

基于 Fourier 级数的相位差算法在 MOA 检测中的应用

王又佳, 段大鹏, 江秀臣, 曾奕, 盛戈皞

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: MOA 阻性电流检测的关键在于电压基波分量与泄漏电流基波分量相位差的检测。在分析现有相位差检测算法的基础上,应用 Fourier 级数分解方法与线性空间中正交向量内积为零的特性,推导出了一种新的相位差检测算法。该算法首先分别求得电压基波分量与泄漏电流基波分量的相位角,进而将两相位角相减即可求得相位差,并给出了该算法的离散化计算公式。该算法的正交运算同时可以将信号中的高次谐波与白噪声滤除。最后通过仿真分析了 A/D 量化位数、采样频率与电压频率波动对该算法测量精度的影响,并通过 MOA 实测与计算验证了该算法的正确性与有效性。该算法无需确定过零点,克服了电网谐波的影响,且计算精度高,易于实现。

关键词: Fourier 级数; 线性空间; 正交向量; 相位差检测; MOA 阻性电流

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0142-04

An Algorithm of Phase Difference Measurement Based on Fourier Series with Application in Detection of MOA

WANG You-jia, DUAN Da-peng, JIANG Xiu-chen, ZENG Yi, SHENG Ge-hao

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The key to the detection of MOA resistive current is the detection of the phase difference between fundamental component of voltage and fundamental component of leakage current. Based on the analysis of conventional phase difference detection method, a new algorithm of phase difference detection is presented according to Fourier series decomposition method and the characteristic that inner product of two orthogonal vectors in a linear space is zero. The algorithm calculates the phase of fundamental component of voltage and the phase of fundamental component of leakage current, respectively, and then calculates their difference. Furthermore, the calculation principle and discrete calculation formula of the algorithm is introduced. Higher-order harmonic and white noise can be suppressed and filtered simultaneously by the orthogonal calculations in the algorithm. Correctness and validity of the algorithm are verified through simulation and MOA resistive current test. This algorithm is simple to implement without determining the crossing zero point, and can remove the interference of harmonic voltage in calculation with a high precision.

Key words: fourier series; linear space; orthogonal vector; phase difference detection; MOA resistive current

0 引言

相位差检测在电力设备状态监测、信号变换、信息采集、控制等方面有着重要的意义^[1]。相位差检测的现有方法可以分为过零点电压比较法、相关分析法和填充计数法。

过零点电压比较法^[2-4]是测量两个正弦波在过零点附近的电压差,并由电压差来计算相位差的方法。该方法的基本测量条件是相位差小、两个正弦波的频率相同、没有谐波分量、两个正弦波幅值相等^[5]。有谐波情况下,使用过零点法测量得到的相位

角和电压幅值并非纯粹是基波的相位角和电压幅值,而是各次谐波矢量叠加波形的相位角和电压幅值,测量并不准确^[6]。相关分析法^[7]是使用两同频率正弦信号的互相关函数零时刻值与其相位差成正比的原理得到相位差的。但由于过零时间的确定较为困难,且空间干扰在有固定干扰源的情况下也并非完全不相关,故测量不准确。填充计数法^[8,9]是将同频的正弦信号输入到信号整形电路,得到方波信号,方波信号经过鉴相器后得到两路输入信号的相位差信号,对其用固定频率的脉冲进行填充后用脉冲计数器进行计数并换算出两信号的相位差的方法。但由于这种方法需要精确确定过零点时间,故测量误

收稿日期:2008-07-07; 修回日期:2008-12-12

作者简介:王又佳(1985),男,硕士研究生,主要研究方向为电力设备在线监测。

差的控制比较困难。

鉴于现有方法有需要准确确定信号过零点、两路检测信号幅值需要相等、受到谐波信号影响等不足,提出了基于 Fourier 级数的相位差检测算法,它拥有无需确定零点、信号幅值无需相等、消除高次谐波干扰、测量精度高等优点,可用于相位差的在线监测与离线测量。

