

基于小波滤波和跟踪微分器的 介质损耗因数检测方法

李天云, 范夕庆, 汪剑波, 余志飞

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

A Method to Detect Dielectric Loss Factor Based on Wavelet Filtering and Tracking Differentiator

LI Tianyun, FAN Xiqing, WANG Jianbo, YU Zhifei

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: In this paper a new method to detect dielectric loss factor is given, which applies wavelet filtering to voltage and current signals to obtain their fundamental components, then tracking differentiator is used to attain first-order differential of voltage signal, finally, according to voltage signal, current signal and first-order differential of voltage signal the dielectric loss factor can be calculated. Simulation results show that the proposed algorithm possesses determinate physical meaning, the calculation is simple accurate, so this method can be used in both on-line monitoring and off-line measurement of dielectric loss factor.

KEY WORDS: wavelet filtering; tracking differentiator; dielectric loss factor; linear fitting

摘要: 提出了一种新的介质损耗因数检测方法, 将电压与电流信号经过小波滤波得到基波分量, 利用跟踪微分器求得电压的一阶微分信号, 再根据电压信号、电流信号和电压一阶微分信号计算介质损耗因数。仿真结果表明: 该算法物理意义明确、计算简单、测量结果精确, 可用于介质损耗因数的离线测量与在线监测。

关键词: 小波滤波; 跟踪微分器; 介质损耗因数; 线性拟合

0 引言

介质损耗是指电介质在电场的作用下由于电导和极化发生的能量损耗。介质损耗因数是反映高压电气设备绝缘性能的重要指标之一, 是电容型高压设备绝缘在线监测的重要内容。由于其实际值通常约为 0.001~0.02 rad, 测量误差的绝对值约为 0.001~0.002 rad, 所以对测量的准确度有较高要求^[1]。

传统模拟测量方法主要有谐振法、伏安法和电桥法等。这几种方法测量准确度低, 已基本淘汰^[2-3]。近年来, 随着计算机、传感器以及数字信号处理技

术的发展, 介损角的测量方法可分为硬件法和软件法。硬件实现方法以过零点相位比较法、过零点电压比较法和改进西林电桥法为代表, 其处理环节多、累计误差大且补偿困难、抗干扰能力差、精确度难以保证。软件实现方法包括: 过零点时差比较法、过零点电压比较法、正弦波参数法、谐波分析法以及高阶正弦拟合算法等^[4-9]。其中谐波分析法因计算简便快速, 不受直流分量和谐波存在的干扰而成为介损角测量的典型方法。过零点时差比较法、过零点电压比较法、正弦波参数法、自由矢量法皆是在设计上都把试品的电压、电流假设为标准的正弦波, 只适用于试品的离线介损测量, 而不适用于含谐波干扰的介损角在线监测^[10-11]。

根据小波滤波和跟踪微分器, 本文提出了一种新的介质损耗检测方法。将电压与电流信号经过小波滤波得到基波分量, 利用跟踪微分器求得电压的一阶微分信号, 根据电压信号、电流信号和电压一阶微分信号计算介质损耗因数。仿真结果表明该方法便于计算、精度高。

1 小波滤波

1.1 信号的小波消噪

被检信号由于检测设备安装位置、外界电磁干扰等因素的影响, 其原始信号上往往会叠加各种噪声。采用小波变换进行滤波后, 上述情况得到了改善。小波消噪可以分为 3 个步骤进行:

- 1) 信号的小波分解。选择 1 个小波并确定小波分解的层次 N , 然后对信号进行 N 层小波分解。
- 2) 小波分解高频系数的阈值量化。小波降噪

采用软阈值来量化小波系数，即是将小波系数的绝对值和阈值进行比较，小于或等于阈值的小波系数置0；大于阈值的小波系数变为两者的差值。

3) 信号重构。利用小波分解的第 N 层低频系数和经过量化处理后的第1层到第 N 层的高频系数进行信号的小波重构。

1.2 信号的基波提取

小波变换采用的是不同尺度的分析方法，在信号的不同部位得到最佳的时域分辨率和频域分辨率，为非平稳信号的分析提供了一条可信的途径。小波空间的分解应用与信号处理，可实现信号在各频带上的分离。因此，将小波变换技术应用于介质损耗测量领域，可实现需求分量的有效分离。

