

结合频率信息的相关函数法用于介质损耗的测量

徐志钮, 律方成

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 当电力系统频率波动时用相关函数法计算介质损耗(介损)存在误差, 为了提高精确度提出了结合频率信息的改进相关函数法。改进算法使用加汉宁(Hanning)窗插值算法获得电力系统频率, 然后根据频率和抛物插值公式获取整周期的采样序列, 对所得整周期的采样序列采用基于辛卜生公式的改进相关函数法计算介损。原算法与改进算法的仿真结果表明改进算法精确度远高于原算法, 信号频率为49~51 Hz范围内它使介损最大误差从 10^{-2} 减少到了 10^{-4} , 针对实测信号改进算法的精确度也远高于原算法, 表明改进算法能有效减轻频率波动给介损测量带来的误差。

关键词: 介质损耗; 频率测量; 汉宁窗; 相关函数法; 非整周期采样; 辛卜生公式

Application of correlation function method integrated with frequency information to measurement of dielectric loss

XU Zhi-niu, Lü Fang-cheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Dielectric loss calculated by correlation function method has large error when signal frequency is different from power frequency. For improving the accuracy, modified correlation function method integrated with frequency information is presented. Hanning windowing interpolation algorithm is used to acquire signal frequency, integral period signal is gotten based on the signal frequency and the parabolic interpolation formulas. The modified correlation function method based on Simpson formulas is used to calculate dielectric loss. Dielectric loss of simulation signal is calculated by the original algorithm and the improved algorithm, the result indicates that the accuracy of the improved algorithm is much higher than that of the original one, the maximal error decrease from 10^{-2} to 10^{-4} after using of the proposed algorithm when the signal frequency is in the range of 49 to 51Hz, so the algorithm can alleviate error caused by frequency fluctuation effectively.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China(No.2009CB724508).

Key words: dielectric loss; frequency measurement; Hanning window; correlation function method; asynchronous sampling; Simpson formulas

中图分类号: TM835.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0060-04

0 引言

介损反映绝缘中有功损耗与无功损耗的比值, 是表征绝缘状况的一个重要指标。其测量方法分为硬件法和软件法, 由于硬件方法环节多、调整不方便, 在抵抗外界干扰的性能有待提高; 目前介损测量以软件方法为主, 其典型方法有相关函数法^[1-2]、正弦拟合法^[3-4]和傅立叶变换算法^[5-6]等。其中相关函数法原理简单、实现容易、采样频率和采样点数选择灵活, 在介损测量中已有应用^[1]。但由于电力

系统信号的时变性, 非同步采样很难避免, 当频率偏离稍大时相关函数法容易产生较大误差。本文提出了一种改进的相关函数法, 该方法使用一种快速的加汉宁窗插值傅立叶算法^[7]获得信号频率, 然后根据获得的频率截取整周期信号, 并采用抛物插值算法获得积分区间边界点的值, 最后使用基于辛卜生公式的相关函数法对整周期的信号计算介损, 仿真和实测信号的计算验证了算法能在较大程度上提高相关函数法在非整周期采样时的精确度。

1 相关函数法

采用49~51 Hz的窄带通FIR滤波器滤除电压和电流信号中的谐波后, 电压信号 $u(t)$ 和电流信

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB724508)

号 $I(t)$ 近似表示为:

$$u(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$i(t) = B \sin(\omega t + \theta + \pi/2 - \delta) \quad (2)$$

式中, δ 为介损角, 为一个很小的值。

两信号的自相关和互相关函数^[1]为:

$$R_u(0) = \frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt = \frac{A^2}{2} \quad (3)$$

$$R_i(0) = \frac{1}{T} \int_0^T (i(t))^2 dt = \frac{B^2}{2} \quad (4)$$

$$R_{ui}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{AB}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \quad (5)$$

$$\tan \delta \approx \sin \delta = \frac{R_{ui}(0)}{\sqrt{R_u(0)R_i(0)}} \quad (6)$$

式中, T 为整数个周期信号的时间。

2 加汉宁窗插值的谐波分析法

设离散信号 $x(n)$ 的 DFT 所得结果为 $X(n)$, 则加汉宁窗^[7]后信号傅立叶变换所得结果如式(7):

$$X_w(n) = \frac{1}{2} X(n) - \frac{1}{4} X(n-1) - \frac{1}{4} X(n+1) \quad (7)$$

