

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.011

采用GPS/北斗双星同步采集技术的分布式 无线高压绝缘带电测试的研究

鞠登峰¹, 张伟政², 李 宁³, 周 兴¹, 李忠晶¹, 钟 浩², 季国剑²

(1. 南瑞集团, 南京 210003; 2. 国网河南电力公司, 郑州 450052;

3. 国网山东电力集团公司, 济南 250001)

摘要: 随着智能电网建设和状态检修工作的开展,需要及时掌握电容型设备、避雷器等绝缘状态。但目前绝缘在线监测、带电检测技术在检测精度、设备可靠性等方面存在不足,并未被电力部门广泛应用。文中研究了基于高精度GPS/北斗双星同步采集和分布式无线便携式带电测试系统,以提高绝缘检测的精度和便捷性。文中介绍了该系统实现的原理,GPS/北斗的PPS秒脉冲直接硬件控制的方式启动 Σ - Δ 型AD数据采集,和软件流程的时序协同控制,利用改进的迭代—正交算法,极大的降低了相对介损测量误差,提高了数据的重复性与稳定性。对算法的影响、PPS硬件同步性能进行了比对研究,并对整个系统的性能进行了测试。结果表明:该系统实现了对相对介损的高精度采集测量,相对介损的误差 $<0.05\%$,完全满足现场绝缘带电检测的要求。该带电测试系统,已经成功地应用于变电站容性设备、避雷器的带电测试中,提高了测试的效率和性价比。

关键词: 全球定位系统;PPS秒脉冲;同步采集;介损;带电测试;正交算法

Study of Implementing GPS/BD PPS Pulse to Synchronize Sampling in a Disturbed Wireless System for Insulation Live Testing

JU Dengfeng¹, ZHANG Weizheng², LI Ning³, ZHOU Xing¹,

LI Zhongjing¹, ZHONG Hao², JI Guojian²

(1. NARI, Nanjing Jiangsu 210003; 2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: With the development of smart grid and CBM, it's important to get the insulation status of capacitive devices and MOA. The on-line testing and live testing are still insufficient in precision and equipment's reliability, so they aren't used widely by power companies. In this article, a portable live testing system which based on high-precision synchronize sampling with GPS/BD and wireless is studied to improve the precision and convenience of test. The systems theory is introduced, the technologies which apply hardware of GPS/BD-s PPS to start sampling of Σ - Δ type AD, and coordinate with timing under flow control of software, and improve iteration-orthogonal algorithm, reduces the error of relative dielectric loss test, improves the repeatability and stability of data. The algorithm and synchronize performance are studied with comparison. The system's performance is tested. The result shows that this system can measure relative dielectric loss with very high precision which's error less than 0.05%. This system has been used successfully in a substation's capacitive devices and MOA test, and it improves the test efficiency and cost performance greatly.

Key words: GPS; PPS Pulse; synchronizing sample; dielectric loss; live testing; orthogonal algorithm

0 引言

收稿日期:2017-06-05; 修回日期:2017-07-12

基金项目:国家电网2013年纵向科技项目(SGSC[2013]-25)。

Project Supported by 2013 Longitudinal Science and Technology Program of SGCC(SGSC[2013]-25).

电容型设备是重要的变电设备,主要包括电流

互感器(TA)、套管、耦合电容器(OY)和电容式电压互感器(CVT)等,这些设备约占变电站设备总量的40%~50%^[1]。这些设备虽然价值低,但发生绝缘故障时不仅影响整个变电站的安全运行,同时还危及其它设备和人身的安全,因而对其绝缘状况进行在线监测具有重要意义。随着电网公司智能电网建设和状态检修工作的开展,需要相关技术及时掌握电容型设备、避雷器等的绝缘状态。经过多年的研究与实践,采用在线监测或带电检测的方式测量电容型设备的介损 $\tan\delta$ 、电容量 C 或避雷器的阻性电流 I_r ,能够及时反映设备的绝缘状态^[1-7]。

