

# 应用改进的布莱克曼插值算法精确估算介损角

邱海锋, 周浩

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 使用谐波分析法对介质损耗因数进行在线监测时,由电网频率波动引起的非同步采样会给系统测量带来很大误差。为实现介损角的高精度测量,笔者结合现在数字信号处理芯片的处理能力,提出了加布莱克曼窗的插值 DFT 修正算法来分析介损的测量,并根据介损角的定义进一步对由插值算法得到的介损进行了修正。仿真结果表明,该算法得到的介损误差较小,精度受频率的波动影响较小,对介损角的在线测量有一定的参考价值。

**关键词:** 介损角; 布莱克曼窗; 谐波分析法

中图分类号: TM835.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0236-03

## High-accuracy Estimation of Dielectric Loss Angle Using the Improved Blackman-windowed Interpolated Algorithm

QIU Hai-feng, ZHOU Hao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The non-synchronization caused by the frequency fluctuation will cause remarkable error when the harmonic analysis method is used in the on-line monitoring of dielectric loss. In order to improve the measuring accuracy of the dielectric loss, this paper adopted the Blackman-windowed Interpolated DFT algorithm to analyze the dielectric loss angle based on the capacity of digital microprocessor, and updated the results according to the definition of dielectric loss. The simulation results demonstrate that the measuring accuracy is improved and influenced little by frequency fluctuation. So it is a worthy method for the on-line monitoring of dielectric loss.

**Key words:** dielectric loss angle; blackman window; harmonic analysis method

### 0 引言

高压电气损坏事故中大部分是绝缘故障,因此对绝缘测试技术的研究有重要意义。通过测量介损角,可以及时发现高压电气设备绝缘整体受潮、劣化变质以及被试设备的贯通和非贯通绝缘缺陷。高电压电容型设备的介损正切  $\delta$  通常为  $0.001 \sim 0.02$  rad,在实际的测量中很容易因误差而被湮没,故对  $\delta$  的测量提出了较高的要求。长期以来,介损测量采用传统的电桥测量法,其测试过程比较复杂,操作量大,抗干扰能力差,易受人因素为影响,已经不能满足当今介损在线测量的要求<sup>[1]</sup>。

目前以谐波分析方法为代表的软件测试方法得到了广泛的推广<sup>[2]</sup>,其主要根据是通过分析电压  $u$  和电流  $i$  的基波参数角来求得  $\delta$ 。它具有良好的抗干扰性和稳定性,目前已经在介损在线检测中得到广泛应用。但是由电网频率波动引起的非同步采样对

$\delta$  的精度会有严重的影响。非同步采样的后果将是在应用 DFT 时,不仅会产生由栅栏效应导致的信号峰值点观测上的偏差(即短范围泄漏),而且各频谱旁瓣之间也会相互干扰(即长范围泄漏),其危害在以基频含量为主的电网信号频谱中显得尤为明显<sup>[3]</sup>。针对这一问题,许多学者提出了解决方法:文[4]采用海宁窗插值算法来获取准确的信号基波频率,并通过调整采样频率来减小非同步采样带来的误差,误差可以小到 1%;文[5]采用高阶正弦拟合算法,对采样数据采用最小二乘法进行非线性拟合计算,虽然精度较高,但是迭代次数多,不易于编程实现;文[6]采用海宁窗插值算法对获得信号进行参数校正处理来求取  $\delta$ ,能在很大程度上减小非同步的影响,但是很难将误差降到 1%以下;文[7]中第 3 种方法加 Blackman-Harris 窗插值法精度很高,但是需要反过来求解 7 次方程,很难在实际系统中用算法实现。

介损在线监测系统的核心是数字信号处理芯片,笔者结合数字信号处理芯片内部硬件乘法器功能日益强大的特点,采用基于加布莱克曼窗的插值

收稿日期:2007-03-05; 修回日期:2007-12-31

作者简介:邱海锋(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统电能质量分析和测量。

DFT 算法进行介损测量,既可以充分发挥芯片的效能,又可以较之现有算法更为有效地降低  $\delta$  的误差。笔者还根据介损角定义,对算法得到的介损角作了修正,进一步减小了误差。