1 基于 Fourier 级数的相位差检测算法

1.1 信号的 Fourier 级数展开

周期为 T 的周期信号 $f(t)$, 满足狄里赫利条件, 便可以展开为式(1)所示的 Fourier 级数三角形形式^[10], 即

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

式(1)中, $\omega = 2\pi/T$, a_n 与 b_n 为 Fourier 系数。如果将式(1)中的同频率项加以合并, 可以写成另一种形式

$$f(t) = D_0 + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2)$$

式(2)中,

$$\varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n} \quad (3)$$

如果认为 $f(t)$ 是一组频率为 $m\omega$ ($m=1, 2, \dots$) 的正弦信号的叠加, φ_n 就是频率为 $n\omega$ 的正弦波的初始相位值。

式(1)表明, 任何满足狄里赫利条件的周期信号可分解为直流和多个正弦、余弦分量的和, 其中第一项为常数项, 它是周期信号中所包含的直流分量, 式中的正弦、余弦分量的频率必定是基频 $f(f=1/T)$ 的整数倍。

1.2 基于 Fourier 级数的相位差检测算法

在进行相位差检测分析所需的采样时间内, 可以认为电力系统的电压、电流值为一个稳定的周期信号, 仅含正弦奇次谐波分量^[11, 12]。可以证明, 电压、电流值属于封闭的线性空间^[13], 且 Fourier 级数的三角函数系是这个线性空间的一组正交基。而电压、电流均为该空间的向量, 即均可由三角函数系线性表出。故可将电压、电流分解为 Fourier 级数的形式^[14]

$$\begin{cases} u = \sum_{k=1}^{\infty} u_{2k-1} \sin[(2k-1)\omega t + \varphi_{u,2k-1}] \\ i = \sum_{k=1}^{\infty} i_{2k-1} \sin[(2k-1)\omega t + \varphi_{i,2k-1}] \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, ω 为电网电压的工频基波角频率。

对电压分别乘以工频基波的正弦和余弦信号, 并在一个工频周期内积分, 根据三角函数的正交性质得到

$$\begin{cases} M_{U\varphi 0} = \int_0^T u \sin \omega t dt = \\ \int_0^T U_1 \sin(\omega t + \varphi_{u,1}) \cdot \sin \omega t dt = \\ \cos \varphi_{u,1} \int_0^T \sin^2 \omega t dt \\ M_{U\varphi 1} = \int_0^T u \cos \omega t dt = \\ \int_0^T U_1 \sin(\omega t + \varphi_{u,1}) \cos \omega t dt = \\ \sin \varphi_{u,1} \int_0^T \cos^2 \omega t dt \end{cases} \quad (5)$$

根据式(3)对 $\varphi_{u,1}$ 的定义, 可得到电压基波的初相位

$$\varphi_u = \varphi_{u,1} = \arctan \frac{M_{U\varphi 1}}{M_{U\varphi 0}} \quad (6)$$

同理可得到电流基波的初相位 φ_i 。将两者相减就可以得到基波电压与电流的相位差。

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (7)$$

将上述算法离散化并化简, 得到基波电压与电流相位差的离散化计算公式

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} U(n) \sin \frac{2\pi n T}{N}}{\sum_{n=0}^{N-1} U(n) \cos \frac{2\pi n T}{N}} - \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I(n) \sin \frac{2\pi n T}{N}}{\sum_{n=0}^{N-1} I(n) \cos \frac{2\pi n T}{N}} \quad (8)$$

式(8)中, $U(n)$ 、 $I(n)$ 为第 n 次的采样得到的值; $N=Tf$ 为总共的采样次数, f 为采样频率, T 为一个工频周期的时间。

2 仿真分析

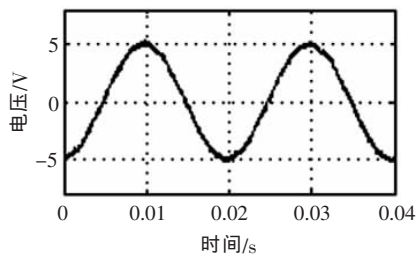
为了验证所提算法的有效性, 对 A/D 量化位数、采样频率以及电压频率波动对测量精度的影响进行了仿真, 测量误差以电角度值表示。

