

# 在线监测 $\tan \delta$ 的高精度相对分析法研究

冯小华

(山东核电有限公司, 山东 烟台 264000)

Study on High Accuracy Relative Analysis Algorithm of On-line  $\tan \delta$  Monitoring

FENG Xiao-hua

(Shandong Nuclear Power Co. Ltd., Yantai 264000, China)

**摘要:** 谐波分析法应用于介损测量,在电网频率波动,被测信号含有间谐波的实际条件下,很难做到理想同步采样,由此造成的频谱泄漏将严重影响介损的测量精度。在频域分析了非同步采样条件下,谐波分析法介损测量产生误差的原因,并从介损定义出发得出基于相对测量的加窗谐波分析法能有效提高介损测量精度,仿真结果也证明了所提算法的有效性和可行性。

**关键词:** 相对分析法; 非同步采样; 频谱泄漏; 加窗

中图分类号: TM934.32

文献标识码: A

**Abstract:** Harmonics analysis is used in on-line  $\tan \delta$  measurement on-line. When there is a frequency fluctuation in network, under the condition of the signal with harmonics, it is difficult to achieve synchronous sampling, and accuracy will be influenced by leakage error. In this paper, the reasons of the leakage error under asynchronous sampling in the frequency domain are analyzed, and the weighted harmonics analysis algorithm based on the definition of  $\tan \delta$  can improve the precision of measuring effectively. Simulation results have proved the validity and feasibility of the method.

**Key words:** relative analysis approach; asynchronous sampling; frequency leakage; weighted

## 0 引言

在介损测量的各种方法中,谐波分析法有其独特的优越性。然而,在系统频率波动,并含有非整数次谐波的情况下,传统谐波分析法应用于介损测量中会产生栅栏效应和泄漏误差,即使采用了跟踪锁相技术也达不到理想效果<sup>[1]</sup>。其原因,一方面即使是同一频率的两单一信号,初始相角的不同会使计算得到的电压、电流基波相角具有不同的误差,相减误差不会抵消。另一方面,谐波分析法对谐波的抑制能力降低<sup>[2]</sup>。

为了得到准确的介损因数,往往通过算法提高测量电压、电流初相角的精度,常采用的方法有加窗插值法<sup>[3-5]</sup>,然而插值算法有很多地方有待完善或进

一步研究<sup>[4]</sup>。由介损因数为电流和电压初相角差的余角的正切值可知,介损测量中无需求出电压、电流初相角的准确值,只要它们的差值准确即可,从而使得求电压、电流初相角时允许有相同的误差,大大降低了介损因数测量的难度。基于该思想,通过理论推导得出的加窗谐波分析法不仅使介损测量不受初相角影响,并且能有效地抑制谐波及其它杂波的干扰,提高了介损测量的准确度。

## 1 介损测量中非同步采样的误差分析

为讨论方便,假设稳态电网信号由基波和某次谐波(可为间谐波)组成:

$$x(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m), (-\infty < t < +\infty) \quad (1)$$

对  $x(t)$  以间隔  $T_s$  均匀采样  $N$  个数据,采样频率  $f_s(1/T_s)$  大于 Nyquist 频率,即相当于对连续信号  $x(t)$  离散采样后,用长度为  $N$  的矩形窗  $w_R(n)$  截断,对采样序列进行离散傅里叶变换得:

$$X(e^{j2\pi k f/f_s}) = \frac{A_1}{2} e^{-j\varphi_1} W_R(e^{j2\pi(k f - f_1)/f_s}) + \frac{A_1}{2} e^{-j\varphi_1} W_R(e^{j2\pi(k f + f_1)/f_s}) + \frac{A_m}{2} e^{-j\varphi_m} W_R(e^{j2\pi(k f - f_m)/f_s}) + \frac{A_m}{2} e^{-j\varphi_m} W_R(e^{j2\pi(k f + f_m)/f_s}) \quad (2)$$

式中:  $f = f_s/N$  为最小离散频率间隔,  $W_R(e^{j\omega})$  为矩形窗  $w_R(n)$  的频谱特性。

加窗截断必然产生泄漏,使幅度谱由冲激展宽为窗谱的形状,并且相互叠加影响。但只要满足同步采样,仍然能得到信号的准确参数,这就是传统频谱分析方法的理论依据。然而,同步采样很难实现,峰值频率  $f_1 = k_1 f$  很难正好位于离散谱线频点上,即  $k_1$  很难是整数,从而产生所谓的栅栏效应。

收稿日期: 2005-10-08; 修回日期: 2006-02-17

作者简介: 冯小华(1978-),男,硕士,从事电力系统在线监测方面的研究。

## 2 介损测量中非同步采样误差的消除

由介损因数定义可知,在计算电压,电流初相角时允许有相同的误差,从而无须求得电压,电流初相角的准确值。从式(2)可以看出,在非同步采样下由于受频点 $-f_1, \pm f_m$ 处频峰的旁瓣影响会使得相角计算误差随初相角的不同而变化。然而,根据需要选择合适的窗函数对序列进行加权可以有效地减少 $-f_1, \pm f_m$ 处频峰旁瓣对 $f_1$ 处窗谱的影响,于是式(2)可以简化为:

$$X(e^{j2\pi k f/f_s}) = \frac{A_1}{2} e^{j\theta_1} W(e^{j2\pi(k-f_1)/f_s}) \quad (3)$$

