

文章编号: 1001-1609(2006)05-0365-03

结合频谱校正的修正理想采样频率方法用于介损角测量

徐志钮, 律方成, 赵丽娟, 李和明

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

The Dielectric Loss Angle measurement Combined Modified
Ideal Sampling Frequency with Spectrum Rectifying

XU Zhi-niu, LU Fang-cheng, ZHAO Li-juan, LI He-ming

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

摘要: 提出了结合频谱校正方法和修正理想采样频率的介损角测量方法, 该方法使用加 Hanning 窗插值的谐波分析法获得信号基波频率的准确值, 然后根据获得的频率采用线性插值的方法构造符合同步采样的序列并进行 DFT, 进而获得信号的介损角。仿真信号的计算结果表明, 该算法精确度高、实现容易, 是介损角测量的一种很有推广价值的方法。

关键词: 介损角; Hanning 窗; 修正理想采样频率; 谐波分析法

中图分类号: TM835.4

文献标识码: A

Abstract: Error of dielectric loss angle measurement can be alleviated in asynchronous sampling by adopting modified ideal sampling frequency method, and the accuracy of calculation result can be improved. But the method needs to get the fundamental harmonic frequency of signal beforehand. The dielectric loss angle measurement combined modified ideal sampling frequency with spectrum rectifying is presented in the paper. In this method, signal frequency is acquired by harmonics analysis method based on hanning-windowed interpolation, then, the array of asynchronous sampling is set up according to the frequency obtained. The dielectric loss angle of equipment is obtained by DFT. Simulation results show that this algorithm has high accuracy, and easy to realize, which is a worthy method for dielectric loss angle measurement.

Key words: dielectric loss angle; hanning window; modified ideal sampling frequency; harmonic analysis method

0 引言

正常运行时电容型设备的介损角是一个微小量,

很容易因为误差而掩盖其真实值, 所以人们提出了各种基于软件的方法去减少这些干扰导致的误差, 主要有谐波分析法^[1]、相关函数法^[2]和高阶正弦拟合法^[3]。其中谐波分析法基于离散傅立叶变换, 原理简单、实现容易, 但在非同步采样时存在频谱泄漏和栅栏效应, 影响介损角测量的准确性。文[4]提出了修正理想采样频率方法提高谐波分析的准确度, 该方法的主要思想是通过在每个采样点进行修正来得到符合同步采样的序列, 从而减少频谱泄漏和栅栏效应。文[5]将修正理想采样频率方法用于介损角测量, 提高了测量所得介损角的精确度, 该方法需要获得准确的信号基波频率, 但该文并未给出获得信号基波频率的方法, 可以使用硬件的方法获得信号频率, 但增加了系统的硬件环节。

为了克服这个问题, 笔者提出了一种使用软件方式获得信号频率准确值的方法, 即用加 Hanning 窗插值谐波分析法获得准确的信号基波频率, 根据基波频率修正原采样序列, 使之符合同步采样的要求, 然后使用 DFT 获得电气设备的介损角, 通过仿真信号的计算验证了本文提出方法的有效性。

1 修正理想采样频率方法

离散傅里叶变换处理的是加矩形窗后的信号, 根据傅里叶变换原理, 时域乘积等于频域卷积, 导致了信号频谱泄漏到其它频段, 这就是频谱泄漏。当信号频率不在离散傅里叶变换的频率分辨点上时, 直接用傅里叶变换所得结果与原信号有所不同, 这就是栅栏效应。在同步采样情况下, 傅里叶变换所得结果对应的频率刚好为信号所在频率, 频谱泄漏和栅栏效应不会显现。在非同步采样时傅里叶变换所得频率不是信号的实际频率, 就产生了频谱泄漏和栅

收稿日期: 2006-03-02

作者简介: 徐志钮(1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

栏效应。

设电力系统信号为式(1):

$$s(t) = \sum_{k=0}^N s_k \sin(k t + \varphi_k) \quad (1)$$

式中: N 为谐波最高次数; s_k 为第 k 次谐波幅值; 为信号基波角频率; φ_k 为第 k 次谐波初始相角。

根据泰勒级数展开:

$$\sin(k t + \varphi_k) = \sin(k t_0 + \varphi_k) + k (t - t_0) \cos(k t_0 + \varphi_k) + o(t - t_0) \quad (2)$$

当采样频率相对最高次谐波频率较大时, $o(t - t_0)$ 可以忽略, 式(2)就变为式(3):

$$\sin(k t + \varphi_k) = \sin(k t_0 + \varphi_k) + k (t - t_0) \cos(k t_0 + \varphi_k) \quad (3)$$

所以:

$$s(t) = s(t_0) + a(t - t_0) \quad (4)$$

$$a = \sum_{k=0}^N s_k k \cos(k t_0)$$

当 $o(t - t_0)$ 较小可以忽略时, 可以认为 $s(t)$ 围绕 t_0 在较小范围内服从式(4)分布, 由于不知道各次谐波分量, 可以用线性拟合获取式(4)中 a 的值, 在获得 a 的值以后根据式(4)就可以获得 t_0 邻近点的值。