## 1 算法原理

假设一个频率为  $f_0$ 、幅值为  $A$ 、初相位为  $\varphi_0$  的单一频率信号  $x(t)$ ,在经过了采样频率为  $f_s$  的模数变换后得到如下形式的离散信号

$$x(n) = A \sin(2\pi f_0 n / f_s + \varphi_0) \quad (1)$$

如果所加窗函数的时域形式为  $w(n)$ ,其连续频谱为  $W(2\pi f)$ 。忽略负频率点  $f_0$  处频峰的影响,则正频率  $f_0$  附近的连续频谱函数可以表达为

$$\bar{X}(f) = \frac{A}{2j} e^{j\varphi_0} W[2\pi(f-f_0)/f_s] \quad (2)$$

对式(2)进行离散抽样,则得到它的离散傅里叶变换表达式为

$$\bar{X}(k \cdot \Delta f) = \frac{A}{2j} e^{j\varphi_0} W[2\pi(k \cdot \Delta f - f_0)/f_s] \quad (3)$$

其中离散频率间隔为  $\Delta f = f_s / N$ ,  $N$  为数据截断长度。

实际测量中,由于受多种因素的影响,频率是波动的,所以采样过程难以做到严格同步,此时  $f_0 / f_s$  不再是整数,峰值频率  $f_0 = k_0 \cdot \Delta f$  很难正好位于离散谱线频点上。假设峰值点左右两侧的谱线分别是第  $k_1$  和第  $k_2$  条谱线,这两条谱线幅值分别是  $y_1 = \bar{X}(k_1 \cdot \Delta f)$  和  $y_2 = \bar{X}(k_2 \cdot \Delta f)$ 。显然  $k_1 \leq k_0 \leq k_2 = k_1 + 1$ ,令  $\alpha = k_0 - k_1 - 0.5$ ,则结合式(3)可得

$$\frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} = \frac{|W[2\pi \cdot (-\alpha + 0.5)/N]| - |W[2\pi \cdot (-\alpha - 0.5)/N]|}{|W[2\pi \cdot (-\alpha + 0.5)/N]| + |W[2\pi \cdot (-\alpha - 0.5)/N]|} \quad (4)$$

令  $\beta = (y_2 - y_1) / (y_2 + y_1)$ ,则式(4)可以简化为  $\beta = g(\alpha)$ 。通过计算  $\alpha = g^{-1}(\beta)$  就可以确定  $\alpha$  值,相角、幅值和频率也随之相应可以得到确定<sup>[8]</sup>。

窗函数的选择直接关系到  $\alpha = g^{-1}(\beta)$  的求解。常用的窗函数包括三角窗、海明窗、海宁窗、布莱克曼窗和凯泽窗。其中三角窗和海明窗虽然形式比较简单,但是泄漏太大;凯泽窗形式过于复杂,不适合简化编程。因此实际用得比较多的是海宁窗和布莱克曼窗。图1为  $N$  取 61 时海宁窗和布莱克曼窗的频谱图,其中海宁窗旁瓣最大泄漏为 -31 dB,布莱克曼窗旁瓣的最大泄漏为 -58 dB,并且随旁瓣的增加布莱克曼窗的衰减速度也要高于海宁窗。综合考虑旁瓣泄漏和阻带衰减,这里选择布莱克曼窗。

布莱克曼窗的函数表达式和频谱分别为

$$w_n = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) \quad (5)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$

$$W(\omega) = 0.42 W_R(\omega) + 0.25 \left[ W_R\left(\omega - \frac{2\pi}{N-1}\right) + \right.$$

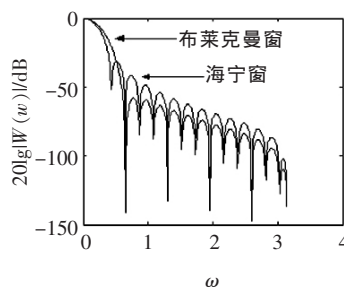


图1 海宁窗和布莱克曼窗的频谱对比

$$W_R\left(\omega + \frac{2\pi}{N-1}\right) + [W_R\left(\omega - \frac{4\pi}{N-1}\right) + W_R\left(\omega + \frac{4\pi}{N-1}\right)] \quad (6)$$

由于此时布莱克曼窗比较复杂,由  $\alpha = g^{-1}(\beta)$  得到的解析式非常复杂,并含有大量的除法运算,无法发挥数字信号处理器的速度和精度优势。所以此处需要采用多项式逼近方法来得到其近似解<sup>[8]</sup>,并通过控制多项式逼近的次数,可以有效地控制逼近的精度。使用 MATLAB 多项式拟合函数 `polyfit`<sup>[9]</sup>,经过多次拟合和仿真,去除对精度影响不大的 8 次项,最终得到如下的修正公式

$$\alpha_m = 1.96043 \cdot \beta_m + 0.15277 \cdot \beta_m^3 + 0.07425 \cdot \beta_m^5 + 0.04999 \cdot \beta_m^7 \quad (7)$$