从式(3)可知,所求初相角 $\theta_1$ 的偏差为复数 $W(e^{j2\pi(k-f_1)/f_s})$ 的相位角。值得注意的是,对于同频信号,该相位角不受信号的幅值及初相位的影响,这正是介损测量中所需要的,因无须通过插值精确求出初相角,从而大大减小了计算量,提高了介损在线监测的精度和实时性。

选择合适的窗函数和加窗长度可使得 $-f_1, \pm f_m$ 处频峰旁瓣对 $f_1$ 处窗谱的影响很小,从而使得式(3)成立。对实际的电网波形而言,基波分量远大于各次谐波,谐波对基波的泄漏影响已经很小,有利于介损的测量。通常对窗函数的要求是主瓣窄,旁瓣低,旁瓣跌落速度快。文[6]对各种窗函数的性能进行了比较,得出布莱克曼-哈尔斯窗能较好地满足上述要求,谐波间相互干扰能衰减 92 dB 以上,可以忽略谐波和负频旁瓣的影响,为此选择该窗为加权窗函数。

对于窗长度的选择<sup>[7]</sup>,设窗函数的主瓣半宽为 $M \frac{2}{N}$  (其中: M 为与窗函数相关的常数; N 为加窗宽度),旁瓣最大泄漏为 $A_1$ ,衰减速度为 $D(\text{dB})/\text{个}$ ,电网间谐波(距离谐波 $1/B$ 信号周期)和相邻谐波的幅度分辨率要求为 $A(\text{dB})$ ,则分析窗宽度至少需要 $d$ 个信号周期,且:

$$d = (A - A_1) \cdot B / D + M + 0.5 \quad (4)$$

## 3 仿真计算

为了验证所提算法的准确性,即能否有效地克服频率波动、直流偏移、谐波和间谐波干扰的影响,假设电压信号为:

$$u(t) = 1 + \cos(2\pi ft + \pi/3) + \cos(2\pi ft + \pi/4) + \cos(4\pi ft + \pi/5) + \cos(6\pi ft + \pi/6) + \cos(10\pi ft + \pi/7) \quad (5)$$

从式(5)可以看出,直流分量、各谐波幅值与基波相同,这是为了说明本算法的有效性而特意设置的,并有意考虑基波附近的谐波干扰,各种频率信号的相位任意设定。电容型设备的介损 $\tan \delta$ ,电容量为 $C_0$ ,并且其大小不随频率发生变化,则根据线性电路

的叠加定理可以推得流经电容型试品的电流 $i(t)$ 。采样频率设为 50 kHz,一次采样 10 个周波。表 1 为系统频率波动时,传统谐波分析法和加窗谐波分析法绝对误差对比。表 2 为系统频率固定(49.8 Hz),介损不变(0.003 rad),电压初相角变化时,传统谐波分析法和加窗谐波分析法介损绝对误差对比。

表 1 介损角绝对误差对比

频率 /Hz	传统谐波分析法	加窗谐波分析法
49.50	0.056 3	2.635 1 × 10 <sup>-6</sup>
49.70	0.008 3	6.910 6 × 10 <sup>-6</sup>
49.90	0.010 8	1.558 3 × 10 <sup>-6</sup>
50.00	2.995 0	3.888 3 × 10 <sup>-6</sup>
50.10	0.020 3	2.375 4 × 10 <sup>-6</sup>
50.30	0.060 4	6.062 5 × 10 <sup>-6</sup>
50.50	0.069 0	4.325 3 × 10 <sup>-6</sup>

表 2 介损角绝对误差对比

初相角 /rad	传统谐波分析法	加窗谐波分析法
0	0.003 9	2.450 9 × 10 <sup>-6</sup>
2 /7	0.007 5	2.356 1 × 10 <sup>-6</sup>
4 /7	0.001 5	5.498 7 × 10 <sup>-6</sup>
6 /7	2.007 6	4.475 2 × 10 <sup>-6</sup>
8 /7	0.002 1	1.876 0 × 10 <sup>-6</sup>
10 /7	0.001 0	5.080 9 × 10 <sup>-6</sup>
12 /7	0.001 0	50433 2 × 10 <sup>-6</sup>

从两表仿真结果可以明显看出,基于相对测量的加窗谐波分析法,不受间谐波等杂波干扰,也不受基波初相角干扰,测量精度大大提高。

## 4 结语

提出的应用于介损测量的基于相对测量的加窗谐波分析法,在系统频率波动下有效地抑制了谐波、间谐波、杂波和噪声的干扰,提高了介损测量精度且增加的计算量不大,可应用于介损的实时在线监测。该方法可应用于任何两个同频信号的相位差测量,如 MOA 泄漏电流的测量等。

## 参考文献:

- [1] 潘文, 钱俞寿, 周 鹤. 基于加窗插值 FFT 的电力系统谐波测量理论(I) 窗函数研究[J]. 电工技术学报, 1994, 9(1): 50-54.
- [2] 尚 勇, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 谐波分析法介损损耗因数测量的误差分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 67-71.
- [3] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
- [4] 赵文春, 马伟明, 胡 安. 电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 83-87.
- [5] 冯小华, 吴正茂, 张承学. 介损在线监测的 3 种改进谐波分析法的分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 4-6.
- [6] Harris F J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform [J]. Proc. IEEE, 1978, 66(1): 51-83.
- [7] 祁才君, 王小海. 基于插值 FFT 算法的间谐波参数估计[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 92-95.