

电容型设备改进型介损数字化测量方法的研究

杨晓东, 唐超, 廖瑞金

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

Improved Harmonic Analysis Methods for Measuring Dielectric Loss of Capacitive Equipment

YANG Xiao-dong, TANG Chao, LIAO Rui-jin

(The Key Laboratory of Ministry of Education on High Voltage Engineering of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

摘要: 分析了传统的谐波分析法在介损测量中存在的问题, 研究了两种改进的测量介损的算法——加窗插值 FFT 法和基于小波的介损测量方法, 对比了各种方法的优缺点。现场实际测量表明, 两种方法均能有效提高介损测量的准确性。

关键词: 电容型设备; 介质损耗; 加窗插值 FFT 法;

小波分析

中图分类号: TM853

文献标志码: A

Abstract: This paper analyzes the problem existing in the conventional harmonic analysis method, investigates two digital arithmetic-hanning-windowed interpolated FFT and wavelet analysis method for dielectric loss measurements, and contrasts their advantages and disadvantages. The on-site tests indicate that both methods have good accuracy in measuring dielectric loss.

Key words: capacitive equipment; dielectric loss;

hanning-windowed interpolated FFT;

wavelet analysis

0 引言

电介质损失角正切($\tan \delta$)是反映高压电气设备特别是电容型设备绝缘性能的一项重要指标。介损测量的方法大致可分为两类, 一是“硬件法”, 主要依靠西林电桥法和过零比较法(也称脉冲计数法)来实现^[1-5]。另一类是“软件法”, 也称数字法, 依靠计算机软件的处理功能来实现, 典型的代表是谐波分析法, 还有高阶正弦拟合法^[6, 7]、相关函数法^[8-10]等。谐波分析法具有较高的精度且使用方便, 适合于在线监测, 但是当采样频率存在偏差以及电网频率波动时, 以上的计算方法得出的频谱相位都有较大的偏差。目前, 电容型设备的介损在线监测基本都采用数字化的测量方法, 所不同的是如何获取数字化信号以及采取何种信号处理方法去提高测量的准确度。

1 谐波分析法测量介损时存在的问题

谐波分析法是通过测量运行电压和流经试品的电流, 再将获得的模拟信号转化为数字信号, 采用数字频谱分析的方法求出这两个信号的基波, 从而通过对基波的相位比较求出介质损耗角 δ 。根据数字分频理论可知, 只要采样长度为工频周期的整数倍, 就可以进行频谱的准确分析。但是由于电网频率可以在 50 ± 0.2 Hz 的范围内波动, 整周期采样的条件很难满足, 由此将产生“栅栏效应”和频谱泄漏^[11], 使得计算出的相位有较大的误差, 影响介损测量准确度。

“栅栏效应”产生的原因是在非同步采样时, 信号的各次谐波分量并未落在频率分辨点上, 而是落在某两个频率分辨点之间的位置, 这样相当于一些频率分辨点被取样的“栅栏”给挡住看不见了。常用的方法是按照四舍五入的原则去近似代替信号的频率分量与频率取样点不重合的点, 这样就产生了“栅栏效应”误差。而频谱泄漏则是由于实际工程应用中的信号处理, 是将无限长原始信号抽样成有限长信号, 相当于无限长信号与矩形窗信号的卷积运算, 这样截断后的信号频谱将从原来的线谱变为由中心向两边扩展的连续谱(图1), 也就是能量产生了泄漏。

2 改进算法研究

2.1 改进的加窗插值 FFT 算法

为了减小电网频率波动所引起的介损测量误差, 提出以下解决方法: ①在硬件上, 采用锁相倍频跟踪法^[12], 利用锁相环技术, 通过硬件实现采样的同步, 虽然在一定程度上能够消除电网频率波动的影响, 但是当频率波动频繁时, 测量误差仍然较大; ②用软件方法来减小频谱泄漏和“栅栏效应”产生的误差。常用的方

收稿日期: 2007-07-06; 修回日期: 2007-09-18

作者简介: 杨晓东(1966-), 男, 硕士研究生, 从事电气设备在线监测及故障诊断研究。

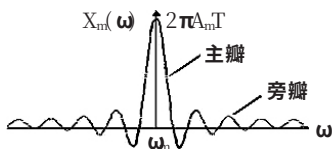


图 1 加矩形窗信号的频谱

法是首先通过均匀(大部分为非同步)采样,然后由一定的算法解决非同步问题下 FFT 带来的误差,即选择性能更好的特殊窗和算法,提高 FFT 变换的精度。加窗的目的是在时域平滑截断信号两端的波形突变,而在频域尽可能地压低旁瓣高度。通常长范围内的泄漏可采用性能优良的窗函数或增加测量时间来解决,而短范围的泄漏则采取插值 FFT 的方法加以克服。