从20世纪90年代开始,出现了大量采用现场总线的分布式绝缘在线监测系统^[8-9]。但由于装置的工作环境恶劣,故障率高、数据易受干扰等原因,采用该技术的用户已经不多。目前,实用化的带电检测技术,越来越受到电力公司的重视。广州供电局采用有线的RCD-1仪器,开展同相比较法的电容型设备带电测试,取得了良好的效果^[10]。但是该方法测量时需要转换设备末屏的接地方式,操作复杂,存在安全隐患。目前应用的绝缘在线监测、带电检测技术在检测精度、设备可靠性等方面存在不足,并未被电力部门广泛应用。华北电力大学等对采用GPS同步授时技术、无线技术的电容型设备绝缘检测系统^[11-12]也进行了探索研究,但介损的测量精度仅可以达到 $\pm 0.3\%$,已超过介损的真实值。文中对采用无线通信技术的高压设备绝缘带电检测系统进行了深入研究,通过软硬件设计、算法改进,实现了GPS/BD双星同步的异地装置的高精度同步采集技术,使介损 $\tan\delta$ 的测量精度达到 $\pm 0.05\%$,完全满足开展电容型设备带电测试的要求。

1 工作原理与系统结构

1.1 测量原理

介质损耗因数($\tan\delta$)是高压电气设备绝缘的重要性能指标,它表征了电介质在电场作用下由于电导、极化和游离等引起的能量损耗。通过测量 $\tan\delta$,可以反映出绝缘的一系列缺陷:如绝缘受潮,绝缘油脏污或者老化变质,绝缘内部的气隙中发生放电等等。绝对介损测量原理图见图1。测量施加于绝缘介质的电压、电流的相角 α_U 、 α_I 和幅值 U 、 I ,按式(1)、(2)计算,可以获得介损值 $\tan\delta$ 和电容量 C ,正常油纸绝缘的介损值为 $0.1\% \sim 0.8\%$ 。

$$\tan\delta = \tan[\pi/2 - (\alpha_I - \alpha_U)]; \quad (1)$$

$$C = I / (2\pi f U)。 \quad (2)$$

在变电站中,高压设备带电运行时,准确地测

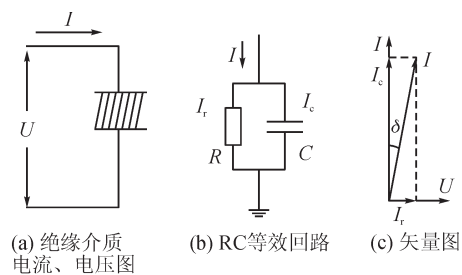


图1 绝对介损的测量原理

Fig. 1 Testing theory for absolute dielectric loss

量电压的相角是比较困难的。利用变电站电压互感器测量电压相角,其角差(0.5° , $\pm 20'$)引起的介损测量误差已经远超过介损值本身,这也是大部分绝缘在线监测数据波动大的主要原因之一。相对介损法则是实用的工程测量方法。与西林电桥原理类似,相对介损测量见图2。选择相同母线、同相的基准设备 C_n 和被测设备 C_x , 测量流过它们绝缘介质电流 I_x 、 I_n 的相角 α_{I_x} 、 α_{I_n} ,按照式(3)、(4)计算相对介损 $\tan\Delta\delta$ 和电容比 C_x/C_n 。相对介损要求测量误差 $< 0.1\%$,才能满足绝缘判断的要求。由于基准设备自身介损不为0,因此相对介损测量不能获得准确的介损值,但能够有效反映介损变化的趋势,即反映绝缘状态变化程度。文中采用相对介损法实现对设备绝缘的检测。

$$\tan\Delta\delta = \tan(\alpha_{I_x} - \alpha_{I_n}); \quad (3)$$

$$C_x/C_n = I_x/I_n。 \quad (4)$$

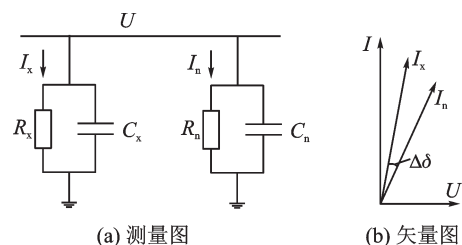


图2 相对介损测量原理

Fig. 2 Testing theory for relative dielectric loss

1.2 系统结构

采用卫星定位系统(GPS/北斗)PPS秒脉冲实现异地装置同步采集的绝缘带电测试系统的原理图见图3。系统由便携式采集控制计算机、 N 个采集终端装置组成。其中控制计算机与各采集终端装置之间的通信采用 Zigbee 无线通信;每个采集终端自带电池,采用GPS/北斗双星接收机,具有更好的适应性。Zigbee 可支持几百米的无线通信,采集装置可就近安装在被测设备旁,既有利于测量,又避免干扰和减少连接电缆的工作,提高了测试效率和可靠性。

