

基于经验模态分解和正弦波参数法的介损角测量算法

李天云¹, 王静¹, 郭跃霞¹, 曹鑫²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012;
2. 石家庄信息工程职业学院 管理系, 河北省 石家庄市 050035)

Dielectric Loss Angle Measurement Algorithm Based on Empirical Mode Decomposition and Sine Wave Parameter Method

LI Tian-yun¹, WANG Jing¹, GUO Yue-xia¹, CAO Xin²

(1. Electrical Engineering Institute, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. Department of Management, Shijiazhuang Information Engineering Vocational College, Shijiazhuang 050035, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The authors apply the novel time-space filtering method based on empirical mode decomposition (EMD) to the measurement of dielectric loss angle. By use of EMD the signals sampled in strong noise background of are decomposed and according to the spectrum characteristics of obtained intrinsic mode components the selective filtering is conducted, then the fundamental component in the filtering results is extracted and combining with sine wave parameter method the dielectric loss angle is calculated. The impact of both system frequency variation and dielectric loss angle variation on measured true value is analyzed. Simulation results show that using the proposed method the calculation error can be evidently reduced; therefore the proposed method has practical meaning for improving the measurement accuracy of digitized measurement of dielectric loss angle.

KEY WORDS: empirical mode decomposition (EMD); time-space filtering; intrinsic mode components; dielectric loss angle; sine wave parameter method

摘要: 将基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的新型时空滤波方法应用于介损角的测量中。利用EMD对强噪声背景下的采样信号进行分解,根据所得到的固有模态分量的频谱特性进行选择滤波,提取其基波分量,并结合正弦波参数法计算介损角。探讨了系统频率变化和介损角变化对测量真实值的影响。仿真结果表明该方法可明显减小计算误差,对提高数字化测量 d 的精确性具有实际意义。

关键词: 经验模态分解(EMD); 时空滤波; 固有模态分量; 介损角; 正弦波参数法

0 引言

介质损耗角 d 是衡量介质发热和绝缘水平的一项重要指标,具有较高的敏感度和稳定性,其值通常约为0.001~0.02 rad,测量误差的绝对值应小于0.001~0.002 rad,即对测量的准确度提出了较高要求^[1-2]。 d 的测量技术发展迅速,在对所测得的数字信号进行处理分析方面形成了两大分支:一是通过硬件实现的检测方法,以过零点相位比较法、过零点电压比较法^[3]和改进西林电桥法为代表;二是通过软件来实现的检测方法,主要有谐波分析法^[4]、相关函数法^[5]和正弦波参数法^[6]等。理论上 $\tan d$ 是指工频电压下的介质损耗因数,因此只需测量基波信号的相位和幅值就可获得结果。但目前容性设备在线监测的一些研究成果表明,因工作电磁环境恶劣,致使在线采集数据含有大量谐波分量和随机干扰。介损角是微小值,对现场干扰十分敏感,真实值很容易与噪声相混淆^[7],由于采用传统方法的测量结果的稳定性、重复性较差且不准确,因此提取上述复杂信号的基波具有重要意义。

文献[8-11]提出了基于小波变换消噪的数据处理方法,可提高 d 求取精度,但存在小波基的选取问题。本文采用基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[12-14]的新型滤波方法——时空滤波^[15]方法滤除谐波分量和噪音,从噪声背景下的介损测量数据中有效提取基波分量并用正弦波

参数法来精确求解 d 。该方法克服了传统处理方法精度低的缺点,且无须预先设定任何基函数,具有处理精度高、自适应性强的特点。仿真结果表明,采用本文方法可提高 d 测量值的稳定性和准确度,并将误差缩小到允许范围以内。