在确定了插值公式后需要获得修正后的采样频率和采样点数才能将原信号序列修正为符合同步采样要求的序列。设 f_r 为信号实际的基波频率; f_s 为实际的采样频率; f_s 为理想采样频率; N 为实际采样点数; N_i 为理想采样点数, 需要使 f_s 和 N_i 满足下面两式才能满足同步采样的要求。

$$f_s = k_1 f_r; \quad N_i = k_2 \frac{f_s}{f_r} \quad (5)$$

式中: k_1, k_2 为正整数; 同时要求 f_s 和 N_i 尽量接近 f_s 和 N 。

2 基于加 Hanning 窗插值的频率测量

$N+1$ 点的 Hanning 窗函数^[6]为:

$$w(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2}{N+1}n\right), \quad n=0, 1, \dots, N$$

Hanning 窗是余弦窗的一种, 余弦窗的优点是加窗对信号 DFT 的影响可以在频域中处理。设离散信号 $x(n)$ 的 DFT 所得结果为 $X(n)$, 则加 Hanning 窗后信号 DFT 所得结果:

$$X_w(n) = \frac{1}{2}X(n) - \frac{1}{4}X(n-1) - \frac{1}{4}X(n+1) \quad (6)$$

设信号采样持续时间为 t 、频率分辨率 $f=1/t$, 对于信号基波频率 f , 有:

$$f = (k + \varphi) f \quad (7)$$

式中: k 为整数; φ 为小数。

当使用 Hanning 加窗插值时, 有:

$$k = \begin{cases} \frac{2|X_w(k+1)| - |X_w(k)|}{|X_w(k+1)| - |X_w(k)|}, & \text{当 } |X_w(k+1)| > |X_w(k-1)| \text{ 时;} \\ \frac{|X_w(k)| - 2|X_w(k-1)|}{|X_w(k)| + |X_w(k-1)|}, & \text{当 } |X_w(k+1)| < |X_w(k-1)| \text{ 时.} \end{cases} \quad (8)$$

将 k 代入式(7)即可求得信号基波频率的准确值。因为计算信号基波频率时关注的是 $X_w(k-1)$, $X_w(k)$ 和 $X_w(k+1)$, 所以使用加 Hanning 窗插值谐波分析法时没有必要对时域信号加 Hanning 窗, 只要对原信号 DFT 所得结果使用式(6)计算即可获得加 Hanning 窗后信号的 DFT 所得结果, 甚至可以根据 DFT 计算公式仅仅计算 k 点及邻近 k 前后各两点的 DFT 即可。因此, 加 Hanning 窗插值算法较 DFT 算法增加的计算量很少, 该算法的速度非常快。

3 采样频率谐波分析法

当采样频率远大于信号谐波的频率时, 基于修正采样频率的谐波分析法具有很好的效果, 该方法的关键问题是如何获得信号基波频率的准确值。可以采用硬件的方法实时跟踪信号频率, 但该方法增加了硬件环节, 笔者尝试采用软件的方法获得信号基波频率, 提出使用加 Hanning 窗插值谐波分析法获得信号基波频率的准确值, 根据获得的频率调整采样所得序列, 进行 DFT 后可获得电气设备的介损角。该方法减少了硬件环节, 同时加 Hanning 窗插值算法能获得准确的信号基波频率, 所以该方法计算所得介损角有较好的精确度。结合算法的计算步骤如下:

(1) 计算原信号的 DFT, 根据式(7)获得信号的基波频率的准确值;

(2) 根据式(5)确定理想采样频率 f_s 和理想采样点数 N_i ;

(3) 根据理想采样频率 f_s 和采样点数 N_i 确定理想采样时间序列, 对时间序列上的每个点采用插值方法确定理想采样序列;

(4) 对获得的理想采样序列使用 DFT, 获得电流和电压信号基波相角, 二者之差的余角即为介损角。

4 算法效果和分析

为了验证笔者提出方法的效果, 在不存在和存在谐波情况下用该方法计算介损角。采样频率为 1 kHz, 采样点数为 1 000, A/D 量化位数为 12, 由于介损角计算值与采样开始时信号的初始相角有关, 故初始相角从 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀取 100 个点, 每个频率点有 100 个介损值, 用计算所得介损角误差的最大值、最小值、均值和标准差衡量算法效果。用电阻 $R=22.67 \text{ k}$; 电容 $C=591.02 \text{ pF}$ 的阻容串联电路模拟电容型设备, 50 Hz 时介损角的真实值为 0.004 21