终端箱与可分离的便携式采集模块原理图见图4。采用终端箱与便携式采样模块分离结构,通过内置的有源高精度小电流传感器实现与高压设备

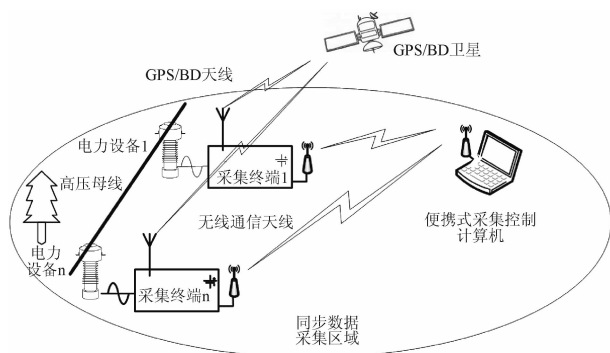
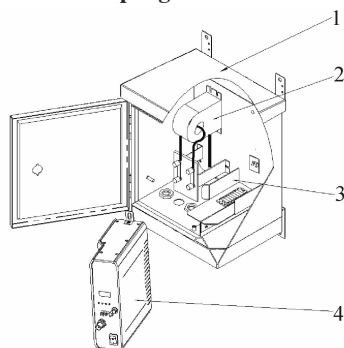


图3 采用卫星定位系统(GPS/北斗)PPS秒脉冲实现异地装置同步采集的绝缘带电测试系统的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of an insulation testing system which implement GPS/BD PPS pulse to synchronize sampling disturbed



1—户外机箱；2—高精度小电流传感器；3—导向定位插座；4—便携式采集终端模块。

图4 终端箱与可分离的便携式采集模块

Fig. 4 Terminal box and removable portable sampling terminal module

的电气隔离。需要测量时,将便携式采集模块插入终端箱内,定位导向可插板式端子实现与小电流互感器的快速连接。

1.3 同步采集原理

相对介损测量的设备在变电站区域内距离较远。一般情况下,将2路电流信号引入同一台检测仪,同一个AD转换器,比较容易实现采集的同步性。但是对于无电气连接的多台异地采集的装置,必须采用特殊的软硬件设计才能实现。

卫星定位系统GPS已经被应用于同步数据采集的同步^[13-16]。北斗系统为我国自主研发的卫星定位系统,技术已经成熟,并开始从军用领域推广到民用领域,进行商业化运行;为减少应用单一卫星定位系统在受干扰和遮蔽时影响测量,文中采用了支持GPS/北斗双星的模块。GPS/北斗接收机可同时跟踪4-12颗卫星,跟踪卫星个数越多,授时的时间精度越高。当GPS/北斗接收机稳定接收卫星信号后,其输出2种时间信号:①PPS秒脉冲信号,其上升沿与国际标准时间(UTC)的误差不超过 $\pm 1 \mu\text{s}$;②经串口输出,对应PPS时刻的UTC时间信息。

因此以PPS秒脉冲作为时间基准,各装置同时启动采集,理论上可实现异地装置之间时间差最大为 $\pm 1 \mu\text{s}$ 的同步,可以实现相对介损的高精度测量。后续每个采样值序列的时刻误差,由经温度补偿的石英晶振作为内部时钟保证,频率稳定度达到 $\pm 10 \text{ ppb}$ 。

为避免软件中断程序执行时间的不确定性,文中采用PPS秒脉冲硬件直接控制AD工作时钟的同步启动方式,可以最大限度提高同步的准确性。AD工作时钟频率为 f_0 ,要求 $1/f_0 < 1 \mu\text{s}$,使分布的2路信号间的时刻误差最大为 $\pm 1/f_0$ 。一般 f_0 远远大于 f_s (f_s 为采样率)。

2 测量系统设计

2.1 AD采样控制系统设计

采集终端硬件逻辑框图见图5。采集终端内部硬件包括CPU及存储模块、AD转换模块、GPS/BD双星接收机模块、CPLD可编程模块、Zigbee 2.4G无线通信模块、电池模块,石英晶振时钟模块几部分组成。