仿真设置如下: 设输入到采集端的电压幅值为 5 V, 电流幅值为 20 mA, 电压、电流波形中含有 3、5、7、9、11、13 次谐波和模拟空间干扰的高斯白噪声, THD(总谐波失真率)控制在 2% 左右。仿真用电压、电流波形见图 1。

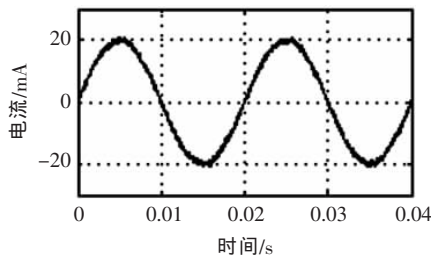
2.1 A/D 量化位数的影响

输入仿真电压、电流信号, 采样率为 50 kHz。A/D 量化位数分别为: 4 位、8 位和 16 位。由于白噪声的存在, 误差是一个随机数, 故进行多次运算, 观察误差的统计特性。每种量化位数情况下得到的计算误差分布情况见图 2。

由图 2 可见, 此种算法对于量化位数的要求并

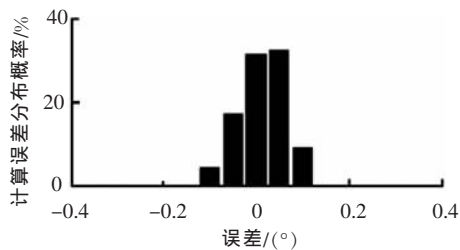


(a)电压信号

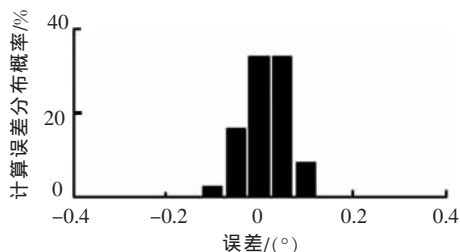


(b)电流信号

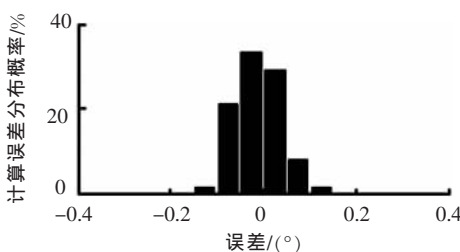
图1 仿真中使用的电压、电流波形



(a)使用4位量化时



(b)使用8位量化时



(c)使用16位量化时

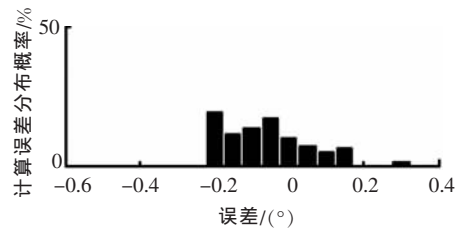
图2 不同量化位数造成的误差分布

不高,4位量化位数也可以将误差控制在 $\pm 0.2^\circ$ 内。在实际应用当中,常用的8位量化可以满足一般应用的精度要求。

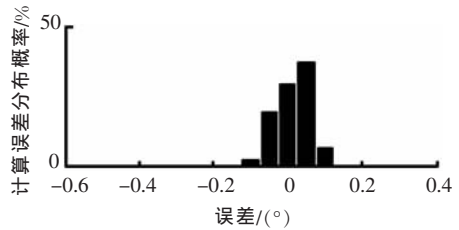
2.2 采样频率的影响

输入仿真电压、电流信号,使用8位量化位数对数据进行量化。采样率分别为:5、50、500 kHz。每种采样率情况下得到的计算误差分布情况见图3。

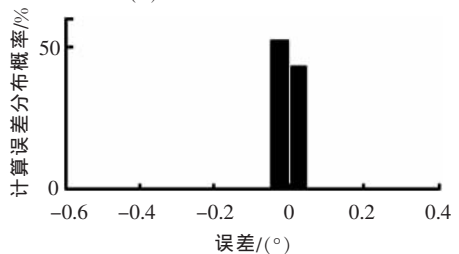
观察不同采样频率造成的误差分布,可见随着



(a)使用5 kHz采样频率时



(b)使用50 kHz采样频率时



(c)使用500 kHz采样频率时

图3 不同采样频率造成的误差分布