$$A_m = N^{-1} \cdot [ |X(e^{j\omega})|_{\omega = \frac{2\pi(k_m+1)}{N}} + |X(e^{j\omega})|_{\omega = \frac{2\pi k_m}{N}} ] \cdot (2.70206 + 1.07115 \cdot \alpha_m^2 + 0.23361 \cdot \alpha_m^4 + 0.04017 \cdot \alpha_m^6) \quad (8)$$

$$\varphi_0 = \arg[\bar{X}(k_1 \cdot \Delta f)] + \pi/2 - \pi \cdot [\alpha - (-1)^i \cdot 0.5] \quad (9)$$

$$(i=1, 2)$$

$$f_0' = \frac{(k_0 + \alpha_0 + 0.5) \cdot f_s}{N} \quad (10)$$

$\alpha_m$  的解析式含有 1 次到 7 次的奇数次乘法,并且含有 5 位小数系数,对承担运算任务的数字信号处理芯片的速度和精度要求非常高。在 51 单片机时代,这种方法几乎很难实现并且非常不实用。但是目前数字信号处理芯片的指令运行速度都达到了每秒几十兆甚至上百兆,如 TMS320C28X 系列 DSP 芯片含有高达 150MIP 的数字信号处理器,运算精度达到了 32 位(如果转换为小数达到了  $2.33 \times 10^{-10}$ ),并且  $32 \times 32$  位的乘法运算都能在一个机器指令周期内完成。这些硬件的速度和精度完全能满足加布莱克曼的加窗插值方法的要求。

## 2 关于对介损角的进一步修正

电力系统的介质损耗角定义一般是针对在频率为 50 Hz 时的情况。图 2 所示为电容型介质的等效电路,其介损损耗角正切  $\tan \delta$  定义<sup>[10]</sup>为

$$\tan \delta = 2\pi f_0 C R \quad (11)$$

其中  $f_0$  为标准工频 50 Hz,  $C$  为串联等效电容,  $R$  为串联等效电阻。

当电网频率偏移为  $f_1$  时,使用谐波分析方法分别可以得到电压相角  $\varphi_{u0}$ 、电流相角  $\varphi_{i0}$ ,此时电压和电流的相角差值的正切为

$$\tan(\varphi_{u0}-\varphi_{i0})=2\pi f_1 CR \quad (12)$$

结合式(11)、(12),推得介质损耗角正切的修正表达式为

$$\tan\delta=\frac{f_1}{f_0}\tan(\varphi_{u0}-\varphi_{i0}) \quad (13)$$

这里的偏移频率  $f_1$  可以使用式(10)的修正频率  $f_0'$  代替。

现在很多介质损耗因数的谐波修正算法都只分析到式(12)为止,如文[6]认为  $\tan\delta=\tan(\varphi_{u0}-\varphi_{i0})=2\pi f_1 CR$ ,这确切地说是在  $f_1$  情况下的介损因数,而不是通常意义下 50 Hz 时的介损因数,所以有必要通过式(13)作修正以进一步减小误差。

基于加布莱克曼加权插值算法的介损测量过程如下:①确定采样点数  $N$  和采样频率  $f_s$ ,并确定相应的窗函数  $w(n)$  ( $N=0,1,\dots,N$ );②采样电压信号序列加窗后进行 DFT 运算,确定最接近基波频率的频率点  $k_1,k_2$ (幅值谱中幅度最大的两根谱线),得到两个幅值  $y_1=\bar{X}(k_1\cdot\Delta f)$  和  $y_2=\bar{X}(k_2\cdot\Delta f)$ ;③将步骤 2 中  $y_1,y_2$  代入式(4)得到  $\beta_1$ ,并进一步根据式(7)得到  $\alpha_1$ ;④将得到的  $\alpha_1$  代入式(9)得到电压相角  $\varphi_{u0}$ ,仿照步骤 1、2、3、4 得到电流信号的  $\varphi_{i0}$ ;⑤计算介损角  $\delta=\varphi_{u0}-\varphi_{i0}$ ;⑥根据式(13)得到介损角的修正值  $\delta=\arctan[\frac{f_1}{f_0}\tan(\varphi_{u0}-\varphi_{i0})]$ 。

### 3 仿真分析

为了验证所提出算法的实际性能,笔者应用文[4]的仿真分析条件对同一信号进行介损的分析计算。

电压信号为

$$u(t)=\sin(\omega t+\varphi)+0.1\sin(3\omega t+\frac{\pi}{3})+0.01\sin(5\omega t+\frac{\pi}{6}) \quad (14)$$