笔者针对谐波分析法存在的问题,采用改进的加窗插值 FFT 算法进行分析,假设离散信号 $x(n)$ 的频谱为 $X(k)$,则加 Hanning 窗后的 FFT 变换为

$$X_1(k) = \{X(k) - [X(k-1) + X(k+1)]/2\} / 2 \quad (1)$$

根据 FFT 和余弦加权函数的相关公式,推导出 Hanning 加窗校正公式为

当 $|X_1(k_0+1)| \geq |X_1(k_0-1)|$ (k_0 为整数) 时,有

$$d_0 = \frac{2|X_1(k_0+1)| - |X_1(k_0)|}{|X_1(k_0+1)| + |X_1(k_0)|} \quad (2)$$

当 $|X_1(k_0+1)| < |X_1(k_0-1)|$, 有

$$d_0 = \frac{|X_1(k_0)| - 2|X_1(k_0-1)|}{|X_1(k_0+1)| + |X_1(k_0)|} \quad (3)$$

再由 $f_0 = (d_0 + k_0) / N$ (N 为采样点数) 求出基波频率。

经过校正后幅值公式为

$$A_i = 2\pi d_0 (1 - d_0^2) |X_1(k_0)| / \sin(\pi d_0) \quad (4)$$

相角公式为

$$\Phi = \text{phase}[X_1(k_0)] - \pi d_0 + \pi/2 \quad (5)$$

2.2 基于小波变换的介损测量方法

近年来,一些学者将小波变换引入到介损的测量方法中^[13-16],利用多尺度的变换值,可以实现介损测量,尤其适合在现场干扰严重、基波频率波动的情况下分析信号。

信号的小波变换本质上是将信号分解为各种不同频率的细节成分,小尺度下的变换系数含有信号较多的高频成分和噪声成分,大尺度则包含着较多的低频分量,因此可在选择了适当的分解尺度后将各尺度上的高频系数置零或闭值量化,从而去除了高次谐波分量和噪声分量,再由低频系数进行重构从而得到基波分量,接着通过相关函数法进行信号分析,最终求得介损值,小波分解示意图见图 2。

在实际算法中,相关算法的离散时间表达式如下

$$R_i(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) i(n) \quad (8)$$

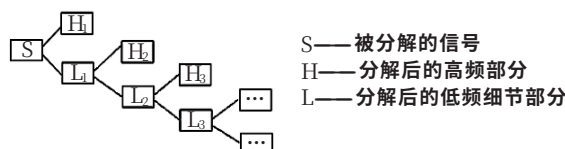


图 2 小波分解示意图

$$R_u(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) u(n) \quad (9)$$

$$R_m(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) u(n) \quad (10)$$

式中 $R_i(0)$ 、 $R_u(0)$ 为自相关函数; $R_m(0)$ 为互相关函数; N 为整周期内的采样点数。介损角为

$$\delta = \frac{\pi}{2} - (\Phi - \Phi) = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{R_m(0)}{\sqrt{R_i(0) R_u(0)}} \quad (10)$$

由于存在电网频率波动引起的非同步采样,可采用修正采样频率的思想,对原始采样序列进行修正,得到新序列

$$x(n) = x_0(n) + \frac{n}{N} [x_0(n) + x_0(N+n)] \quad (11)$$

式中 N 为采样点数,这样满足整周期采样,再对修正后的序列 $x(n)$ 进行相关分析,从而提高算法准确度。

3 现场测量结果及其分析

为了验证算法的准确性,将上述算法编程应用到介损在线监测系统中,分别在实验室和重庆大竹林 220 kV 变电站现场测量进行对比分析。测量系统原理框图见图 3,图 3 中,1~n 号为电流互感器;现场通信控制为 I~IV 号。

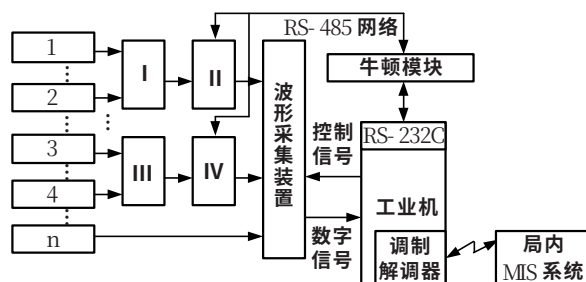


图 3 介损在线监测硬件系统原理框图

实验室测量介损时,为了更接近实际情况,加入了直流分量(基波的 1%)和三次谐波分量(基波幅值的 1%),并以无干扰情况下 QS1 型介损测量仪的测试数据作为标准,该仪器分辨率为 0.005%,测量精度为 $(\pm 1\% \tan \Phi \pm 5 \times 10^{-4})$ 。测试结果见表 1,其中:①为采用改进加窗插值 FFT 法;②为采用小波法。

对比试验结果可以看出,在现场测量时,由于各种强干扰的影响,测量结果较实验室情况下误差略大,但是两种方法均具有较高的准确度。由表 1 可以看到,尽管现场干扰严重,两种方法的 3 种测量结果(现场、实验室加干扰、实验室无干扰)与标准值之间

