

# 基于希尔伯特-黄变换的介损数字测量算法

易 琛<sup>1</sup>, 李泽文<sup>2,3</sup>

(1. 广东电网公司广州供电局工程建设部, 广东 广州 510000; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076;  
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 准确提取基波电压和电流信号是检测介质损耗因素的关键。提出了一种新的介质损耗因数检测算法, 采用希尔伯特-黄变换 (HHT) 对试品电压和电流信号进行检测, 通过经验模态分解法 (EMD) 提取信号的固有模态函数 (IMF), 再进行 Hilbert 变换, 得到各自的瞬时频率, 由瞬时频率进行介质损耗因数的准确检测。该算法无需同步采样, 可以实时提取测量电压、电流信号的基波成分。仿真结果表明, HHT 受采样数据长度、频率跟踪误差的影响较小, 在非同步采样的情况下, 具有良好的应用特性, 能有效提高介质损耗因数检测的准确度。

**关键词:** 介质损耗因数; 希尔伯特-黄变换; 瞬时频率; 数字化算法

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0115-05

## Digital Algorithm of Dielectric Loss Measurement Based on Hilbert-Huang Transform

YI Chen<sup>1</sup>, LI Ze-wen<sup>2,3</sup>

(1. Project & Construction Department of Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510000, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Conventional methods for on-line measurement of dielectric loss factor are difficult to meet the requirements of accuracy and anti-interference. A novel time-frequency analysis method for measuring dielectric loss factor is proposed in this paper. Hilbert-Huang transform (HHT) is adopted to process the voltage and current signals. Intrinsic mode functions (IMF) of voltage and leakage current signals are extracted by empirical mode decomposition (EMD), and Hilbert transform is applied to calculation of the corresponding instantaneous frequency of fundamental components, then the  $\tan\delta$  can be calculated. The algorithm can accurately extract the fundamental components of voltage and leakage current without synchronous sampling. Simulation results show that there is little influence of sampled data length and frequency tracking error on HHT, and the proposed algorithm exhibits good application performance when the sampled data length is not exactly an integer fold of a power cycle, which demonstrates the algorithm can effectively improve the accuracy and stability of dielectric loss measurement.

**Key words:** dielectric loss factor; hilbert-huang transform; instantaneous frequency; digital algorithm

## 0 引言

电气设备的安全可靠是实现整个电力系统运行的基础。大量资料表明, 导致设备 (尤其是高压设备) 失效的主要原因是其绝缘性能的劣化, 所以实时、准确地监测运行中电气设备的绝缘状态对于保障电力系统的安全具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。电气设备介质损耗因数的在线监测方法大致可分为直接测量法和信号重建法<sup>[6-13]</sup>。以过零点比较法为代表的直接测量法, 对硬件要求高, 且对谐波和干扰敏感, 其准确度难以

保证。目前采用更多的是信号重建法。信号重建法是根据采样数据重建  $i$ 、 $u$  的正弦波模型, 再由波形参数求得  $\delta$ , 如傅里叶分析法、正弦波参数法和相关系数法等。而这些算法能够应用的前提是必须满足这样一个基本假设: 即被测信号基波与谐波分量的周期性在若干周期内严格保持不变。这就造成现有的数字化算法本身无法避免的局限性: 必须为同步采样, 即采样频率为信号基波频率的整数倍; 采样数据长度必须是信号基波周期的整数倍; 因介质损耗角太小, 由算法获取介质损耗因数的分辨率较低; 因

收稿日期: 2009-06-08; 修回日期: 2009-08-11

作者简介: 易琛 (1984), 男, 助理工程师, 主要从事 110~500 kV 变电工程管理工作。

基于信号的周期不变性为前提,使得算法无法跟踪信号的瞬变特性和正确处理随机性因素的影响。其中,采样同步条件非常难以满足,而一旦采样数据长度为非整数周期,将给介质损耗因数带来非常大的计算误差。

