102401, China)

Abstract: This paper introduces the characteristic of configuration of zigzag grounding transformers. Based on that, the mode of zigzag grounding transformers in distribution network with low resistance via neutral grounding is presented. It analyzes the principle of the mode limiting overvoltage due to interphase arc grounding, the mounting position of zigzag transformers and arrangement principle of earth protection in the distribution network. Moreover, the influence to transformer differential protection in this mode is discussed and some countermeasures are proposed.

Key words: zigzag transformer; low resistance; grounding; earth protection; power system

(上接第 6 页 continued from page 6)

Application of Hilbert-Huang Transform in power system fault detection

LI Yi-hua¹, ZHAO Guang-zhou²

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Hilbert-Huang Transform (HHT) has been proved to be a good method for analyzing nonlinear and nonstationary signals. This paper introduces HHT into the fault measurement of power system. The fault signal is firstly decomposed into intrinsic mode function (IMF) by the EMD method. Then instantaneous frequency and instantaneous amplitude is obtained by Hilbert transform to compose Hilbert spectrum. Thus the transient caused by fault can be analyzed and further detected accurately through the instantaneous frequency and the time-frequency-amplitude spectra analysis. Simulations show that the HHT-based method is accurate at fault location and fault message abstraction, which enhance the reliability of fault detection.

Key words: Hilbert-Huang transform (HHT); empirical mode decomposition (EMD); instantaneous frequency (IF); power system; fault detection