2 一阶跟踪微分

为了消除或减弱噪声放大效应，采用如下的微分近似公式

$$\dot{v}(t) \approx \frac{v(t-\tau_1) - v(t-\tau_2)}{\tau_2 - \tau_1}, \quad 0 < \tau_1 < \tau_2 \quad (1)$$

式中 τ_1 、 τ_2 为时间常数。

式(1)的等价方框图见图1，延迟信号 $v(t-\tau_1)$ 和 $v(t-\tau_2)$ 分别由惯性环节 $1/(\tau_1 s+1)$ 和 $1/(\tau_2 s+1)$ 来产生，以降低噪声放大效应。其离散状态方程为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) - h\left(\frac{1}{\tau_1\tau_2}(x_1(k) - v(k)) + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1\tau_2}x_2(k)\right) \\ y(k) = x_2(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中： h 为积分步长； $x(k)$ 为 $x(t)$ 在 $t = kh$ 时刻的值。

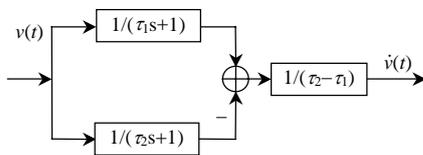


图1 等价方框图

Fig. 1 Equivalent block diagram

当系统输入信号含有噪声 $n(t)$ 时，输入信号为

$$v(t) = v_0(t) + rn(t) \quad (3)$$

式中 r 为放大系数。则系统的离散状态方程为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) - h\left(\frac{1}{\tau_1\tau_2}(x_1(k) - v(k)) + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1\tau_2}x_2(k)\right) + hr\frac{n(t)}{\tau_1\tau_2} \\ y(k) = x_2(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中：近似微分信号的噪声放大与积分步长 h 成正比，且与 τ_1 、 τ_2 成反比。因此，小时间常数的噪声放大作用是可以用小积分步长来补偿^[12-13]。

经小波滤波后的电压离散信号按式(2)进行一阶微分跟踪， x_1 跟踪 U ， x_2 跟踪 U 的一阶微分信号 U_1 。则有功电流 $I_R = x_1/R$ ；无功电流 $I_C = Cx_2$ ，介质损耗为

$$\tan \delta = \tan(90^\circ - \theta) = I_R / I_C \quad (5)$$

3 介质损耗计算步骤

1) 以 8 960 Hz 频率用锁相环同步采集电压信号 U 和电流信号 I 。

2) 提取 U 和 I 的基频分量。利用小波分解，提取 U 和 I 的第 5 层分量。由于现场测量中不仅有电压和频率的波动，同时还存在多种干扰，需多次试验来选择合适的的小波基函数。

3) 利用式(1)描述的跟踪微分器，求取 U 的一阶微分信号 U_1 。其中参数 h 、 τ_1 、 τ_2 的值通过多次试验来选取。

4) 对 U 、 I 和 U_1 按照 $I = U/R + CU_1$ 进行最小二乘线性拟合，可求得 C 和 R ，进而可得 I_R 、 I_C 。但应注意：小波滤波后信号的前 100 个点和最后的 100 个点，存在较大误差，计算时将其舍弃。

5) 根据式(5)求得介质损耗因数 $\tan \delta$ 。

4 数字仿真与测量误差分析

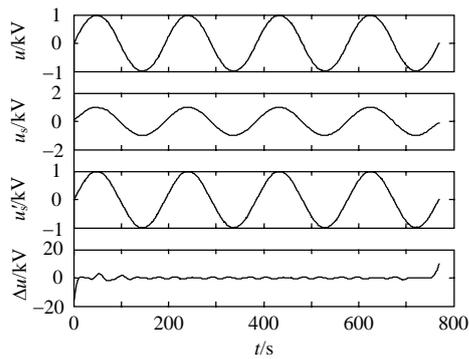
试验电压信号和电流信号分别为

$$u(t) = 1\,000 \sin(100\pi t) + 15 \sin(300\pi t + \pi/8) + \sin(500\pi t + \pi/6) + 0.1 \text{rand}(t)$$