正是上述困难,造成现有的数字化算法从理论上难以克服电压谐波、电网频率波动、非同步采样与非整周期采样等因素的综合影响,有待于研究基于其他原理的新型数字化算法。

希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform)是近年来应用于非平稳信号分析的一种新方法<sup>[14-18]</sup>,它由经验模态分解法(EMD)及 Hilbert 变换两部分组成。该方法用 EMD 方法把复杂信号函数自适应分解成有限个瞬时频率有意义的、幅度或频率受调制的高频和低频固有模态函数(IMF),HHT 定义的瞬时频率具有实际的物理意义,可用于复杂的非平稳信号的分析。每一个 IMF 分量所包含的频率成分不仅与采样频率有关,而且最重要的是随信号本身变化而变化,因此 HHT 是自适应的信号处理方法,非常适合对非线性和非平稳过程的分析。

把希尔伯特-黄变换应用于电力系统介质损耗因数的检测中,它对谐波等干扰不敏感,且根本不受同步采样和整周期采样条件的约束,可以准确提取试品电压、电流信号中的基波分量,从而实现介质损耗因数的高精度检测。

## 1 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换主要由两部分组成:一是经验模态分解过程(EMD),二是在其基础上进行 Hilbert 变换得到的时频谱。为了能够更容易地理解希尔伯特-黄变换的方法,下面对其中的基本概念进行描述。

### 1.1 Hilbert 变换

设  $x(t)$  为一时间序列, $Y(t)$  是它的 Hilbert 变换(HT), $Y(t)$  为

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

其反变换为

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

得到解析信号

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

式(3)中, $A(t)$  为瞬时幅值, $A(t) = [X(t)^2 + Y(t)^2]^{\frac{1}{2}}$ ;  $\theta(t)$  为相位, $\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)}$ 。

### 1.2 瞬时频率

在平稳信号分析中,频率指的是 Fourier 变换的参数,包括圆频率  $f$  或角频率  $\omega$ ,它们与时间无关。在瞬态与非平稳现象分析中,频率是与时间有关的函数,不再适合采用 Fourier 变换进行分析,需引入瞬时频率的概念。

瞬时频率  $f(t)$  可定义为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

即解析信号  $Z(t)$  的相位导数。式(4)有很明确的物理意义:解析信号  $Z(t)$  表示复平面的一向量,瞬时频率则表示该向量幅角的转速。

对于实信号,利用 Hilbert 变换可求出该信号的 3 个瞬时特征参数:瞬时幅度、瞬时相位和瞬时频率,实现真正意义上瞬时参数的提取。式(4)中给出的瞬时频率是时间的单值函数,只有当信号满足只含一种振动模态,没有复杂叠加波的情况,才能用瞬时频率进行分析。而大部分信号都包含不止一个振动模态,为此,采用一种新型信号处理技术——经验模态分解,对采集到的信号进行分模态处理,得到一系列平稳、只含一种振动模态的固有模态分量,再对每一个分量进行 Hilbert 变换,得到瞬时参数。

### 1.3 经验模态分解

EMD 的作用是将复杂信号分解成有限个 IMF,使 Hilbert 变换的瞬时频率具有实际物理意义。IMF 要满足以下两个条件:极值点和过零点数目相等或最多差 1;在任意点,由局部极大值和局部极小值形成的两包络的均值为零。EMD 是一种经验筛分法,信号  $s(t)$  的 EMD 过程:

(1)取  $S_{11}(t) = S(t)$ ,信号  $S_{ij}(t)$  的下标  $i$  表示分解的阶数, $j$  表示求解第  $i$  阶参数的迭代次数。求信号  $S_{ij}(t)$  上的所有极值点,用三次样条曲线连接所有极大值点形成上包络线,同样的方法形成下包络线。 $S_{ij}(t)$  与上下包络线的均值  $m_{ij}(t)$  的差记为  $h_{ij}(t)$ ,则

$$h_{ij}(t) = s_{ij}(t) - m_{ij}(t) \quad (5)$$

(2)判断  $h_{ij}(t)$  是否满足 IMF 的两个条件,如满足,则执行第(3)步;否则取  $S_{i(j+1)}(t) = h_{ij}(t)$ ,重复第(1)步;