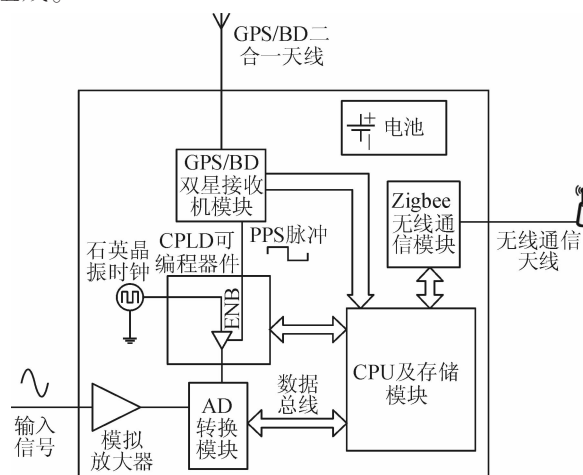


图5 采集终端硬件逻辑框图

Fig. 5 Schematic diagram of terminal module's hardware

该系统同时支持无线同步和GPS/BD 2种同步方式。如果采用无线通信同步启动方式,由于软件执行时间的不确定性,无线传输延迟的不确定性,其同步的时间误差较大。采用GPS/BD模块PPS秒脉冲上升沿进行同步,无需软件干预,可保证不同采集装置间的高度同步。由CPLD可编程模块控制石英晶振时钟模块的输出频率为 f_0 的时钟信号到AD转换模块,AD模数转换开始按照时序,以采样率 f_s 进行数据采集。采用流水线架构的 $\Sigma-\Delta$ 型AD转换器件,其工作时钟频率16 MHz,采样速率设定为16 KS/s,其具有SPI串行接口。

2.2 软件控制流程

为了降低同步误差,还需要控制计算机和各采集终端间通过无线通信和软件时序上的协同控制才能实现。整个系统工作过程为:①初始准备阶段:各采集终端初始化;②PPS脉冲检测阶段:各采集终端检测到 PPS 脉冲下跳沿(由“1”变“0”)时,向控制计算机发送“GPS_READY”指令;③软件指令预启动阶段:收到指令后,控制计算机广播“采集启动”命令,各采集终端切换为 PPS 秒脉冲硬件启动控制模式,等待触发;④硬件启动采集阶段,当 PPS 秒脉冲由“0”变“1”时,各终端 AD 在此时刻启动,连续采集存储数据;⑤采集完毕,各采集终端计算电流的幅值和相角,控制计算机读取采集终端的数据,计算最终结果。对应的控制计算机、各采集终端间的同步采集控制时序见图 6。

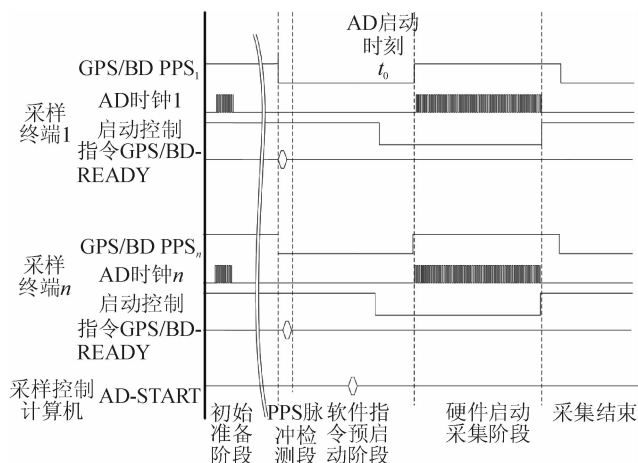


图 6 软件、硬件同步采集控制时序图

Fig. 6 Timing diagram of synchronize sampling with software and hardware cooperation

3 算法分析

相对介损的计算需要先计算相角,相角算法优劣会直接影响最终结果。对相角的数值计算方法主要有谐波分析法、傅里叶变换法、正交算法^[17-20]。文中采用了正交算法,正交算法具有针对大量采样数据运算量小,测量多周期的数据稳定度高,可以克服短暂的电流波形扰动等优点。但常规正交算法误差仍然较大,需要进一步改进,才能适用于相角的高精度测量。

3.1 相角、幅值数值计算的正交算法

各采集模块获得的电流波形 $i(t)$, 主要包括直流分量、角频率为 ω 的基波和高次谐波(以 3、5、7... 奇次谐波为主), 见式(5)。

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + I_3 \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots \quad (5)$$