设信号基波频率为 f , 采样所得信号频率分辨率为 Δf , 有式(8)成立

$$f = (k + \Delta k)\Delta f \quad (8)$$

式中: k 为整数; Δk 为小数。

当使用加汉宁窗插值时, 关于 Δk 利用谱峰主瓣内谱线的重心有如式(9)的快速算法^[7]:

$$\Delta k = \begin{cases} \frac{2|X_w(k+1)| - |X_w(k)|}{|X_w(k+1)| + |X_w(k)|}, & |X_w(k+1)| \geq |X_w(k-1)| \\ \frac{|X_w(k)| - 2|X_w(k-1)|}{|X_w(k)| + |X_w(k-1)|}, & |X_w(k+1)| < |X_w(k-1)| \end{cases} \quad (9)$$

将 Δk 代入式(8)即可求得基波频率的准确值。

使用加汉宁窗插值算法获得信号频率时, 增加的计算量很少, 但精确度较高。

3 结合频率信息的改进算法

在使用相关函数法计算介损时发现, 相关函数法在同步采样时测量所得介损的准确度较高, 随着信号频率偏离理想值、非整周期采样严重程度的增加误差增大, 影响了计算所得介损的精确度, 如第4节表1所示。其原因是因为信号频率是变化的量, 根据实际的采样频率采集得到的信号直接使用相关函数法进行计算不满足整周期形式, 可以在获得信号频率的基础上截取整周期的采样序列, 从而在理论上避免非整周期所导致的误差。

3.1 整周期边界点的确定

由于采样频率可能不为信号实际频率的整数倍。所以整周期信号的边界点未必在采样点上, 需要使用插值获得边界点的信号值。由于不同采样情况下边界点是随机的, 正弦信号在不同点上有不同的斜率, 在斜率变化稍快的区间线性插值误差较大, 但抛物插值具有较好的适应性, 通常误差相对较小, 因此文中选择抛物插值。

设 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 为已知点, 则根据抛物插值公式 x 处的值为

$$P_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}y_1 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}y_2 \quad (10)$$

设采样频率为 f_s ; 根据获得的基波频率得到采样信号最长整周期时间长度为 t ; 对应最大整数个采样点数 $N = \text{floor}[f_s t]$, 其中 $\text{floor}[a]$ 获得不大于 a 的最大整数; $e = f_s t - N$, $0 \leq e \leq 1$; 设边界点对应的前两个采样值分别为 $U(N-1)$ 和 $U(N)$, 后一个采样值为 $U(N+1)$, 则对于电压信号, 将 $x_0 = -1$; $x_1 = 0$; $x_2 = 1$; $y_0 = U(N-1)$; $y_1 = U(N)$; $y_2 = U(N+1)$ 代入式(10), 则整周期电压信号边界点的值 U_b 为

$$U_b = \frac{e(e-1)}{2} U(N-1) - (e^2 - 1) U(N) + \frac{e(e+1)}{2} U(N+1) \quad (11)$$

同理电流信号边界点的值 I_b 为

$$I_b = \frac{e(e-1)}{2} I(N-1) - (e^2 - 1) I(N) + \frac{e(e+1)}{2} I(N+1) \quad (12)$$

最终整周期的电压信号 $U_1(n)$ 和电流信号 $I_1(n)$ 分别表示如式(13)、(14):

$$U_1(n) = \begin{cases} U(n), & 0 \leq n \leq N \\ U_b, & n = N + 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$I_1(n) = \begin{cases} I(n), & 0 \leq n \leq N \\ I_b, & n = N + 1 \end{cases} \quad (14)$$

3.2 插值积分公式的选取

文献[1]采用的是矩形公式, 它假设在一个小区间内信号值不变, 因此当信号变化速率较大时该算法存在较大误差, 适当使用插值公式可以减少误差。本文对梯形公式(线性插值后积分)和辛卜生公式(抛物插值后积分)进行了比较, 发现基于辛卜生公式的算法计算所得介损的误差要小于基于梯形公式算法的误差, 因此本文选择基于辛卜生公式的算法。

设最大整数个采样点数 $N = 2M + l$, $l = 0, 1$, 则基于辛卜生公式(最后几点采用梯形公式)的相关函数法计算公式如下:

$$R_u(0) = \frac{2}{6} \sum_{n=0}^{M-1} (U_1^2(2n) + 4U_1^2(2n+1) + U_1^2(2n+2)) + \frac{1}{2} \sum_{n=2M+1}^N (U_1^2(N-1) + U_1^2(N)) + \frac{e}{2} (U_1^2(N) + U_1^2(N+1)) \quad (15)$$

$$R_i(0) = \frac{2}{6} \sum_{n=0}^{M-1} (I_1^2(2n) + 4I_1^2(2n+1) + I_1^2(2n+2)) + \frac{1}{2} \sum_{n=2M+1}^N (I_1^2(N-1) + I_1^2(N)) + \frac{e}{2} (I_1^2(N) + I_1^2(N+1)) \quad (16)$$

$$R_{ui}(0) = \frac{2}{6} \sum_{n=0}^{M-1} (U_1(2n)I_1(2n) + 4U_1(2n+1)I_1(2n+1) + U_1(2n+2)I_1(2n+2)) + \frac{1}{2} \sum_{n=2M+1}^N (U_1(N-1)I_1(N-1) + U_1(N)I_1(N)) + \frac{e}{2} (U_1(N)I_1(N) + U_1(N+1)I_1(N+1)) \quad (17)$$