(3)分解出的信号  $S(t)$  的  $i$  阶 IMF 分量  $c_i(t)$  为  $c_i(t) = h_{ij}(t)$  (6) 该分量包含信号的最高频成分;并计算较低频率成分的残余信号,  $r_i(t)$  为

$$r_i(t) = s_{i1}(t) - c_i(t) \quad (7)$$

(4)判断  $r_i(t)$  是否为单调函数,如满足,则执行第(5)步;否则取  $S_{(i+1)1}(t) = r_i(t)$ ,重复第(1)步;

(5)最终分解阶数  $n$  为

$$n=i \tag{8}$$

则原信号  $s(t)$  可表示为  $n$  个 IMF 分量和一个残余项的和,  $s(t)$  为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \tag{9}$$

综上所述,经验模态分解类似小波分解,经验模态分解树见图1。它将复杂信号  $S(t)$  从高频到低频依次分解得到有序排列的多阶 IMF 分量  $c_i(t)$ , 最后得到单调的趋势分量  $r_n(t)$ 。

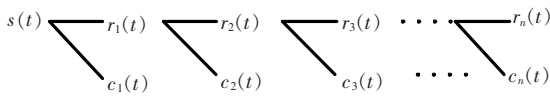


图1 经验模态分解树

原始信号见图2。图2中 tone 信号和 chirp 信号是任意两频率信号,将其叠加得到第3个信号,对该叠加信号进行 EMD 分解,见图3。 $i_{mf1}$ ~ $i_{mf6}$  为分解出的 IMF 分量,频率由高到低, res 则为残余函数。由图3可知,  $i_{mf1}$  和  $i_{mf2}$  分别对应 chirp 信号和 tone 信号, EMD 分解可很好地将不同频率的信号分离出来,基本不受采样频率和信号频率的影响,可以改善在非同步采样和非整周期采样时的信号复原准确度。

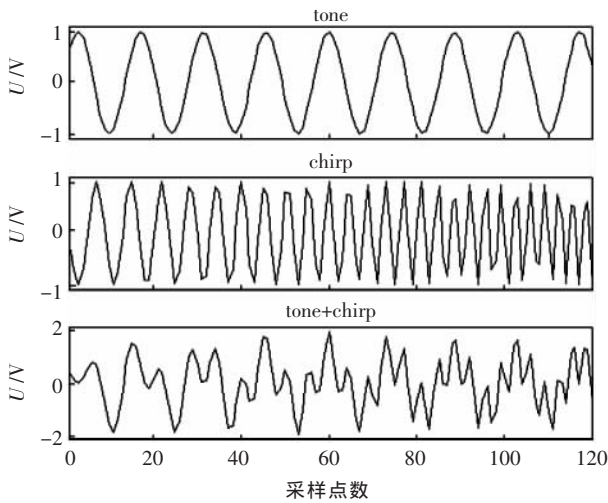


图2 原始信号

## 2 基于 HHT 的介损数字化测量算法

介损检测的输入电压信号  $f(t)$  可表示为

$$f(t) = \sum_{i=1}^n U_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \tag{10}$$

式(10)中,  $U_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\phi_i$  分别为基波或谐波的幅值、频率和相位。由于不同的 IMF 对应着不同的频率分量,基波也唯一对应一个 IMF 分量,从 IMF 分量中可有效提取出基波信号。