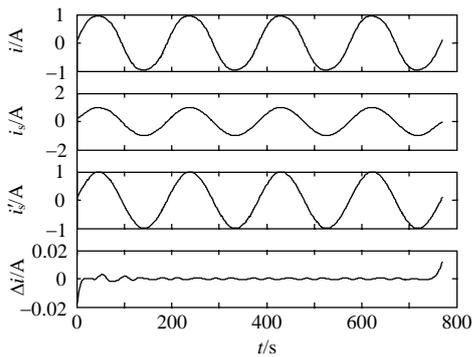
$$i(t) = \sin(100\pi t + \pi/2 - 0.008) + 0.1 \sin(300\pi t + \pi/7) + 0.015 \sin(500\pi t + \pi/3) + 0.001 \text{rand}(t)$$

使用小波滤波器实现信号的基波提取，系统采样频率为 8 960 Hz，使用 db6 小波进行 5 层分解，则第 5 层近似部分的频率范围为 0~140 Hz。电压、电流、电压的微分信号的滤波效果如图 2 所示。图中： u 、 u_5 、 u'_5 、 Δu 分别为原始电压信号、小波滤波后的电压信号、电压基波信号的理论值与电压误差信号； i 、 i_5 、 i'_5 、 Δi 分别为原始电流信号、小波滤波后的电流信号、电流基波信号的理论值与电流误差信号； u_1 、 u'_1 、 Δu_1 分别为电压的一阶微分跟踪信号、电压一阶微分跟踪信号的理论值与电压一阶微分跟踪信号的误差。

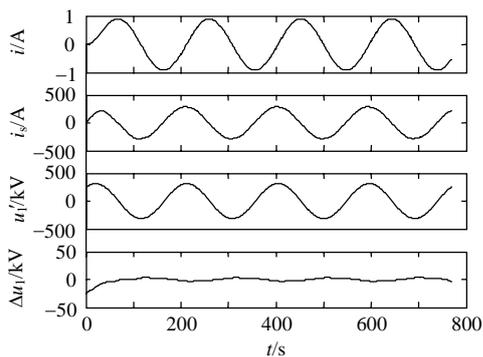
由图 2(a)、2(b)可知：用 db6 小波提取 U 、 I 的基波分量，其结果的精度高；由图 2(c)可知：跟踪



(a) 电压的仿真结果



(b) 电流的仿真结果



(c) 电压微分信号的仿真结果

图 2 仿真结果

Fig. 2 The simulation results

微分器不仅能够抑制噪声的影响、更准确地求出电压的微分信号，而且运算速度快。

对 U 、 I 和 U_1 的离散序列进行线性拟合，得到： $R = 125 \text{ k}\Omega$ ； $C = 3.183 \text{ }\mu\text{F}$ ； $\tan \delta = 0.008011$ 。