图 2 为一电容型设备的等效电路图,其中电容  $C=591.02$  pF,电阻  $R=22.67$  k $\Omega$ , $f=50$  Hz;A/D 采样量化位数为 12 bit,采样频率为 1 000 Hz,共采集 1 000 个数据。为了更好地反映仿真效果,在 49.5~50.5 Hz 内每隔 0.1 Hz 取一个仿真点,对于每个频率点,基波信号的初始相角  $\varphi$  在  $0\sim 2\pi$  范围内均匀取 100 个点,并用这 100 个点计算所得的介损角误差的最大值、最小值、均值和标准差反映算法性能。

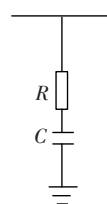


图 2 电容型介质设备等效电路

表 1 是基于以上仿真条件分别由传统 DFT 法、谱校正的频率修正算法和布莱克曼窗的插值算法得到的介损与真实值之间的最大值、最小值、均值和标准差。由仿真结果可以看出,基于布莱克曼窗的插值算法的得到的介损精度和稳定性远远好于传统算法。常规的 FFT 分析法适用于频率固定在 50 Hz 的情况。当频率在 49.5~50.5 Hz 变化时,由于栅栏效应和频谱泄漏的影响,得到的介损值与真实值插值可以达到真实值的 2 倍,其值已经没有参考价值。

由仿真结果可以看出,当频率在 49.5~50.5 Hz 变化时,文[4]的修正频率算法的误差绝对值小于

表 1 3 种算法在频率波动时介损角计算结果

频率/Hz	传统 DFT 算法/ $10^{-5}$ 弧度				谱校正的频率修正算法/ $10^{-5}$ 弧度				布莱克曼窗 DFT 插值法/ $10^{-5}$ 弧度			
	最大值	最小值	标准差	方差	最大值	最小值	标准差	方差	最大值	最小值	标准差	方差
49.5	995	-1 098	1.561	820	0.777	-2.695	-0.800	1.159	-0.232 7	-0.482 0	-0.033 7	0.205 8
49.6	823	-889	-2.31	703	1.866	-4.186	-0.724	1.652	0.180 9	-0.476 1	0.026 6	0.264 2
49.7	652	-605	-1.63	389	0.932	-2.832	-0.708	1.602	0.090 8	-0.527 6	-0.058 8	0.261 4
49.8	463	-287	-0.35	251	0.714	-1.772	0.704	0.638	0.593 7	-0.548 3	0.141 1	-0.131 0
49.9	257	-189	-0.78	143	0.738	-1.944	-0.729	0.660	0.089 6	-0.627 7	-0.061 3	0.241 1
50.0	6.7	-9.6	-1.75	7.91	5.812	-11.47	-1.670	6.459	0.375 1	-0.990 2	0.101 3	0.648 7
50.1	156	-234	0.96	149	0.493	-1.797	-0.736	0.643	0.080 5	-0.061 4	0.084 9	0.138 8
50.2	298	-429	0.64	261	1.136	-2.351	-0.889	1.103	0.255 3	-0.392 5	0.017 8	0.196 5
50.3	541	-689	0.81	394	0.881	-1.129	-0.651	0.672	0.087 4	-0.089 9	0.040 3	0.194 7
50.4	819	-785	1.57	692	0.573	-3.146	-0.865	1.092	0.056 2	-0.308 0	0.052 8	0.012 6
50.5	1 096	-975	-1.96	812	0.836	-3.287	-1.046	1.341	-0.053 1	-0.521 6	-0.027 7	0.205 2

$1.20\times 10^{-4}$  弧度,误差均值能稳定在  $1.67\times 10^{-5}$  弧度以下,标准差在  $6.454\times 10^{-5}$  弧度以下。基于布莱克曼窗的插值修正算法得到的介损角与真实值差值在

$-1\sim 0.6\times 10^{-5}$  弧度之间波动,差值的绝对值不大于  $1\times 10^{-5}$  弧度;并且误差均值能稳定在  $0.02\times 10^{-5}$  弧度以下,标准差在  $0.01\times 10^{-5}$  弧度以 (下转第 269 页)

表3 2005年度广东电网公司GIS设备缺陷(故障)统计

缺陷项目	500 kV(项)	220 kV(项)	110 kV(项)	合计
SF <sub>6</sub> 气体渗漏、气室进水	5	14	28	47
操作机构缺陷	6	18	19	43
导体联接缺陷	4	8	7	19
隔离开关、接地开关故障	0	3	4	7
PT、CT 缺陷	0	1	5	6
CB 断路器本体故障	0	0	1	1
合计	15	44	64	123