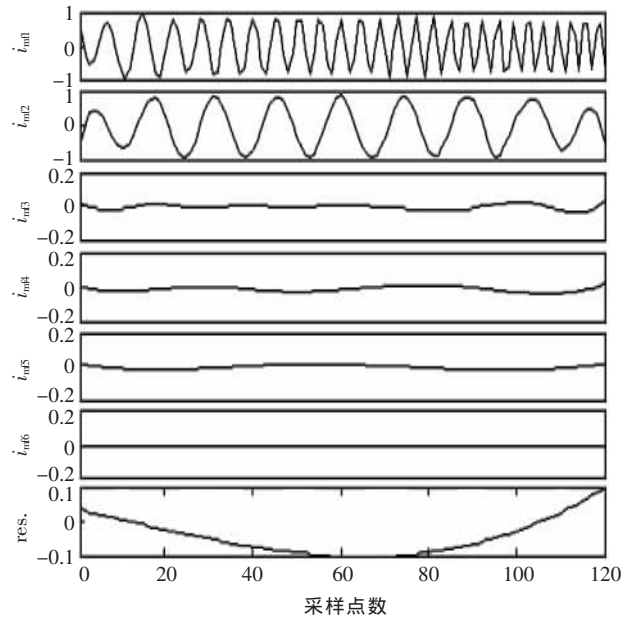


图3 信号 EMD 分解图

假设从  $f(t)$  中得到的基波分量为  $x(t)$ , 对其进行 Hilbert 变换 (HT), 得到  $Y(t)$ , 对  $Y(t)$  按式(2)、式(3)计算基波信号的瞬时频率, 确定基波的幅值、相位和频率参数信息, 进而计算介质损耗因数。其检测流程见图4。

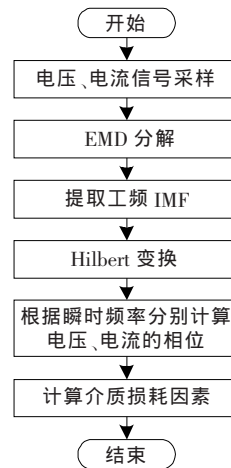


图4 基于希尔伯特-黄变换的  $\tan \delta$  测量流程

为了说明希尔伯特-黄变换的  $\tan \delta$  测量准确度, 设电压信号为:  $f(t) = \sin(99.6\pi \cdot t + 30^\circ)$ , 采样频率为 1000 Hz, 显然该信号为一 IMF 分量。对其进行 Hilbert 变换, 图5、图6 分别为 EMD 分解出的电压基波 IMF 分量和 Hilbert 变换后的瞬时频率时频图, 可知信号频率为 49.800 Hz, 幅值为 1.0 kV, 相位  $30.001^\circ$ 。由图可知, 该方法具有很高的准确度。

设某容性试品的等值电路见图7, 其等效电阻  $R_p = 106 \text{ M}\Omega$ , 电容量  $C_p = 5 \text{ nF}$ , 测量电压为 10 kV, 采样频率为 10 kHz, 分别在电压含谐波、电压频率波