表1 改进算法的对比试验结果

标准值/%	实验室无干扰/%	实验室加干扰/%	现场测量/%
0.435	① 0.435	0.438	0.439
	② 0.435	0.437	0.438
1.264	① 1.264	1.260	1.280
	② 1.264	1.261	1.171
1.521	① 1.521	1.525	1.545
	② 1.521	1.523	1.535
1.656	① 1.656	1.660	1.632
	② 1.656	1.658	1.636

的绝对误差均在 0.03% 之内, 均能满足工程应用的要求。同时也看到, 小波变换的方法比加窗插值算法在抑制噪声方面效果要好些, 测量结果也更为准确。

为了验证算法的稳定性, 运用加窗插值 FFT 方法对该站 A 相 CT 的介损值进行了 4 个月在线监测, 结果表明介质损耗值基本稳定在 0.48%, 按照 GB 50150-91 规定, 折算为 20℃ 时的值在 0.25%~0.50%, 介损绝对值变化在 ±0.20% 以内, 见图 4。同时, 运用基于小波的介损测量法对该站 1 号 110 kV 主变 B 相套管进行了 4 个月的介损在线监测, 监测结果表明介质损耗值折算为 20℃ 时为 0.11%~0.42%, 介损绝对值变化在 ±0.15% 以内, 见图 5。

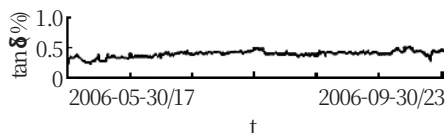


图4 A相CT介损历次监测结果变化曲线

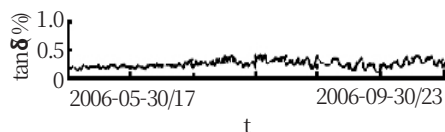


图5 主变套管B相介损历次监测结果变化曲线

总体上看, 两种方法监测数据均稳定可靠, 达到了工程应用的要求, 可以实现对运行设备的实时监测, 进而确保变电站的安全运行。

在实验室和现场测量的过程中注意到, 加窗插值存在实时性较差、对噪声干扰抑制能力较低等缺点, 因此今后研究的重点应该是构造能量更为集中、分辨率更高的窗函数。而基于小波的介损测量法在选取小波时必须综合考虑所选小波的正交性、紧支集、平滑性以及对称性等特性, 并且需要构造出分频严格、能量集中的小波函数来克服小波的频域混叠现象, 进一步提高测量的精度。

此外, 介损本身是个很微小的量, 介损值的测量受外界因素的影响较大, 测量结果的准确度不仅与所用数学方法有关, 而且还与所用电子设备的精度及质量密切相关, 周围环境的温度、湿度等因素也会影响介损测量的结果, 因此测量过程必须认真仔细。

4 结论

(1) 加窗插值FFT算法和基于小波变换的介损测量方法, 均能够较好地减少频谱泄漏, 还能在一定程度上消除“栅栏效应”, 使介损测量准确度较之传统的谐波分析法显著提高, 测量的绝对误差均在 0.03% 之内, 能够满足工程上的要求。

(2) 构造能量更为集中、分辨率更高的窗函数; 构造出分频严格、能量集中的小波函数来克服小波的频域混叠现象, 进一步提高测量的精度, 将是以后研究改进介损数字化测量方法的重点。

(3) 综合考虑测量系统硬软件精度, 根据实际操作经验克服环境因素的影响, 对现场介损测量准确度的提高, 有很大的帮助。

参考文献:

- [1] 赵秀山, 谈克雄, 朱德恒, 等. 介质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.
- [2] 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(10): 1-5.
- [3] 陈鹏云, 贺景亮, 赵生和, 等. 绝缘介质损耗因数在线监测的研究[J]. 高电压技术, 1994, 22(4): 36-38.
- [4] 刘力, 孙结中. 中间变压器对电容式电压互感器介损测量的影响[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 56-60.
- [5] 朱根良. 500 kV 电流互感器介质损耗因数的测量与分析[J]. 电网技术, 1998, 22(4): 39-44.
- [6] 王微乐, 李福琪, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王楠, 律方成, 李燕青. 相关函数法计算容型设备介损失角正切[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(3): 22-25.
- [10] 左自强, 徐阳, 曹晓珑. 计算电容型设备介损损耗因数的相关函数法的改进[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 53-57.
- [11] 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]. 电测与仪表, 2003, 40(7): 12-15.
- [12] 廖瑞金, 王忠毅. 电气设备介质损耗监测的谐波分析法及其特点[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1999, 22(3): 67-71.
- [13] 王楠, 律方成. 基于小波变换的介损在线监测数据趋势提取[J]. 高电压技术, 2003, 29(4): 31-33.
- [14] 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, 84.
- [15] 王楠, 律方成, 陈志业. 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.
- [16] 邢雅周, 蒋文科, 张梅, 等. 小波数字滤波器的设计及在 tan delta 测量中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(2): 104-107.