弧度, 电压信号:

$$u(t)=\sin(t+\frac{\pi}{3})+a\sin(3t+\frac{\pi}{3})+b\sin(5t+\frac{\pi}{6})$$

仅在基波存在情况下, 即 $a=0, b=0$, 频率在电力系统允许范围内波动时, 普通谐波分析法和本文提出方法计算所得介损角的误差见表 1。从表 1 可以看出, 普通谐波分析法计算所得介损角的误差较大, 标准差足以掩盖介损角的真实值, 已无法使用。而笔者提出的算法计算所得介损角误差绝对值的最大值均小于 8×10^{-5} 弧度, 标准差更小。

3 次谐波和 5 次谐波分别为基波分量的 10%和

1%且频率在电力系统允许范围内波动时, 普通谐波分析法和笔者提出方法计算所得介损角误差见表 2。从表 2 可以看出, 普通谐波分析法计算所得介损角的最大误差已达介损角真实值的数倍; 而笔者提出的方法计算所得介损角误差绝对值的最大值均小于 1.2×10^{-4} 弧度, 能很好地满足介损角测量精准确度的要求。

5 结语

笔者提出了结合加 Hanning 窗插值的修正理想

表 1 两种方法在信号不存在谐波但频率变化时测量所得介损角的误差

频率/Hz	常规方法				本文算法			
	最大值	最小值	均值	均方差	最大值	最小值	均值	均方差
49.5	1 020	-1 021	0.210	725.1	1.538	-1.435	0.040	1.036
49.6	816.8	-817.4	-0.092	580.2	1.824	-2.128	-0.094	1.095
49.7	611.6	-612.2	-0.093	435.0	1.701	-1.643	-0.099	0.984
49.8	407.4	-407.0	-0.139	289.4	0.990	-1.407	-0.222	0.808
49.9	204.4	-203.4	-0.027	144.9	0.871	-0.841	0.018	0.467
50.0	7.883	-4.843	1.176	4.386	3.258	-7.617	-2.068	3.890
50.1	202.3	-203.1	0.013	144.0	0.033	-0.558	0.226	0.151
50.2	406.0	-405.7	0.180	288.5	0.012	-0.740	0.321	0.184
50.3	609.1	-607.8	0.361	432.5	1.196	-1.437	-0.115	0.723
50.4	810.4	-810.2	0.222	575.8	1.248	-1.926	0.357	0.853
50.5	1 012	-1 012	0.033	719.3	1.556	-1.337	0.129	1.027

表 2 两种方法在信号存在谐波且频率变化时测量所得介损角的误差

频率/Hz	常规方法				本文算法			
	最大值	最小值	均值	均方差	最大值	最小值	均值	均方差
49.5	993.7	-1164	-1.719	770.1	0.777	-2.695	-0.800	1.159
49.6	801.1	-890.6	-1.079	600.6	1.866	-4.186	-0.724	1.652
49.7	632.1	-582.6	-0.573	427.2	0.932	-2.832	-0.708	1.602
49.8	445.6	-315.7	-0.470	273.5	0.714	-1.772	-0.704	0.638
49.9	229.9	-142.9	-0.639	134.8	0.738	-1.944	-0.729	0.660
50.0	5.810	-11.47	-1.672	6.459	5.812	-11.47	-1.670	6.459
50.1	142.1	-231.1	-0.651	134.7	0.493	-1.797	-0.736	0.643
50.2	312.4	-444.8	-0.673	272.0	1.136	-2.351	-0.889	1.103
50.3	578.5	-629.2	-0.531	424.7	0.881	-1.129	-0.651	0.672
50.4	879.1	-798.2	-1.226	595.6	0.573	-3.164	-0.865	1.092
50.5	1146	-986.8	-1.929	761.9	0.836	-3.287	-1.046	1.341

注: 表 1 和表 2 中介损角的最大值、最小值、均值和均方差单位均为 10^{-5} 弧度。

采样频率谐波分析介损角测量方法, 该方法利用加 Hanning 窗谐波分析法获得信号基波频率的准确值, 避免了使用硬件方式获得信号的频率, 增加了该方法的实用性, 同时为介损角测量时频率的获得提供了一种途径。该算法根据获得频率调整采样数据为符合同步采样的形式, 减少了非同步采样给介损角测量造成的误差, 有效提高了计算所得介损角的精确度, 是介损角测量的一种有效方法。

参考文献:

[1] 陈鹏云, 贺景亮, 赵生和, 等. 绝缘介质损耗因素在线监测

的研究[J]. 武汉: 高电压技术, 1994, 22(4): 36-38.

[2] 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]. 西安: 高压电器, 2000, 36(3): 17-19.

[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]. 北京: 清华大学学报, 2001, 41(9): 5-8.

[4] Jiangtao XI, Joe F Chicharo. A New Algorithm for Improving the Accuracy of Periodic Signal Analysis [J]. IEEE Trans. on IM, 1996, 45(4): 827-830.

[5] 王楠, 律方成, 梁英. 基于修正理想采样频率的谐波分析法在介损在线测量中的应用 [J]. 哈尔滨: 电测与仪表, 2003, 40(7): 12-15.

[6] 孙仲康. 快速付立叶变换及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1982.