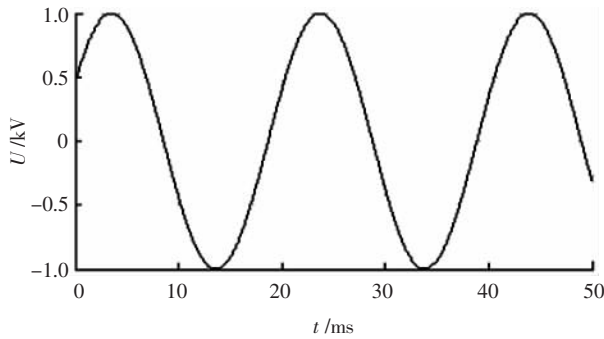


图5 基波 IMF 分量

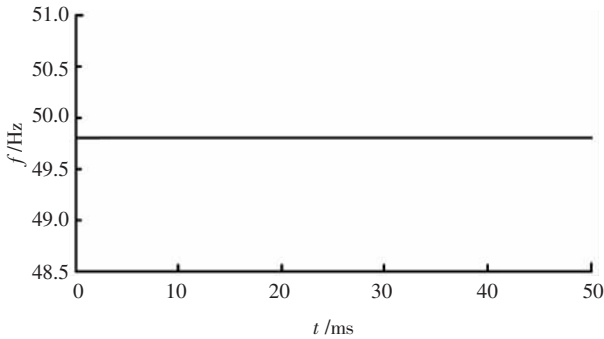


图6 基波 IMF 分量的瞬时频率

动、采样频率及采样时间长度变化和模拟现场测试信号等情况下对笔者提出的算法进行仿真验证,并与谐波分析法进行对比分析。

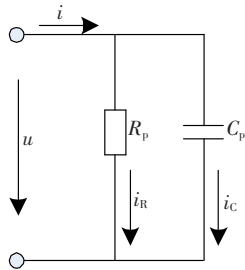


图7 电介质 RC 并联等效电路

### 2.1 采样数据长度变化的影响

在仿真实验中,取电网频率为 50 Hz,采样数据长度为 0.0196~0.0204 s,即采样点数在 980~1 020 点范围内变化(其中 1 000 点为整周期)。当采样点数不为 2 000,即采样长度不满足基波周期整数倍时,tan δ 相对测量误差的变化情况见图 8。图中曲线 1 为谐波分析法,曲线 2 为 HHT 分析法。可见,谐波分析法受采样长度影响较大,而笔者提出的算法则不受信号采样长度的影响,计算结果与 tan δ 的精确值十分接近。由此可见,采用新算法时不必满足严格的整周期采样条件,对数据长度无特别要求。

### 2.2 电压频率波动的影响

电力系统正常频率偏差允许值为 (50±0.2) Hz,当系统容量较小时,可放宽到 (50±0.5) Hz。频率波动会引起因非同步采样而带来的栅栏效应和频谱泄

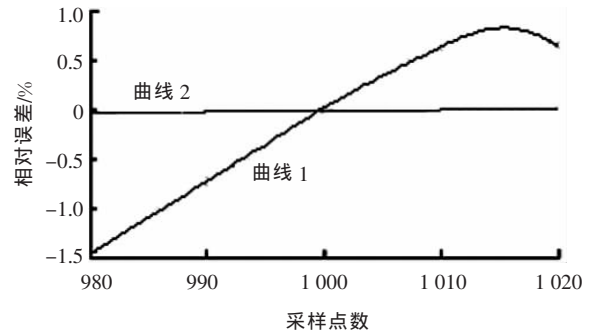


图8 tan δ 的测量误差随采样时间长度变化情况

露,影响介损的测量误差。电压频率为 49.5~50.5 Hz,其他仿真参数设置同上,tan δ 的相对测量误差见图 9。图中曲线 1 为谐波分析法,曲线 2 为 HHT 分析法。

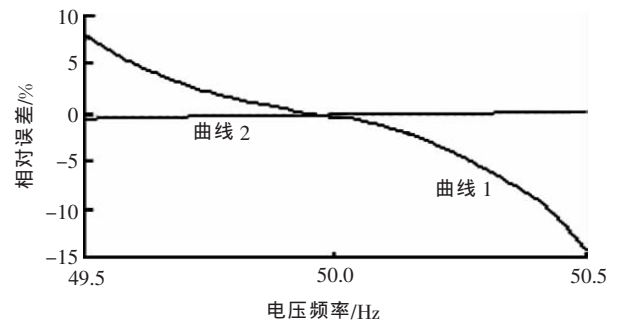


图9 tan δ 的测量误差随电压频率波动情况

### 2.3 电压谐波的影响

在容性电气设备的在线监测过程中,电网电压中谐波对 tan δ 测量的影响不容忽视。当电网中电压总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)为 0~10%时(主要为 3、5、7 次谐波),tan δ 相对测量误差见图 10。图中曲线 1、2 分别为谐波分析法与 HHT 分析法的相对测量误差,其值分别稳定在 0.002 1%与 0.002 4%。可见谐波分析法和 HHT 分析法由于只提取电压、电流中的基波分量进行计算,测量值均比较准确。