常规的正交算法时用角频率为 ω_0 ($\omega_0 = \omega$) 的标准

正余弦波 $\sin\omega_0 t$ 和 $\cos\omega_0 t$, 分别与 $i(t)$ 相乘, 计算 K 个整周期内的积分, 则交流分量的积分为 0, 直流量 k_1, k_2 与 $\cos\alpha, \sin\alpha$ 成正比, 由此可以进一步计算出相角 α 和幅值 I 。

进行正交法数值计算时, 按照以下方式进行。以采样率 f_s 采样的电流 N 个采样值序列为

$$I(i) = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_N\} i=0 \dots N. \quad (6)$$

则 k_1, k_2 积分的数值计算为

$$k_1 = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{2f_s} \left[I_i \sin(\omega_0 \frac{i}{f_s}) + I_{i+1} \sin(\omega_0 \frac{i+1}{f_s}) \right]; \quad (7)$$

$$k_2 = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{2f_s} \left[I_i \cos(\omega_0 \frac{i}{f_s}) + I_{i+1} \cos(\omega_0 \frac{i+1}{f_s}) \right]. \quad (8)$$

式(7)-(8)中: N 为 K 个周期内的采样点数; f_s 为采样率; ω_0 为标准波角频率。

$$I = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}; \quad (9)$$

$$\alpha = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{k_2}{k_1} & k_1 \geq 0 \\ \pi - \tan^{-1} \frac{k_2}{k_1} & k_1 < 0 \end{cases}. \quad (10)$$

各采集终端按式(9)、(10)计算出电流幅值 I_n, I_x , 相角 α_n, α_x , 最终由控制计算机按照式(3)、(4)计算出相对介损值 $\tan\Delta\delta$ 和电容比 C_x/C_n 。

3.2 数值计算的误差分析及算法改进

当 $\omega_0 \neq \omega$ 时, 为简化分析, 仅考虑对基波的影响, 则相角的计算公式为

$$\alpha' = \tan^{-1} \frac{k_2}{k_1} = \tan^{-1} \left[\tan(\alpha_1 + \frac{\Delta\omega K T_0}{2}) + \tan(\alpha_1 + \frac{\Delta\omega K T_0}{2}) \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right]. \quad (11)$$

式(11)中: $\Delta\omega = \omega - \omega_0$; ω 为被测信号角频率; ω_0 为标准波角频率, $\omega_0 = 2\pi f_0$; α' 为计算相角; α_1 为被测信号基波相角; T_0 为标准波周期, $T_0 = 1/f_0$ 。

相对介损的相位差计算误差为。

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_k - \Delta\alpha_n. \quad (12)$$

3.2.1 角频率 ω 测量误差的影响

由式(11)可以看出, 角频率 ω_0 的误差对计算结果的影响分 2 部分: ①角度偏移误差 $\Delta\omega K T_0/2$, 与积分周期数 K 成正比, 因此应减少积分周期数 K ; ② $\tan(\alpha_1 + \Delta\omega K T_0/2) \cdot \Delta\omega/\omega_0$ 。

减少角频率 ω_0 的测量误差, 能大幅提高相角测量的准确度。文中采用高阶低通数字滤波器预处理采样数据, 以提高测频算法的精度。

由式(12)可以看出, 如果相角 α_k, α_n 误差趋势一致, 可以相抵消。如果各采集终端的角频率 ω_0 相同, 则 $\Delta\omega K T_0/2$ 部分的误差, 在计算相角差 α 时就可以互相抵消。因此各采集模块统一采用基准设备的终端测量 I_n 的角频率 ω_0 进行计算, 由控制计算机向各采样终端广播发送。

3.2.2 相角 α 的影响

$\tan(\alpha_1 + \Delta\omega KT_0/2) \cdot \Delta\omega/\omega_0$ 部分产生的误差,在角频率误差 $\Delta\omega$ 一定的情况下,相角 α_1 越大,则误差越大。由于每次测量时 α_n, α_x 具有随机性,虽然按式(12)误差会抵消一部分,但当 2 路信号的相角差较大时,会造成数据波动过大。

在实际运算中,各采集终端采用二次迭代的正交算法,即第 1 次进行运算,计算出大致相角值 α_{11} ,然后使标准正余弦波移相 $+\alpha_{11}$,使其与信号的相角差尽量小,产生的误差也最小,第 2 次计算相角 α_{12} ,修正相角 $\alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_{12}$,提高计算精度。

