

# 介损角测量中非同步采样算法的研究

陈楷, 王卉, 张承学

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 介绍了基波相位分离法测量介质损耗角的原理, 指出了目前的软件同步采样措施难以实现真正的同步采样, 并通过推导得出非同步采样条件下的基波相位分离法的算法。使用本算法, 在测量时可以以固定采样率进行采样, 不必根据电网频率调整采样间隔。仿真结果表明, 该算法具有很高的精度。

**关键词:** 介质损耗角; 基波相位分离法; 非同步采样

**中图分类号:** TM835.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)14-0005-03

## 0 引言

介质损耗角是反映高电压电气设备绝缘性能的一项重要指标。通过测量介质损耗角可以反映出绝缘的一系列缺陷, 如绝缘受潮、劣化变质或绝缘中有气体发生放电等。由于实际高压电气设备的介质损耗角通常很小, 因而对测量的绝对精度要求较高。本文对用基波相位分离法测算介质损耗角时由于非同步采样引起的误差进行了分析, 并提出了非同步采样下的补偿算法。

## 1 测量原理及误差

通常电容型设备的绝缘结构可以等效成无损电容  $C$  和电阻  $R$  的并联(或串联)电路的物理模型, 因此设备上加电压  $U$  时, 流过设备的电流就含有容性电流和阻性电流。流过设备基波电流和设备两端基波电压的相角差的余角我们定义为介质损耗角, 其正切值即介质损耗因数。由于通常情况下流过设备的阻性电流相比容性电流很小, 所以介质损耗角很小。

实际中由于电压和电流信号中含有高次谐波, 它们对基波相位的测量有不可忽视的影响<sup>[1]</sup>。要实现介质损耗角的高精度测量, 必须消除谐波影响。

目前常用的算法是基波相位分离法(傅氏算法)<sup>[2]</sup>。基波相位分离法利用三角函数的正交性, 通过采样信号与基波频率的正余弦样品函数进行周期积分(即在进行傅立叶变换的时候, 信号只对基波频率进行变换), 从而得到需要的基波分量的幅值和相位特征信息。具体过程如下:

设电压信号为  $u = U \sin(\omega t + \varphi)$ 。令

$$A = \int_0^T u \cos \omega t d(\omega t) = U \sin \varphi \quad (1)$$

$$B = \int_0^T u \sin \omega t d(\omega t) = U \cos \varphi \quad (2)$$

这样可得电压基波的初相角的正切值  $\tan \varphi = A/B$ , 同理可得电流基波的初相角的正切值。从而可算出两者的相角差, 进而得到介质损耗角。

实际测量过程中, 需将式(1)、(2)用数值积分方法离散化。设采样间隔为  $T_s$ , 被测信号的基波周期为  $T$ , 且  $T = N \cdot T_s$ , 即一个周期采样  $N$  点。

则令

$$A = \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cos \frac{2\pi}{N} k \quad (3)$$

$$B = \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \sin \frac{2\pi}{N} k \quad (4)$$

## Application of grey relational analysis to judging the type of fault phase in transmission line

ZHOU jing<sup>1</sup>, CHEN Yurping<sup>1</sup>, LIANG Jin<sup>2</sup>, ZHOU Ce<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of System Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Based on the principle of grey relational analysis, the application of judging the fault type of transmission line is proposed. With the grey relational analysis of actual fault data from all kinds of fault types and RTDS, the type of fault phase is obtained. And the test demonstrates that the proposed method is reliable and feasible.

**Key words:** grey relational analysis; judging the type of fault phase; transmission line

其中  $u(k)$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) 为采样点上的电压值,  $\cos \frac{2}{N}k, \sin \frac{2}{N}k$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) 作为常量数据存放在存储单元中。

这种算法对被测信号的直流偏移、谐波干扰具有很强的抑制能力, 当采样转换的数据量足够大时, 这些因素对最后测量结果的影响可不予考虑。但式(3)、(4)的前提是被测信号周期  $T$  是采样间隔  $T_s$  的整数倍, 即进行同步采样。为达到同步采样, 通常的做法是先测出交流信号周期, 用该周期除以一周内的采样点数  $N$  得到采样间隔进行采样。但受微机内定时器最小计时周期的限制, 上述方法很难得到理论上的采样间隔。为此, 有人提出双速率同步采样方法<sup>[3]</sup>以减小此误差, 但双速率采样要在采样过程中变换定时时间, 给实现操作带来麻烦。而且实际工频信号的频率是在变化之中, 根据前一时刻的周期计算得到的采样间隔在数据采集时已经不是同步采样间隔了, 从而不可能实现真正的同步采样。本文提出一种在非同步采样条件下的补偿算法, 大大提高了测量精度, 计算量也不大。