1 经验模态分解滤波方法

1.1 固有模态函数和经验模态分解

EMD 方法通过对非线性、非平稳信号分解来获得一系列表征信号特征时间尺度的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),使得各 IMF 为单分量的幅值或频率调制信号,突出了原信号的局部特征信息。应用 EMD 进行分解时,首先找出信号 $s(t)$ 上的所有极值点,用三次样条曲线分别连接所有极大值点和极小值点形成 $s(t)$ 的上、下包络线,并确保 $s(t)$ 上所有点在上下包络线之间。定义上下包络线之间的均值为 m_1 , $s(t)$ 与 m_1 的差定义为 $g_{11} = s(t) - m_1$ 。如果 g_{11} 满足以下两个条件^[15]则为第 1 个 IMF: ①在整个时程内,极值点个数与过零点个数相等或最多差 1; ②上下包络线关于时间轴对称。如果 g_{11} 不满足上述条件则继续对其重复上述筛选过程。当经过 k 次筛选后 g_{1k} 满足 IMF 条件时, $s(t)$ 的第 1 个 IMF 分量为 $c_1 = g_{1k}$ 。随后,将 $s(t)$ 与 c_1 的差 $r(t) = s(t) - c_1$ 作为新的数据,重复上述筛选过程以得到第 2 个 IMF 分量 c_2 。当余量 r 小于预先设定的值或为单调函数时,整个筛选分解过程结束。本文采用分段三次 Hermite 插值求取信号的包络线,可很好地避免高次插值产生的龙格现象,该算法稳定性好,可保证收敛且在每个小段连续光滑。经过上述步骤后, $s(t)$ 可表示为

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

1.2 时空滤波方法

将采用 EMD 分解得到的各 IMF 分量按其频率从高到低依次排列,代表着信号的内在模态特征,体现了该方法的多分辨率特性,可以解释为以信号极值特征尺度为度量的时空滤波过程。通过 IMF 分量的组合能够构造一种新型滤波方式——时空滤波,滤波信号可表示为

$$s_{lh}(t) = \sum_{i=l}^h c_i(t) \quad (2)$$

式中: $l, h \in [1, 2, L, n]$, $l \leq h$ 。当 $l=1$ 且 $h < n$ 时,为高通滤波信号;当 $1 < l \leq h < n$ 时,为带通滤波

信号;当 $l > 1$ 且 $h = n$ 时,为低通滤波信号。

同时,可将 IMF 分量任意组合并突出某种特征以达到一定的分析目的。这种时空滤波的显著优点是滤波后的信号能够充分保留原始信号本身所固有的时频特征,该方法是基于信号局部特征实现的,因而具有更好的局部自适应性。

2 正弦波参数法的数学原理

设备运行电压设为 $u(t) = U_m \sin(\omega t + j_u)$, 电流设为 $i(t) = I_m \sin(\omega t + j_i)$ 。采用正弦波参数法通过模/数转换把电压、电流信号离散化为数字量后,应用一定的算法求得正弦波参数 U_m 、 j_u 、 I_m 、 j_i , 再计算出 i 超前 u 的相位差 j , 从而得到介质损耗角 d 。

若 $P_1 = U_m \cos j_u$, $P_2 = U_m \sin j_u$, $Q_1 = I_m \cos j_i$, $Q_2 = I_m \sin j_i$, 则电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 可以展开为

$$u(t) = P_1 \sin \omega t + P_2 \cos \omega t \quad (3)$$

$$i(t) = Q_1 \sin \omega t + Q_2 \cos \omega t \quad (4)$$

计算 P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 的一种方法是最小二乘算法。假定以采样率 f_s 从某一时刻开始采样,分别得到 N 对采样值 $u(t_j)$ 和 $i(t_j)$, $j = 1, 2, \dots, N$ 。设拟合信号与实际信号的总体误差平方和为

$$X = \sum_{j=1}^N [P_1 \sin \omega t_j + P_2 \cos \omega t_j - u(t_j)]^2 \quad (5)$$

$$Y = \sum_{j=1}^N [Q_1 \sin \omega t_j + Q_2 \cos \omega t_j - i(t_j)]^2 \quad (6)$$