3.2.3 积分舍入误差

由于采样频率 f_s 固定,未与信号频率锁相,积分周期一般不会刚好对应整数的采样点数,如果正交算法按照整数采样点数 N 计算,会产生较大的舍入误差。在式(7)、(8)中增加分数点数 ΔN 的积分,使 $(\Delta N + N)/f_s = KT_0$,能大大提高准确度,可见式(13)、(14)。另外,提高采样率 f_s ,可以提高积分计算的精度。但当 f_s 提高到一定水平后,效果将不明显^[9]。由于 AD 位数的限制,当输入信号幅值过小时,量化误差会产生较大的积分计算误差。应用中应尽量放大信号或提高 AD 的位数,文中采用 16 位的 AD。

$$k'_1 = k_1 + \frac{\Delta N}{2f_s} I_N \sin(\omega_0 \frac{N}{f_s}); \quad (13)$$

$$k'_2 = k_2 + \frac{\Delta N}{2f_s} (I_N \cos(\omega_0 \frac{N}{f_s}) + I_{N+\Delta N}). \quad (14)$$

式(13)–(14)中: $0 < \Delta N < 1$; k'_1, k'_2 为式(7)、(8)中 k_1, k_2 的修正值。

4 试验数据

4.1 改进算法的比较试验

当 2 路相角差较大时,能反映正交算法的计算性能。为了测试算法,按照式(1)、(2)测量介损,即测量相差约 90° 的电压 U 、电流 I 的相位差计算介损。标准介损值为 0.31%,连续测量 15 个数据,试验结果见图 7。

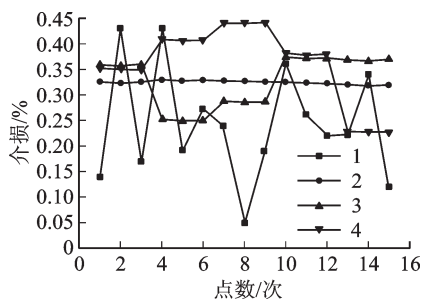


图 7 改进算法的测量性能比较

Fig. 7 Diagram of comparison for improved algorithm performance

曲线 1 是常规正交算法,数据从 0.05%~0.45% 波动较大;曲线 2 是改进二次迭代正交算法、相同的角频率获得的结果;曲线 3 是采用各自角频率计算获得的结果;曲线 4 是采用相同的角频率但未采用移相算法获得的结果。曲线 3、4 波动均较大。曲线 2 改进正交算法取得了比较好的效果。

4.2 同步效果对比试验

分别采用 PPS 秒脉冲同步和无线通信同步,对相对介损值为 0.25% 的试品进行测试比较,见表 1。从表 1 数据可以看出,PPS 同步方式下,介损的数据稳定度高,最大误差 $< 0.025\%$;无线通信同步方式误差较大,最大误差 $< 0.8\%$,远大于被测值本身。电容比在两种同步方式下的差别不大。

表 1 PPS 秒脉冲同步方式与无线通信同步方式数据对比
Table 1 Data comparison for PPS pulse synchronization model and wireless synchronization model

同步方式	I_0/mA	I_1/mA	$\tan \delta/\%$	C_x/C_n
PPS秒脉冲同步方式	10.022	24.077	0.264 5	2.402 2
	10.024	24.081	0.265 6	2.402 3
	10.002	24.029	0.266 8	2.402 3
	10.00 0	24.025	0.271 5	2.402 3
	10.018	24.067	0.270 8	2.402 2
无线通信同步方式	10.012	24.045	1.034 4	2.402 2
	10.014	24.053	0.745 6	2.402 2
	10.003	24.065	0.263 6	2.402 3
	10.002	24.053	0.571 5	2.402 3
	10.013	24.056	0.264 8	2.402 2

4.3 系统性能测试

在华北电科院沙河试验站利用标称值 100 pF 的高压标准电容器与电容量标称值分别为 100 pF 和 1 000 pF 的高压介质损耗标准器,在 10 kV, 50 Hz 电压下进行相对介损的测量,介损 $\tan \delta$ 的测量误差 $< 0.05\%$,电容比 C_x/C_n 的误差 $< 0.5\%$,见表 2。