## 2 非同步采样补偿算法

非同步采样时, 被测信号周期  $T$  和  $N \cdot T_s$  不相等。设  $T = (N + M + e) \cdot T_s$ , 其中  $M$  为整数,  $M$  远小于  $N$ ,  $e$  为正的纯小数。以下为分析方便, 假设  $M$  为正整数,  $M$  为负整数时的情况与之类似。

此时, 对于式(1)、(2)离散化, 应有:

$$A = \sum_{k=0}^{N+M-1} u(k) \cos\left(\frac{2}{N+M+e}k\right) + [e \cdot u(N+M) \cdot \cos(2)] \quad (5)$$

$$B = \sum_{k=0}^{N+M-1} u(k) \sin\left(\frac{2}{N+M+e}k\right) + [e \cdot u(N+M) \cdot \sin(2)] \quad (6)$$

等式右边第一项为  $N+M$  个点的采样值与样品函数的乘积和, 第二项为采样间隔小数部分的乘积项。可以看出, 与同步采样时相比,  $A$  和  $B$  不仅仅是多了几个乘积项, 样品函数也发生了偏差。利用泰勒级数, 略去高阶项, 有下面的近似式成立。

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{2}{N+M+e}k\right) & \approx \cos\left(\frac{2}{N}k\right) - \left(\frac{2}{N+M+e}k - \frac{2}{N}k\right) \cdot \\ & \sin\left(\frac{2}{N}k\right) \quad \cos\left(\frac{2}{N}k\right) + \frac{2(M+e)}{N \cdot N}k \cdot \sin\left(\frac{2}{N}k\right) \\ \sin\left(\frac{2}{N+M+e}k\right) & \approx \sin\left(\frac{2}{N}k\right) + \left(\frac{2}{N+M+e}k - \frac{2}{N}k\right) \cdot \\ & \cos\left(\frac{2}{N}k\right) \quad \sin\left(\frac{2}{N}k\right) - \frac{2(M+e)}{N \cdot N}k \cdot \cos\left(\frac{2}{N}k\right) \end{aligned}$$

代入式(5)有:

$$\begin{aligned} A & = \sum_{k=0}^{N+M-1} u(k) \cos\left(\frac{2}{N}k\right) + \frac{2(M+e)}{N \cdot N} \sum_{k=0}^{N+M-1} k \cdot \\ & u(k) \sin\left(\frac{2}{N}k\right) + e \cdot u(N+M) = \\ & \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cos\left(\frac{2}{N}k\right) + \sum_{k=0}^{M-1} u(k+N) \cdot \\ & \cos\left(\frac{2}{N}k\right) + \frac{2(M+e)}{N \cdot N} \cdot \left[ \sum_{k=0}^{N-1} k \cdot \right. \\ & u(k) \sin\left(\frac{2}{N}k\right) + \sum_{k=0}^{M-1} k \cdot u(k+N) \cdot \\ & \left. \sin\left(\frac{2}{N}k\right) \right] + e \cdot u(N+M) \end{aligned}$$

由于  $M$  远小于  $N$ , 上式方括号中第二项与第一项相比很小, 方括号外面又有一个很小的系数, 故可将该项略去。从而得:

$$\begin{aligned} A & = \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cos\left(\frac{2}{N}k\right) + \sum_{k=0}^{M-1} u(k+N) \cos\left(\frac{2}{N}k\right) + \\ & \frac{2(M+e)}{N \cdot N} \sum_{k=0}^{N-1} k \cdot u(k) \sin\left(\frac{2}{N}k\right) + e \cdot u(N+M) \quad (7) \end{aligned}$$

用类似的方法可得:

$$\begin{aligned} B & = \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \sin\left(\frac{2}{N}k\right) + \sum_{k=0}^{M-1} u(k+N) \sin\left(\frac{2}{N}k\right) - \\ & \frac{2(M+e)}{N \cdot N} \sum_{k=0}^{N-1} k \cdot u(k) \cos\left(\frac{2}{N}k\right) \quad (8) \end{aligned}$$

式(7)、(8)即非同步采样下的算法, 以此得到的  $A$ 、 $B$  再计算初相角。

分析上面两个等式, 两式右边第一项为同步采样时的计算式, 式(7)右边第二、四项, 式(8)右边第二项为信号周期发生变化的误差补偿项, 两式右边第三项为信号与样品函数不同步的误差补偿项。