为使其达到最小,有下式成立:

$$\begin{cases} \partial X / \partial P_1 = 0 \\ \partial X / \partial P_2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \partial Y / \partial Q_1 = 0 \\ \partial Y / \partial Q_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由以上公式可得线性方程组

$$\begin{cases} A^T A P = A^T B \\ A^T A Q = A^T C \end{cases} \quad (9)$$

解上述线性方程组即可求出 P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 , 式中:

$$A = \begin{pmatrix} \sin \omega t_1 & \cos \omega t_1 \\ \sin \omega t_2 & \cos \omega t_2 \\ \dots & \dots \\ \sin \omega t_N & \cos \omega t_N \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} u(t_1) \\ u(t_2) \\ \dots \\ u(t_N) \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} i(t_1) \\ i(t_2) \\ \dots \\ i(t_N) \end{pmatrix}; P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix}; Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix}。$$

另一种求取方法是基于三角函数正交性的算法,公式为

$$\begin{cases} P_1 = 2[\int_0^T u(t) \sin \omega t dt]/T \\ P_2 = 2[\int_0^T u(t) \cos \omega t dt]/T \\ Q_1 = 2[\int_0^T i(t) \sin \omega t dt]/T \\ Q_2 = 2[\int_0^T i(t) \cos \omega t dt]/T \end{cases} \quad (10)$$

信号 $u(t)$ 、 $i(t)$ 中的谐波及直流分量也可由三角函数的正交性得到消除。根据以上公式，通过数值积分法可求出 P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 。

在对信号 $u(t)$ 和 $i(t)$ 采样并求得 P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 后，就可根据式(11)算出 j_u 、 j_i ，进而得到 $j = j_i - j_u$ ， $d = p/2 - j$ [6]。

$$\begin{cases} j_u = \arctan(P_2/P_1) \\ j_i = \arctan(Q_2/Q_1) \end{cases} \quad (11)$$

3 数值仿真分析

d 数字化测量的数据采集环节是在现场提取被测设备的电压和电流信号，故信号中除了基波分量外还包含丰富的谐波分量与随机脉冲。这些干扰信息将会使计算出的 d 误差很大而失去测量意义，因此有效地实现基波提取是准确测量 d 的关键。

以电压、电流信号中的基波分量为基准，设电压、电流仿真信号为[7]：

$$\begin{aligned} u(t) &= \sin(2\pi ft) + 0.015 \sin(6\pi ft + j_{u3}) + \\ &\quad 0.005 \sin(10\pi ft + j_{u5}) + n_u(t) \\ i(t) &= \sin(2\pi ft + p/2 - d) + 0.02 \sin(6\pi ft + j_{i3}) + \\ &\quad 0.01 \sin(10\pi ft + j_{i5}) + n_i(t) \end{aligned}$$

式中： $f = [49.5, 50.5 \text{ Hz}]$ ； d 取为 0.001 rad ； j_{u3} 、 j_{u5} 、 j_{i3} 、 j_{i5} 分别为电压、电流信号中 3 次、5 次谐波分量的初相角； n_u 、 n_i 分别为电压、电流信号中的噪声分量，幅值为基波分量的 5%。

分别采用小波方法及 EMD 方法对上述数据进行分析，其中小波方法采用分频能力较强而计算量相对较小 db4 小波分解三层，提取的电压、电流基波分量如图 1 和图 2 所示。从图中可以看出，小波

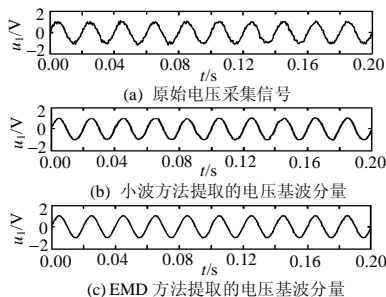


图 1 电压信号基波分量提取效果
Fig. 1 Effect of extracted fundamental component of voltage signal

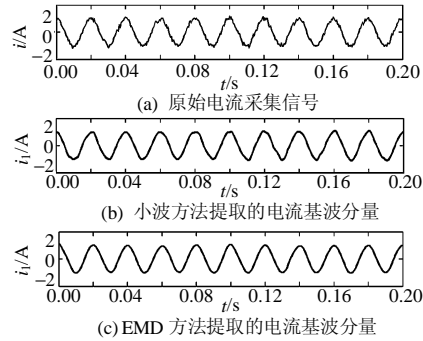


图 2 电流信号基波分量提取效果
Fig. 2 Effect of extracted fundamental component of current signal