采样频率的上升,计算误差下降。造成此种现象的原因是从空间耦合进电压电流信号的高斯白噪声对此产生的影响。从时域上看,高的采样频率可以使得采样后的信号和原始信号更为相似。从频域上看,工频的13次谐波的频率为650 Hz,处于实验中所使用的采样频率的奈奎斯特^[10]频率(最低2.5 kHz)以下,不会造成混叠。而高斯白噪声在各个频率上都有分布,故在此处造成了混叠干扰。当采样频率升高,奈奎斯特频率也升高,造成混叠的能量也随之降低,故误差也降低。

2.3 电压频率波动

在被测信号为工频正弦的情况下,该算法的误差仅产生于量化误差和计算时的截断误差。但在电力系统中,电压频率会在49.5~50.5 Hz之间波动,这种情况对此算法的精度会产生一定的影响。

设电压的工频频率在49.5~50.5 Hz之间变化,采样位数为8位,采样频率为50 kHz,每隔0.02 Hz对此种算法进行多次计算,观察不同频率点的误差均值。仿真结果见图4。

当系统中的基频发生波动时,误差也随之增大,其原因是基频变化后,和原本的3、5、7、9、11、13次谐波正交的50 Hz工频信号与高次谐波不再正交,在一个工频周期内的积分值不为零,误差增加,但在最差情况下,该算法的误差仍能保持在 0.1° 以内,符合普遍的精度需求。

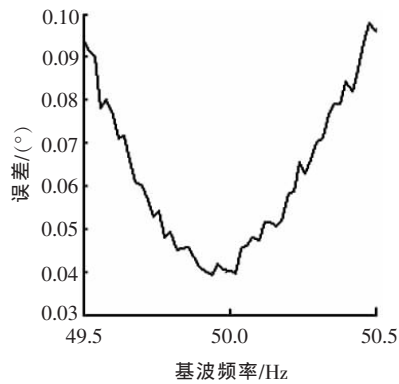


图4 频率漂移情况下误差的变化

3 在 MOA 阻性电流检测中的应用

运行电压下 MOA 泄漏电流的阻性分量被认为是可以判别 MOA 运行状态的重要依据^[15, 16]。而测量泄漏电流的阻性分量本质上就是测量 MOA 两端的电压和流过 MOA 的泄漏电流之间的相位差。

将笔者所提算法应用于 10 kV 的 MOA 阻性电流检测当中, 试验系统接线见图 5。通过分压电容器与电阻分压网络测量 MOA 两端的电压信号, 通过 1 kΩ 取样电阻测量 MOA 的泄漏电流信号, 输入数字存储示波器。考虑到电容式电压互感器的容值, 故取兆级的电阻以避免测量网络造成的电压相位误差。测量得到电压、电流波形为见图 6, 其中曲线 1 为泄漏电流波形, 曲线 2 为电压波形。