表 2 系统性能测试数据

Table 2 System performance test data

C 标称值 /pF	$\tan \delta$ 标准值 /%	$\tan \delta$ 测量值 /%	绝对误差 /%	C_x/C_n 标准值	C_x/C_n 测量值	误差 /%
100	0.049	0.050	0.001	1.128 8	1.128 9	0.008 859
	0.100	0.100	0.000	1.128 4	1.129 0	0.053 173
	0.498	0.499	0.010	1.128 8	1.129 2	0.035 436
	0.987	0.990	0.003	1.128 3	1.129 0	0.062 040
	4.953	4.960	0.007	1.125 9	1.128 5	0.230 926
1 000	0.047	0.079	0.032	10.901 1	10.862 0	-0.358 680
	0.205	0.204	-0.001	10.901 1	10.884 0	-0.156 860
	0.498	0.498	0.000	10.900 0	10.884 0	-0.146 790
	0.994	0.997	0.003	10.898 9	10.883 0	-0.145 890
	4.855	4.849	-0.006	10.871 3	10.871 0	-0.002 760

5 结论

利用 GPS/北斗 PPS 秒脉冲实现异地装置同步采集,用于高压设备相对介损的无线绝缘带电测试,在以下几方面进行了提升:

1)采用 GPS/北斗双星模块,减少了应用单一卫星定位系统信号受干扰和遮蔽时对测量的影响。

2)采用 PPS 秒脉冲直接硬件控制的方式启动 Σ - Δ 型 AD 数据采集,和软件流程的时序协同控制,是实现高精度测量的软硬件基础。

3)改进的迭代-正交算法,极大的降低了相对介损测量误差,提高的数据的重复性与稳定性。

试验数据表明,系统的同步采集性能良好,介损测量误差 $<0.05\%$,完全满足带电测试高精度的要求。文中的成果已经成功地应用于变电站容性设备、避雷器的带电测试中,提高了测试的效率。

参考文献:

- [1] 王楠,陈志业,律方成. 电容型设备绝缘在线监测与诊断技术综述[J]. 电网技术,2003,27(8):72-75.
WANG Nan, CHEN Zhiye, LYI Fangcheng. A survey of on-line monitoring and diagnosis for capacitive equipment[J]. Power System Technology, 2003, 27(8):72-75.
- [2] 律方成,晁红军,徐志钮,等. 介质损耗数字化测量方法综述[J]. 华北电力大学学报,2008,35(6):21-26.
LYU Fangcheng, CHAO Hongjun, XU Zhiniu, et al. Overview of digital method for dielectric loss measurement[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(6): 21-26.
- [3] SUNDARAM N. Measurement of capacitances and their loss factors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(6):1083-1087.
- [4] LACHMAN M F, WALTER W, GUGGENBERG P A. On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):155-162.
- [5] MIELKE A M, BOYLE C M, BUENA C A, et al. Continuous monitoring of a capacitor bank[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2001, 4(4):14-19.
- [6] 姬黎波,王红斌,王祖林. 带电测试电容式电压互感器介损的应用研究[J]. 广东电力,2003,16(1):11-14.
JI Libo, WANG Hongbin, WANG Zulin. The research on dielectric loss test in site for CVT[J]. Guangdong Electric Power, 2003, 16(1):11-14.
- [7] 张启民,杨文虎. 变压器套管介损与等值电容在线监测装置的结构及应用[J]. 变压器,2010,54(1):40-43.
ZHANG Qimin, YANG Wenhui. The structure and application of on-line monitoring equipment for transformer bush's dielectric loss and capacitance[J]. Transformer, 2010, 54(1): 40-43.
- [8] 史保壮,杨莉,王红斌,等. 总线式变电站绝缘在线监测系统的研究[J]. 电网技术,2001,25(4):36-39.
SHI Baozhuang, YANG Li, WANG Hongbin, et al. Development of bus model on-line insulation monitoring system for high-voltage apparatus in substation[J]. Power System Technology, 2001, 25(4):36-39.
- [9] 章伟聪,戴征武,张文祥. 基于 DSP 的分布式容性设备绝缘在线监测系统的设计[J]. 电测与仪表,2009,46(4):58-62.
ZHANG Weicong, DAI Zhengwu, ZHANG Wenxiang. The design of distributed insulation on-line monitoring system of capacitive equipment based on DSP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(4):58-62.
- [10] 徐文,张守中,王勇. 同相比法带电测试技术在现场的应用[J]. 广东电力,2008,21(6):29-33.
XU Wen, ZHANG Shouzhong, WANG Yong. Field application of live testing technique based on same-phase comparison[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(6):29-33.
- [11] 黄新波,章云,李俊峰. 变电站容性设备介损在线监测系统的设计[J]. 高电压技术,2008,34(8):1594-1598.
HUANG Xinbo, ZHANG Yun, LI Junfeng. Design of an online monitoring system of dielectric loss in capacitive equipment of substation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8):1594-1598.
- [12] 王楠,律方成. 影响介损在线检测准确性的因素分析与探讨[J]. 电工技术,2003(1):43-45.
WANG Nan, LYU Fangcheng. The study of factors which influence the accuracy of dielectric loss's on-line monitoring[J]. Electric Engineering, 2003(1):43-45.
- [13] 卢志刚,穆永民. GPS 技术在实时相角测量中的应用,电力自动化设备,2000,20(6):20-22.
LU Zhigang, MU Yongmin. Application of GPS in real-time phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(6):20-22.
- [14] 李炜,王彪. 基于 GPS 授时的异地同步数据采集系统[J]. 测控技术,2006,25(3):40-42.
LI Wei, WANG Biao. The distributional synchronous data sampling system which based on GPS timing[J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(3):40-42.
- [15] 黄芳,崔希民,何建设,等. 基于 GPS 时间同步的分布式数据采集与监测系统研究[J]. 矿山测量,2004,1(1):15-17.
WANG Fang, CUI Ximin, HE Jianshe, et al. The research on distributing data sample and monitoring system which based GPS time synchronization[J]. Mine Surveying, 2004, 1(1):15-17.
- [16] 王晓辉,熊海军,王强,等. 基于无线传感网络和 GPS 的电容器介损角的在线监测[J]. 华北电力大学学报,2013,40(3):47-52.