分别在频率无波动和有波动情况下，仿真测量了 U 的值，结果见表 1、2。

由表 1、2 可看出，当电压频率发生波动时，微分跟踪法测得误差无明显变化，但相关函数法误差明显变大^[14-15]。

表 1 无频率波动时电压的仿真测量结果

Tab. 1 Simulation results of U without frequency fluctuation

项目	U 理论值	U 测量值	测量误差
谐波相关法	0.813 2	0.8	0.053 2
微分跟踪法	0.801 1	0.8	0.001 1

表 2 频率发生波动时电压的仿真测量结果

Tab. 2 Simulation results of U with frequency fluctuation

项目	U 理论值	U 测量值	测量误差
相关函数法	0.8	0.894 1	0.094 1
微分跟踪法	0.8	0.801 3	0.001 3

5 结论

与现有方法相比，本文提出的基于小波滤波和跟踪微分的介质损耗因数数字化测量算法具有如下优点：

1) 仅需要一个或几个周期内的采样值，不受过零点偏移和多个过零点的影响。

2) 在正弦电压与畸变电压条件下均能够得到准确的测量结果。

3) 抗干扰能力强。不受电压频率波动影响，在电压频率波动时实时测量结果稳定。

4) 小波滤波器用来消除谐波电压和噪声的影响，去噪能力强，准确实现受污染电压信号的基波提取。

在应用该算法采用跟踪微分器进行拟合系数的求解时，需要较高的采样频率，并且要选择合适的小波基。

参考文献

- [1] Sundaram N. Measurement of capacitances and their loss factors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(4): 1083-1087.
- [2] Wang P, Raghuvver 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.
- [3] 丁晖, 申忠如, 刘君华. 基于小波和相关分析的虚拟介损在线检测仪[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 17-19.
Ding Hui, Shen Zhongru, Liu Junhua. On line measurement of dielectric loss tangent for capacitive-type equipment[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 17-19(in Chinese).
- [4] 蔡国雄, 甄为红, 杨晓洪, 等. 测量介质损耗的数字化过零点电压比较法[J]. 电网技术, 2002, 27(5): 15-18.
Cai Guoxiong, Zhen Weihong, Yang Xiaohong, et. al. A digitized zero cross point voltage method of comparison for measurement of dielectric losses[J]. Power System Technology, 2002, 27(5): 15-18(in Chinese).
- [5] 王楠, 律方成, 梁英, 等. 基于高精度 DFT 的介损数字测量方法[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 3-8.
Wang Nan, Lü Fangcheng, Liang Ying, et al. Digital measurement of dielectric loss based on high accuracy DFT algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(2): 3-8 (in Chinese).
- [6] 袁旭龙, 冯小华. 改进保留非线性算法在介损测量应用中的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 39-40.
Yuan Xulong, Feng Xiaohua. Research of the improved method of nonlinear reserved arithmetic applied in the measurement of dielectric

- loss[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 39-40(in Chinese).
- [7] 陈楷, 胡志坚, 王卉, 等. 介损角非同步采样算法及其应用[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 58-61.
Chen Kai, Hu Zhijian, Wang Hui, et al. Algorithm and application of dielectric loss angle based on asynchronous sampling[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 58-61(in Chinese).
- [8] Li Q, Zhao T, Siew W H. Definition and digital algorithms of dielectric loss factor for condition monitoring of high-voltage power equipment with harmonics emphasis[J]. IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 2005, 152(3): 309-312.
- [9] Yang Mingzhong, Liu Shaoyu, Wang Zhuo, et al. Error analysis for dielectric loss factor measurement based on harmonic analysis[C]// 2001 International Symposium on Electric Insulating Materials (ISEIM 2001), Himeji, Japan, 2001: 336-339.
- [10] 王楠, 陈志业, 律方成. 电容型设备在线监测与诊断技术综述[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 72-75.
Wang Nan, Chen Zhiye, Lü Fangcheng. A survey of on-line monitoring and diagnosis for capacitive equipment[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 72-75(in Chinese).
- [11] 蔡国雄, 胡兆明, 王建民. 介质损耗测量的过零点电压比较法[J]. 电网技术, 1995, 19(8): 1-5.
Cai Guoxiong, Hu Zhaoming, Wang Jianmin. Measuring dielectric loss by zero cross point voltage comparing method[J]. Power System Technology, 1995, 19(8): 1-5(in Chinese).
- [12] 国冬雪, 尹怡欣, 李安贵. 一种基于跟踪微分器的简单自适应控制算法[J]. 控制工程, 2007, 14(4): 356-358.
Guo Dongxue, Yin Yixin, Li Angui. Simple adaptive control algorithm based on tracking-differentiator[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(4): 356-358(in Chinese).
- [13] 韩京清, 袁露林. 跟踪—微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 268-273.
Han Jingqing, Yuan Lulin. The discrete form of tracking differentiator [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1999, 19(3): 268-273(in Chinese).
- [14] 王楠, 律方成, 李燕青, 等. 相关函数法计算容性设备的介损损失角正切[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(3): 22-25.
Wang Nan, Lü Fangcheng, Li Yanqing, et al. Calculation of $\tan \delta$ based on correlation function algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28(3): 22-25(in Chinese).
- [15] 黄晶, 颜运昌, 胡林. 基于小波和改进相关分析的介损测量方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 51-54.
Huang Jing, Yan Yunchang, Hu Lin. Dielectric loss measuring based on wavlet analysis and improved correlation function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 51-54(in Chinese).



李天云

收稿日期: 2010-10-25。

作者简介:

李天云(1945), 男, 教授, 从事自动控制理论、非线性系统理论的教学及其在电力系统中的应用研究;

范夕庆(1983), 男, 硕士研究生, 从事信号处理、非线性系统理论在电力系统中的应用研究,

E-mail: fanxiqing2007@163.com;

汪剑波(1984), 男, 硕士研究生, 从事信号处理、电能质量检测与控制;

余志飞(1986), 男, 硕士研究生, 主要研究电力参数的采集与处理。

(编辑 蒋毅恒)