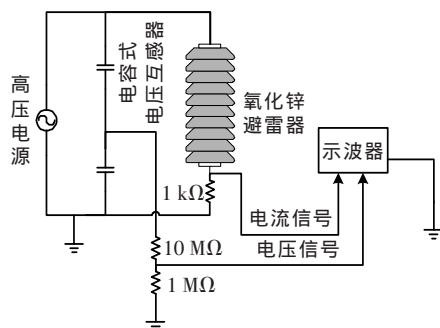


图5 MOA 测试系统示意图

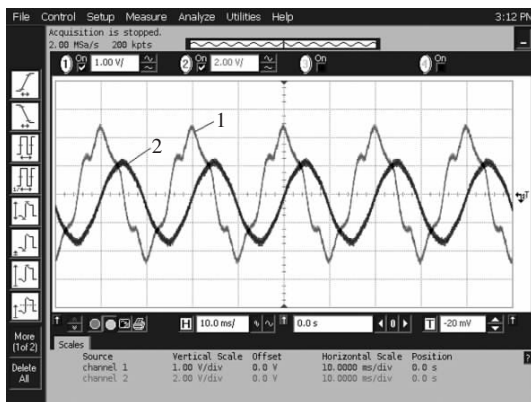


图6 测试得到的电压、电流信号

将原始信号使用 FIR 滤去高次谐波, 再使用小

波滤波方法滤去白噪声, 求出其精确的基波频率, 使得 FFT 的频率点能精确地落在这个点上。使用上述繁琐但精确的方式求得的电压电流相位差为 -85.1062° , 即为电流信号超前电压信号 85.1062° 。使用文中所介绍的算法, 用 8 位量化位数和 50 kHz 采样率来进行计算, 得到的结果为 85.0139° 。从计算结果中可以看出, 该算法和精确值之间的误差为 0.0823° , 测量精度在 1% 以内, 符合 DL/T 987-2005 《氧化锌避雷器阻性电流测试仪通用技术条件》中对于测量精度的要求, 并可以留给硬件设计充分的误差余量。

4 结论

(1) 总结了现有的相位差检测方法, 提出了现有方法的不足: 需要精确寻找电压过零点; 难以消除谐波对测量精度的影响; 输入信号幅值不相等对计算结果的影响。应用 Fourier 级数与正交向量内积为零的特性提出了一种相位差测量算法。

(2) 仿真结果显示在量化位数 8 位、采样率为 50 kHz 的情况下, 该算法误差均值在 0.05° 以内; 当系统基频漂移到 49.5 Hz 或 50.5 Hz 的情况下, 误差均值仍然在 0.1° 以下; 在 MOA 阻性电流检测中使用了该算法, 计算得到的结果与精确值之间的误差在小于 0.1° 。从而验证了该算法的正确性和有效性, 完全可以用于 MOA 阻性电流的检测。

(3) 提出的基于 Fourier 级数的相位差检测算法具有以下优点: 无需寻找电压电流的过零点; 电压电流信号的幅值不必相等; 无需滤波与 FFT 变换; 消除了高次谐波与白噪声的影响; 算法简单, 易于实现。

参考文献:

- [1] WAN K W, AUSTIN J, VILAR E.A Novel Approach to the Simultaneous Measurement of Phase and Amplitude Noise of Oscillators [C]/Proceedings of the Forty-fourth Annual Frequency Control Symposium. Piscataway NJ, 1990: 140-144.
- [2] CAI Guo-xiong. The Dielectric Loss Evaluation by Zero Cross Point Voltage Measurement [C]/ICPST'94, Beijing, China, 1994: 1295.
- [3] 蔡国雄, 甄为红, 杨晓洪, 等. 测量介质损耗的数字化过零点电压比较法 [J]. 电网技术, 2007, 26(7): 15-18.
- [4] FRIEDMAN V.A Zero Crossing Algorithm for Estimation of the Frequency of a Single Sinusoid in White Noise [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(11): 1565.
- [5] 蔡国雄. 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.
- [6] 傅中君. 应用过零法和谐波分析法精确测量 MOA 阻性电流基波 [J]. 电瓷避雷器, 2004(2): 35-39.