方法和 EMD 方法都能有效抑制噪声，使上述复杂成分分离，提取出较为理想的基波分量。但小波分析方法实质上是用小波基的伸缩来逼近待分析信号，在实际应用中存在小波基和分解层数的选取问题，一般采用试探法解决该问题，但没有通用的原则。小波分析本质上是可调的窗口傅立叶变换，小波基函数的长度有限，在对信号作小波变换时会产生频谱泄漏现象。基于 EMD 的时空滤波与小波分解相比，不需要一组固定的基，完全根据信号本身的特点进行自适应分解，能有效实现基波分量提取。因此，本文采用的时空滤波方法为介损角测量提供了一种较为理想的数据处理方法。对提取出来的基波分量进行正弦波参数分析，即可得到介损角的测量数值。

表 1 是介损角为 0.003 rad 且频率变化时介损角绝对误差的仿真结果，表 2 为系统频率为 49.7 Hz 且介损角变化时绝对误差的仿真结果。正弦波参数法是 d 数字化测量中常用的软件算法，其特点是可消除谐波分量，但对脉冲分量却无法处理。由表 1、2 可知，正弦波参数法的测量结果较差，小波消噪后的测量结果较理想，但小波方法在实际应用中存在小波基的选取问题，自适应性较差。本文采用基于 EMD 的时空滤波方法改进了原有算法，克服了上述问题，一般可使介损角测量的绝对误差小于 0.0015 rad ，具有自适应性强、计算精度高的特点。

表 1 电网频率变化时 d 的计算结果
Tab. 1 Calculation results of d with the changing power system frequency

电网 频率/Hz	正弦波参数法		小波+正弦波参数法		EMD+正弦波参数法	
	$d/10^{-3} \text{ rad}$	$\Delta d/10^{-3} \text{ rad}$	$d/10^{-3} \text{ rad}$	$\Delta d/10^{-3} \text{ rad}$	$d/10^{-3} \text{ rad}$	$\Delta d/10^{-3} \text{ rad}$
49.5	10.1	7.1	8.5	5.5	1.7	-1.3
49.7	8.5	5.5	6.0	3.0	2.1	-0.9
50.0	6.2	3.2	4.8	1.8	3.1	0.1
50.3	8.1	5.1	6.3	3.3	1.9	-1.1
50.5	9.8	6.8	7.4	4.4	2.0	-1.0

表 2 d 变化时的计算结果

介损角/ rad	正弦波参数法		小波+正弦波参数法		EMD+正弦波参数法	
	$d/10^{-3}$ rad	$\Delta d/10^{-3}$ rad	$d/10^{-3}$ rad	$\Delta d/10^{-3}$ rad	$d/10^{-3}$ rad	$\Delta d/10^{-3}$ rad
2.0	5.4	3.4	3.8	1.8	2.2	0.2
4.0	8.1	4.1	6.1	2.1	3.7	-0.3
6.0	10.9	4.9	8.5	2.5	6.6	0.6
8.0	13.6	5.6	10.8	2.8	7.0	-1.0
10.0	16.4	6.4	13.3	3.3	11.2	1.2

4 结论

基于 EMD 的新型时空滤波是一种有效的多分辨率自适应消噪方法, 本文利用该方法提取基波分量, 不存在小波基和分解层数的选取问题, 具有处理精度高、滤波效果好的特点。采用引入时空滤波环节的正弦波参数法可有效抑制高次谐波和随机干扰对测量结果的影响, 仿真结果表明该方法在噪声背景下能实现介损角 d 的高精度测量。智能化、数字化是绝缘在线检测的发展方向, 下一步将着重研究基于 EMD 和正弦波参数法的介损角检测装置。