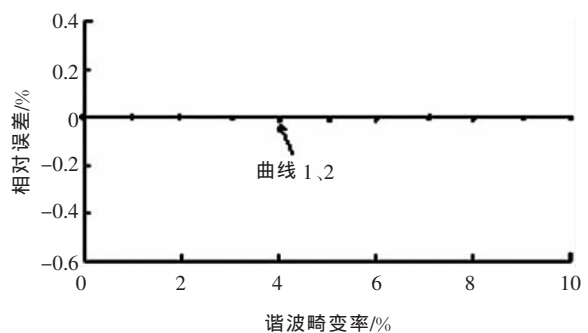


图10 tan δ 的测量误差随谐波畸变率情况

### 2.4 综合仿真

为定量比较谐波分析法与 HHT 法在介损实际检测中的准确度和稳定性,基于图 7 所示的电气绝

缘设备的并联等效模型进行了仿真分析。仿真中, 含有谐波成分的电网电压见式(11), 这里只考虑最主要的3次、5次和7次谐波分量

$$u(t) = \sin(\omega T + \phi_1) + 0.05\sin(3\omega T + \phi_3) + 0.09\sin(5\omega T + \phi_5) + 0.07\sin(7\omega T + \phi_7) \quad (11)$$

式(11)中,  $\omega$  为基波角频率,  $\phi_i$  ( $i=1, 3, 5, 7$ ) 为基波和谐波的初相位。电流信号  $i(t)$  可根据图7求出, 并

用此计算值作为已知的实际电流测量值以进行介损仿真。

以不同的采样频率和采样数量, 对49.5~50.5 Hz内每次变化0.1 Hz的模拟实测信号产生的不同幅值及初相位的信号进行模拟采样获得数据。表1示出了两种算法在以12位A/D精度、不同采样频率、不同采样数量、初相位均为0时对基波频率为49.5、

表1 不同算法仿真结果对比

| 采样周期/<br>采样数量<br>( $\mu\text{s}/\text{个}$ ) | 真实值/%   |         |         |         |         | 谐波分析法/% |         |         |         |         | HHT法/%  |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | 49.5 Hz | 49.8 Hz | 50.0 Hz | 50.2 Hz | 50.5 Hz | 49.5 Hz | 49.8 Hz | 50.0 Hz | 50.2 Hz | 50.5 Hz | 49.5 Hz | 49.8 Hz | 50.0 Hz | 50.2 Hz | 50.5 Hz |
| 39/512                                      | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.4518  | 0.4312  | 0.4007  | 0.3945  | 0.3901  | 0.4027  | 0.4056  | 0.3981  | 0.3972  | 0.3941  |
| 39/1024                                     | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.4871  | 0.4583  | 0.4031  | 0.3924  | 0.3865  | 0.4026  | 0.4045  | 0.3988  | 0.3968  | 0.3935  |
| 19.5/1024                                   | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.4518  | 0.4312  | 0.4007  | 0.3945  | 0.3901  | 0.4011  | 0.3978  | 0.3972  | 0.3954  | 0.3931  |
| 19.5/2048                                   | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.4871  | 0.4583  | 0.4031  | 0.3924  | 0.3865  | 0.4053  | 0.4026  | 0.3971  | 0.3958  | 0.3930  |
| 9.8/2048                                    | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.3943  | 0.3978  | 0.3967  | 0.3901  | 0.3823  | 0.4001  | 0.3995  | 0.3969  | 0.3962  | 0.3944  |
| 9.8/4096                                    | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.3885  | 0.3957  | 0.3953  | 0.3889  | 0.3785  | 0.4031  | 0.3988  | 0.3973  | 0.3959  | 0.3943  |
| 4.9/4096                                    | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.3943  | 0.3978  | 0.3967  | 0.3901  | 0.3823  | 0.4020  | 0.3976  | 0.3983  | 0.3970  | 0.3931  |
| 4.9/8192                                    | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.3885  | 0.3957  | 0.3953  | 0.3889  | 0.3785  | 0.3999  | 0.4003  | 0.3985  | 0.3969  | 0.3935  |
| 2.5/8192                                    | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.3625  | 0.3645  | 0.3913  | 0.3803  | 0.3213  | 0.4031  | 0.4010  | 0.3980  | 0.3962  | 0.3937  |
| 2.5/16384                                   | 0.4019  | 0.3995  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  | 0.3401  | 0.3412  | 0.3882  | 0.3792  | 0.2811  | 0.4028  | 0.3998  | 0.3979  | 0.3963  | 0.3939  |