故障,建议出厂的GIS设备带正压(气室预充SF<sub>6</sub>气体或氮气)运输和保管较为理想。

(2)随着GIS设备技术的普及和发现多起GIS设备厂家制造、设计的质量故障,应引起制造、采购及现场安装各方的重视。应加大GIS设备的进厂监造和验收工作力度,尤其是现场安装不能打开的设备部件,如断路器等应加强制造质量及工艺的验收,在选择GIS设备供应商的同时也应委托具有资质的设备监造单位进行工厂监造。严格监管现场安装的GIS设备质量,要认识到现场安装的产品质量不一定等同于出厂质量,安装后的GIS设备质量检查应

(上接第238页)下。与修正频率算法对比,基于布莱克曼窗的插值修正算法具有更小的误差,并且精度的稳定性更好,体现了良好的谐波抗干扰能力。

图3是频率在49.5~50.5 Hz变化时,加布莱克曼窗插值算法得到的介损误差的最大值、最小值、均值和标准差,仿真结果显示,该算法得到的误差绝对值小于0.5%,能满足介损在线监测的高精度要求。

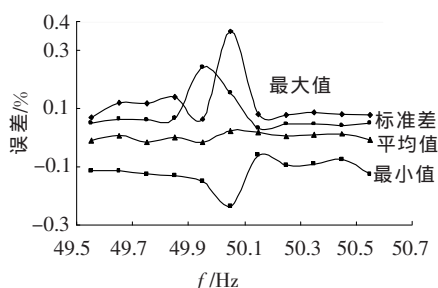


图3 基于加布莱克曼窗算法在频率波动时介损角误差结果

## 4 结论

笔者提出了基于加布莱克曼窗的插值算法来分析介损角测量,该方法具有如下优点:

(1)该算法的计算量虽然比海宁窗插值算法大,但该算法主要以乘法为主,编程实现简单,特别适合于在当前数字处理芯片DSP和ARM上编程实现;

(2)根据介质损耗因数的定义,对加窗插值算法得到介损作了进一步的修正,精度更高。同时在电网频率变化时,该算法能有效减小非同步带来的介

严格认真并做好隐蔽签证记录,不放过任何达不到标准的设备缺陷。

(3)GIS设备耐压试验中出现的放电现象<sup>[7]</sup>,有些虽然未经处理而重新加压试验后又通过了规程允许,但这些规定是针对以往AIS设备的要求,对GIS设备建议应对放电部位解体检查及清理金属异物和杂质,以免可能存在的杂物对日后GIS设备的运行安全造成隐患。

## 参考文献:

- [1] 冯庆东,韩先第. 1000 kV 气体绝缘金属封闭开关设备[J]. 电力设备, 2005, 6(4): 23-25.
- [2] 彭新宏,文江海,黎云. 800 kV 气体绝缘金属封闭开关设备运行维护经验[J]. 电力建设, 2007, 28(1): 23-25.
- [3] 庄晓凤. SF<sub>6</sub> 开关设备抽真空工艺的探讨 [J]. 电力建设, 2005, 26(8): 59-61.
- [4] 肖登明,董越,黄东海. 我国特高压输电工程的GIS技术[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 115-117.
- [5] 阳少军,樊灵孟,林志波. 一次500 kV 罐式断路器事故原因分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 126-127.
- [6] 刘艳,黄松坡,何胜红. 一起GIS交接试验过程中的放电情况分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 73-74.
- [7] 张文亮,胡毅. 特高压输变电设备应用于工程的分析研究[J]. 电力设备, 2005, 6(6): 18-22.

损值误差;

(3)大量数字仿真实验表明,由该算法得到的介损角误差较小,精度稳定性较高。因此,该算法对绝缘在线检测系统介质损耗因数的高精度测量有一定的借鉴意义。

## 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.
- [2] 王晓蓉,李玉志,栾国军. 谐波分析法介损在线检测中采样系统特性的分析[J]. 电力设备, 2005, 6(1): 26-29.
- [3] IGNACIO S C, CARLOS J P P, JESUS I D, et al. Improved Procedures for Estimating Amplitudes and Phases of Harmonics with Application Analysis [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 209-214.
- [4] 徐志钮,律方成,赵立娟,等. 结合频谱校正的修正理想采样频率方法用于介损角测量[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 365-367.
- [5] 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, 2001, 41(9): 5-8.
- [6] 柴旭峰,关根志,文习山,等. 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.
- [7] 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): 4-9.
- [8] 庞浩,李东霞,焰云霄. 应用FFT进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
- [9] 张志涌. 精通MATLAB6.5[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [10] 赵智大. 高电压技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.