参考文献

- 柴旭峰, 关根志, 文习山, 等. $\tan\delta$ 高准确度测量的加权插值 FFT 算法[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 32-33.
Chai Xuzheng, Guan Genzhi, Wen Xishan, et al. The hanning-windowed interpolated algorithm for dielectric loss measurement with high accuracy[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(2): 32-33(in Chinese).
- 谈克雄, 李福祺, 张会平, 等. 提高电容型设备介损监测装置性能的意见[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 21-23.
Tan Kexiong, Li Fuqi, Zhang Huiping, et al. Advice for improving performance of on-line $\tan\delta$ monitoring devices for capacitive type equipment[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 21-23(in Chinese).
- 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, 26(7): 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, 26(7): 15-18(in Chinese).
- 尚勇, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 谐波分析法介质损耗因数测量的误差分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 67-71.
Shang Yong, Yang Minzhong, Wang Xiaorong, et al. Error analysis for the dielectric loss factor measurement based on Harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 67-71(in Chinese).
- 左自强, 徐阳, 曹晓珑, 等. 计算电容性设备介质损耗因数的相关函数法的改进[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 53-57.
Zuo Ziqiang, Xu Yang, Cao Xiaolong, et al. Improvement to correlation algorithm for dielectric dissipation factor calculation of capacitance equipments[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 53-57(in Chinese).
- 赵秀山, 谈克雄, 朱德恒, 等. 介损损耗角的数字化测量[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(9): 51-56.
Zhao Xiushan, Tan Kexiong, Zhu Deheng, et al. Study on digital measurements for dielectric loss angle[J]. Journal of Tsinghua Univ (Sci & Tech), 1996, 36(9): 51-56(in Chinese).
- 徐志钮, 律方成. 基于改进基波相位分离法的介损损耗角测量[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 41-45.
Xu Zhiniu, Lü Fangcheng. Dielectric loss angle measurement based on improved fundamental harmonic separation algorithm[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 41-45(in Chinese).
- 王楠, 律方成, 陈志业, 等. 小波变换用于介损数字化测量的仿真研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(5): 91-95.
Wang Nan, Lü Fangcheng, Chen Zhiye, et al. Simulation study on digital measurement of dielectric loss based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(5): 91-95(in Chinese).
- 党晓强, 刘俊勇, 刘念, 等. 小波消噪在容性设备 $\tan\delta$ 在线测量中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 45-48.
Dang Xiaoqiang, Liu Junyong, Liu Nian, et al. Study on wavelet denoising for $\tan\delta$ on-site digital measurement of capacitive type [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 45-48(in Chinese).
- 黄晶, 颜运昌, 胡林, 等. 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, et al. Dielectric loss measuring based on wavelet analysis and improved correlation function [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 51-54(in Chinese).
- 王楠, 律方成. 基于小波奇异性检测的在线监测数据处理[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 61-64.
Wang Nan, Lü Fangcheng. On-line monitoring data processing based on wavelet singularity detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 61-64(in Chinese).
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]. Proceedings of the Royal Society A, London, 1998: 903-995.
- Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annu. Rev. Fluid Mech, 1999, 41(5): 417-457.
- Wu Z, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[C]. Proceedings of the Royal Society A, London, 2004: 1597-1611.
- 李天云, 高磊, 陈晓东, 等. 基于 HHT 的同步电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 153-158.
Li Tianyun, Gao Lei, Chen Xiaodong, et al. Parameter identification of synchronous machine based on Hilbert-huang transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 153-158(in Chinese).

收稿日期: 2007-09-23.

作者简介:

李天云(1945—), 男, 教授, 从事自动控制理论、信号处理、非线性理论及其在电力系统中的应用研究与教学工作;

王静(1981—), 女, 硕士研究生, 研究方向为非线性系统理论在电力系统中的应用, E-mail: wangjing_2005122@sina.com;

郭跃霞(1981—), 女, 硕士研究生, 研究方向为非线性系统理论在电力系统中的应用;

曹鑫(1981—), 女, 助教, 研究方向为管理信息系统的开发与应用。

(责任编辑 王金芝)