49.8、50.0、50.2和50.5 Hz的仿真结果。仿真结果表明, HHT算法受电压频率波动、谐波的影响和采样频率的影响要远远优于谐波分析法。

### 3 结论

采用希尔伯特-黄变换来进行介质损耗因数的检测, 首先利用EMD将检测信号分解成 $n$ 个IMF, 取基波分量对应的IMF分量根据Hilbert变换求瞬时频率, 然后根据瞬时频率的相位参数求取介质损耗因数。仿真结果表明, 该方法的抗干扰能力强, 基本不受电压频率波动、非同步采样等因素的影响, 能有效地提取检测信号中的基波分量, 精确检测信号的频率和相位等参数信息, 可大大地提高介损因数检测的准确度。

### 参考文献:

- [1] 李泽文, 曾祥君, 覃丹, 等. 基于注入信号法的容性设备介损在线测量系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 57-60.
- [2] 李泽文, 曾祥君, 覃丹, 等. 基于FPGA的容性设备介损在线测量系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 92-96.
- [3] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] WANG P, RAGHUVEER M R, MCDERMID W, et al. A Digital Technique for the Online Measurement of Dissipation Factor and Capacitance [J]. IEEE Transactions on Dielectric Electrical Insulation, 2001, 8(2): 228-232.
- [5] SRINIVAS M B, SUZUOKIM Y, NAGAO K, et al. Dielectric Loss Behavior of Liquid Nitrogen in Uniform Fields Millimeter

- Gap [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 296-302.
- [6] 张黎, 李庆民, 王冠, 等. 基于瞬时功率变换的介损监测数字化算法[J]. 中国电机工程学报, 27(24): 35-42.
- [7] 王楠, 陈志业, 律方成. 容性设备绝缘监测与诊断技术综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 72-75.
- [8] 王楠, 律方成, 刘云鹏, 等. 自适应广义形态滤波方法在介损在线监测数据处理中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004,
- [9] 段大鹏, 江秀臣, 孙才新, 等. 基于正交分解的介损因数数字测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 127-133.
- [10] 陈天翔, 张保会, 张翰森, 等. 基于移相和平衡测量原理的介损在线测量方法[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 74-77.
- [11] 黄德祥, 曹建. 数据融合技术在电力设备在线监测系统数字滤波中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 31-33.
- [12] DJOKIC B, SO E. Phase Measurement of Distorted Periodic Signals Based on Nonsynchronous Digital Filtering [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(4): 864-867.
- [13] 王微乐, 李福祺, 谈克雄. 测量介损角的高阶正弦拟合算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(9): 5-8.
- [14] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 233-238.
- [15] 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 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.
- [16] 钟佑明. 希尔伯特-黄变换局瞬信号分析理论的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [17] 纪跃波, 秦树人. 有限区间信号边界效应问题的研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(4): 108-112.
- [18] 杨世锡, 胡劲松, 吴昭同, 等. 旋转机械振动信号基于EMD的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 102-107.