将式(15)~(17)计算所得 $R_u(0)$ 、 $R_i(0)$ 、 $R_{ui}(0)$ 代入式(6)即可获得介损。

4 仿真与实验结果的分析

4.1 仿真效果比较

以阻容串联电路模拟电容型电气设备,其中电阻 $R=22.76 \text{ k}\Omega$; 电容 $C=591.02 \text{ pF}$ 。A/D 量化位数为 12 位; 采样频率为 2 kHz; 信号频率 f 在电力系统允许的 49.5~50.5 Hz 范围内选择 5 个仿真点; 采样持续时间为 0.1 s; 信号初始相角对计算所得介损有影响, 为了更加全面地反映算法性能, 采样起始时刻变化使信号基波初始相角在 $0 \sim 2\pi$ 内均匀取 100 个仿真点, 信号频率固定时计算所得介损误差的最大值、最小值、均值和标准差作为指标衡量算法的精确度, 文献[1]提出的相关函数法和本文提出的改进算法计算误差如表 1 所示。

表 1 两种算法在频率波动时介损计算误差

Tab.1 Dielectric loss calculation error of the two algorithms

		when frequency fluctuation				
频率/Hz		49.5	49.7	50	50.3	50.5
原算法	最大值	996	602	1.58	595	978
	最小值	-997	-601	-3.08	-593	-976
	标准差	709	428	1.72	423	695
改进算法	最大值	5.49	6.15	3.74	4.35	2.38
	最小值	6.58	5.60	10.9	3.78	-2.45
	标准差	4.05	3.43	3.66	1.65	1.05

注: 表 1 中介损误差的最大值、最小值、均值、标准差的单位均为 10^{-5} rad 。

从表 1 可以看出, 当信号频率在 50 Hz 附近时原相关函数法误差较小, 误差随着频率偏离 50 Hz

程度的增加而增大, 偏离 0.5 Hz 时误差接近 10^{-2} rad 。本文提出的基于加汉宁窗插值算法的改进相关函数法能有效减轻频率波动给介损测量带来的误差, 当信号频率在 49.5~50.5 Hz 范围内波动时计算所得介损误差都很小, 最大值为 10^{-4} rad , 而且误差随频率偏离程度的增加没有增大的趋势。

4.2 实验效果比较

以电阻和电容串联模拟电容型设备, 通过任意波形发生器 33120A 产生 49~51 Hz 的正弦电压, 通过 TDS2024 示波器测量电压和电流信号, 两种算法得到介损随频率变化如图 1 所示。

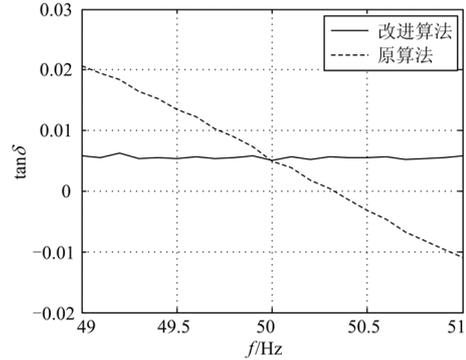


图 1 实测信号两种算法结果的比较

Fig.1 Result comparison of the two algorithms as for measured signal

由于元器件中含有杂散分量, 不能仅仅根据电阻、电容值计算介损, 应根据 50 Hz 时原算法针对不同起始采样时刻结果的均值作为真实值, 得介损在 50 Hz 时的真实值为 5×10^{-3} 左右。原算法随频率偏离 50 Hz 越大则介损误差越大, 偏离 1 Hz 时误差为原值的 3 倍左右, 达 1.6×10^{-2} , 而本文的改进算法不同, 随频率在 49~51 Hz 范围内接触角波动范围为 $0 \sim 1.2 \times 10^{-3}$, 显示了较好的稳定性。