- WANG Xiaohui, XIONG Haijun, WANG Qiang, et al. Power capacitor online monitoring system based on wireless sensor network and GPS clock module[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(3):47-52.
- [17] 段大鹏, 江秀臣, 孙才新, 等. 基于正交分解的介质损耗因数数字测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 127-133.
- DUAN Dapeng, JIANG Xiuchen, SUN Caixin, et al. A novel algorithm of dielectric loss measurement based on orthogonal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7):127-133.
- [18] 宋长宝, 李志刚, 竺小松. 基于数字正交变换的相位差测量方法及误差分析[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(1), 143-146.
- SUN Changbao, LI Zhigang, ZHU Xiaosong. A method & error analysis of phase difference measurement based on digital quadrature transformation[J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(1), 143-146.
- [19] 王 楠, 律方成, 梁 英, 等. 基于高精度 DFT 的介损数字测量方法[J]. 高电压技术, 2003, 29(4):3-8.
- WANG Nan, LYU Fangcheng, LIANG Ying, et al. Digital measurement of dielectric loss based on high accuracy DFT algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4):3-8.
- [20] 陈 楷, 胡志坚, 王 卉, 等. 介损角非同步采样算法及其应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18):58-61.
- CHEN Kai, HU Zhijian, WANG Hui, et al. Algorithm and application of dielectric loss angle based on asynchronous sampling[J]. Power System Technology, 2004, 28(18):58-61.

鞠登峰(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事在线监测、状态检修、高电压试验技术、输变电技术等方面的研究工作。

(上接第 60 页)

- by an arbitrary array of parallel perfect conducting wires[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5):922-926.
- [17] CARATELLI D, YAROVY A. Unified time-and frequency-domain approach for accurate modeling of electromagnetic radiation processes in ultrawideband antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(10): 3239-3255.
- [18] 孙才新, 许高峰, 唐 炬. 检测 GIS 局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 89-94.
- SUN Caixin, XU Gaofeng, TANG Ju. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 89-94.
- [19] 黄 亮, 唐 炬, 凌 超, 等. 基于多特征信息融合技术的局部放电模式识别研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 947-955.
- HUANG Liang, TANG Ju, LING Chao, et al. Pattern recognition for partial discharge based on multi-feature fusion technology[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3):947-955.
- 黄炎光(1981—), 男, 学士, 工程师, 主要从事高压设备状态监测。