(下转第 149 页)

3.2 数据导出到 Excel 表格

使用该功能可将数据库中数据导出到 Excel 电子表格,这样其他用户无需安装本信息管理系统软件和数据库及软件即可查看相关数据。实现该功能的基本方法是采用 Delphi 自带的 Excel Application 组件,在程序中将 ADOQuery 的相应的字段名及所有的记录依次赋值给 Excel 电子表格,程序自动将记录保存在 Excel 中。

4 实际应用

目前该系统已经在河北超高压局得到了应用,各项指标满足设计要求,其中管理系统的主界面见图4。



图4 管理系统主界面

紫外检测信息记录表中,对于“紫外图像”、“放电现象描述”、“放电原因分析”等几项可能需要记录较多的文字,系统采用 DBImage 和 DBMemo 等组件直接与“紫外检测信息记录表”的上述相应字段连接,当表格浏览位到某行时,系统自动将当前记录通过这些组件在主界面进行显示。图4显示的为数据库中的第一条记录,记录的是保定保北500kV变电站的悬挂母线的V型串中的一片绝缘子存在的放电。由于是在下雪天拍摄,分析其原因可能是污秽或者水珠放电引起,采用GVF snake提取该放电区

域,经计算得知其面积(也即放电区域内的像素的个数)为292。当点击“状态评估”按钮后,系统提示“可能由于表面污秽度过大或水珠引起放电,一般无需处理”,与人工判断结果基本一致。限于篇幅,其它的有关功能在此不再一一介绍。

5 结语

笔者结合紫外成像检测法的特点和电力系统的需求开发了该管理系统,采用 Delphi 软件结合 SQL Server2000 数据库实现了对数据的有效管理,系统具有数据的删除、修改、插入、报表生成及数据导出等功能,采用图像处理技术必要时对紫外图像进行处理,改善了图像质量,提取了有关参数,系统还具有一定的状态评估功能,可用于指导现场故障判断和检修。实践证明该系统提高了紫外检测系统信息管理的可靠性,减轻了检修人员的劳动强度,对紫外成像检测技术在我国电力系统中的应用起到了一定的推动作用。

参考文献:

(上接第145页)

- [1] 陈涛.基于非接触式的劣化绝缘子检测方法的研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [2] 戴利波.紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J].电力系统自动化,2003,27(20):97-98.
- [3] 启明工作室.Delphi +SQL Server 数据库应用系统开发与实例[M].北京:人民邮电出版社,2005.
- [4] 姚巍.Delphi 数据库开发及精彩实例[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [5] PINNANGUDI B, GORUR R S, KROESE A J. Quantification of Corona Discharges on Nonceramic Insulators [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 513-523.
- [6] 刘骏.Delphi 数字图像处理及高级应用[M].北京:科学出版社,2003.
- [7] 罗军辉,冯平,哈力旦,等.MATLAB7.0 在图像处理中的应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [8] 崔屹.图像处理与分析-数学形态学方法及应用[M].北京:科学出版社,2000.
- [9] 王利敏.梯度矢量流(GVF)变形模型在医学图像分割中的应用[D].青岛:中国海洋大学,2005.
- [7] 张家生,刘扬.相位检测方法研究[J].仪器仪表学报,2003,24(4):307-309.
- [8] 王茹,邢毓华.一种提高谐波相位检测精度的方法[J].西安建筑科技大学学报,2004,36(1):116-118.
- [9] 沈维聪,刘义菊.填充计数式相位测量分析与实现[J].电子测量技术,2000(4):13-15.
- [10] 胡光锐.信号与系统[M].上海:上海交通大学出版社,2005.
- [11] 周本多,杨圣春.电力系统谐波及其抑制[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2007,12(1):13-16.
- [12] 李达义,陈乔夫,贾正春.电力系统谐波源的种类和滤波方法综述[J].电气传动,2005(35):3-7.
- [13] 苏育才,姜翠波,张跃辉.矩阵理论[M].北京:矩阵理论,2003.
- [14] 王现军,姬波.电力系统谐波功率分量的快速估计[J].现代电子技术,2003(21):99-102.
- [15] 汲胜昌,杨兰均.在线监测氧化锌避雷器的容性电流补偿法[J].高电压技术,2000,26(4):16-21.
- [16] 周龙,文远芳.金属氧化物避雷器运行状态监视中变系数补偿法和阀片性能诊断方法的研究[J].电工技术学报,1998,13(6):21-24.