5 结论

提出结合信号频率信息的改进相关函数法, 该方法使用加汉宁窗插值算法获得信号频率, 然后根据信号频率和抛物插值截取整周期形式的采样序列, 使用基于辛卜生公式的改进相关函数法计算介损。仿真信号计算结果表明: 不存在谐波但频率偏离正常值时, 该算法仍然能获得高准确性的介损值, 误差不随频率偏离程度的增加有增大的趋势。实测信号计算结果也表明本文算法的精确度远高于原相关函数法。

参考文献

[1] 曹宇亚, 申忠如, 任稳柱. 介质损耗带电检测数字化

- 处理方法的研究[J]. 高压电器, 2000, 36 (3): 17-19.
CAO Yu-ya, SHEN Zhong-ru, REN Wen-zhu. Study of digital process method for dielectric loss detection with charge[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36 (3): 17-19.
- [2] 王楠, 律方成, 李燕青, 等. 相关函数法计算容型设备介质损耗角正切[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28 (3): 22-25.
WANG Nan, Lü Fang-cheng, LI Yan-qing, et al. Calculation of $\tan\delta$ based on correlation function algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28 (3): 22-25.
- [3] 王微乐, 李福祺, 谈克雄. 测量介质损耗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.
WANG Wei-le, LI Fu-qi, TAN Ke-xiong. Higher-order sine fitting algorithm for dielectric loss measurement[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2001, 41 (9): 5-8.
- [4] 徐志钮, 律方成, 汪佛池, 等. 用加 Hanning 窗插值高阶正弦拟合测介损角[J]. 高电压技术, 2007, 33 (4): 50-53.
XU Zhi-niu, Lü Fang-cheng, WANG Fo-chi, et al. Application of higher-order sine fitting algorithm with hanning-windowed interpolated in dielectric loss angle measurement[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (4): 50-53.
- [5] 陈楷, 王卉, 张承学. 介损角测量中非同步采样算法的研究[J]. 继电器, 2004, 32 (14): 5-7.
CHEN Kai, WANG Hui, ZHANG Cheng-xue. Research on dielectric loss angle measurement in the condition of nonsynchronous sampling[J]. Relay, 2004, 32 (14): 5-7.
- [6] 徐志钮, 律方成, 姚辉, 等. 改进基波相位分离法在介损角测量中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 29-31, 49.
XU Zhi-niu, Lü Fang-cheng, YAO Hui, et al. Application of modified fundamental harmonic separation algorithm based on hanning-windowed interpolation in measurement of dielectric loss angle[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 29-31, 49.
- [7] 谢明, 丁康. 频谱分析的校正方法[J]. 振动工程学报, 1994, 7 (2): 172-179.
XIE Ming, DING Kang. Rectifying technique of spectrum analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1994, 7 (2): 172-179.

收稿日期: 2009-12-23

作者简介:

徐志钮 (1979-), 男, 博士生, 研究方向为电力系统外绝缘、电气设备状态监测与故障诊断、电力系统谐波分析;
E-mail: wzcjxx@sohu.com

律方成 (1963-), 男, 教授, 博士, 博导, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、高电压与绝缘技术。

(上接第 10 页 continued from page 10)

- FENG Yu-cheng, CHEN Chen. Comparison and analysis between static synchronous compensator and traditional static var compensator[J]. Power of East China, 2005, 33 (9): 16-19.
- [11] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [12] 马玉龙, 肖湘宁, 陈琦, 等. 用于HVDC控制保护系统闭环测试的RTDS建模[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (2): 25-27.
MA Yu-long, XIAO Xiang-ning, CHEN Qi, et al. Modelling of HVDC in RTDS for closed loop system test [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 25-27.
- [13] 郑三立, 雷宪章, 黄梅, 等. HVDC 和FACTS 控制与保护系统的实时测试技术[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (6): 90-94.
ZHENG San-li, LEI Xian-zhang, HUANG Mei, et al. Real-time testing for control and protection systems of HVDC and FACTS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19 (6): 90-94.
- [14] 龙英, 马玉龙, 曾南超, 等. RTDS 应用于直流控制保护系统的仿真试验[J]. 高电压技术, 2005, 31 (8): 56-58.
LONG Ying, MA Yu-long, ZENG Nan-chao, et al. Application of real time digital simulator in simulation test of HVDC control and protection system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (8): 56-58.
- [15] 赵洋. 静止同步串联补偿器控制策略及抑制次同步谐振的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [16] 陕西国华锦界能源有限责任公司. 陕西国华锦界能源有限责任公司#1机组励磁系统模型和参数测试报告[R]. 西安: 2008.

收稿日期: 2009-11-27; 修回日期: 2010-03-17

作者简介:

高本锋 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统次同步振荡抑制技术; E-mail: gaobenfeng@126.com

肖湘宁 (1953-), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量方面的研究工作;

赵成勇 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制。