## 3 仿真与分析

以下仿真结果通过 Matlab6.1 仿真软件得到。

设采样率为 50 k, 即  $T_s$  为 20  $\mu$ s,  $N$  为 1000。信号周期  $T = (N + M + e) \cdot T_s$ 。

设信号为:

$$S(t) = \sin\left(\frac{2}{T}t\right) + 0.5 \sin\left(3 \cdot \frac{2}{T}t\right) + 0.2 \sin\left(5 \cdot \frac{2}{T}t\right)$$

分别按照补偿前和补偿后的计算式计算, 得到仿真结果如表 1 所示(误差是指计算得到的初相角与理论值的差值, 以度为单位)。

表1 补偿前后的误差比较

Tab.1 Comparison of errors before and after compensation

$M+e$	0	0.5	2.5	5	10	20
未补偿算法误差/(%)	0	0.089	0.44	0.86	1.66	3.09
补偿算法误差/(%)	0	0.0009	0.0009	0.0009	0.0016	0.0077

该仿真中假设基波理论初相角为零,实际上这是误差最小的情况。在数据处理时,为了提高算法精度,最好选择计算起始点使初相角尽量接近零。

从仿真结果可以看出,当周期的增加在2%以内时,采用固定50k采样率进行采样,用本文所提的补偿算法计算,其理论误差不超过0.01%。从而可实现非同步采样的相角测量。

实际计算时,与未补偿算法相比,计算量的增加主要在式(7)、(8)的右边第三项上,这只需在计算两式右边第一项过程中每次累加时增加一次乘法运算即可。利用正余弦函数的对称性,还可以进一步减少运算量<sup>[4]</sup>。

#### 4 结论

本文提出的非同步采样条件下基波相位分离法的补偿算法,在增加较少的运算量的同时,大大提高了测量精度,从而可以在恒定采样率下实现高精度的相角测量。该方法使用目前的高性能51单片机即可实现,具有较高的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 张佑峰(ZHANG Youfeng). 谐波对相位测量的影响(Harmonic Affection on Phase Measuring) [J]. 计量学报(Acta Metrologica Sinica), 1998, (2): 26-29.
- [2] 陈德树(CHEN De-shu). 计算机继电保护原理与技术

(The Principle and Technology of Computer Protection on Power System) [M]. 北京: 水利水电出版社(Beijing: Publishing House of China Water Resources and Hydropower), 1992.

- [3] 王伟林,王立功(WANG Wei-lin, WANG Li-gong). 双速率同步采样法在交流测量中的应用(Application of Two-tempi Synchronous Sampling on AC Measuring) [J]. 电测与仪表(Electrical Measurement and Instrumentation), 1997, 34(4): 21-23.
- [4] 陈光大,周鑫玉(CHEN Guang-da, ZHOU Xin-yu). 一种测量电信号基波分量的快速算法(A Fast Algorithm for Measurement of Fundamental) [J]. 电站系统工程(Power Station System Engineering), 1998, 14(1): 58-61.
- [5] 王瑞明,曹庆文,董连文(WANG Rui-ming, CAO Qing-wen, DONG Lian-wen). 数字式介质损耗因数tan 检测仪的设计(Design of Measuring System of Dielectric Loss Tangent for Capacitive-type Equipment) [J]. 电测与仪表(Electrical Measurement and Instrumentation), 2003, 40(2): 11-14.
- [6] 史旺旺,陈虹(SHI Wang-wang, CHEN Hong). 交流采样的误差分析与补偿(Analysis and Compensation of AC Sampling) [J]. 电测与仪表(Electrical Measurement and Instrumentation), 1999, 36(10): 4-6.

收稿日期: 2003-10-28; 修回日期: 2003-11-29

作者简介:

陈楷(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: kane-ok@263.net

王卉(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

张承学(1952-),男,教授,博士生导师,从事电力系统及其自动化专业的科研和教学工作。

### Research on dielectric loss angle measurement in the condition of non-synchronous sampling

CHEN Kai, WANG Hui, ZHANG Cheng xue

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This paper introduces the principle of Fourier algorithm on dielectric loss angle measurement, and points out the fact that perfect synchronous sampling could hardly be realized, then presents a compensation algorithm in the condition of non-synchronous sampling with deduction. Using this algorithm, this paper has adopted fixed sampling rate when measuring without adjusting sampling intervals according to net work frequency. Simulation shows that this algorithm has a high precision.

**Key words:** dielectric loss angle; Fourier algorithm; non-synchronous sampling