

基于无线同步的避雷器阻性电流测量系统

宋 辉¹, 盛戈皞¹, 王传庆², 孙 京², 李晓博², 江秀臣¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 山东电力集团公司德州供电公司, 德州 253008)

摘要: 避雷器的阻性电流是反应避雷器状态的重要标志之一, 传统的避雷器阻性电流测量方法存在着安全隐患。笔者提出一种阻性电流的无线测量方法, 具有现场接线简单、适用于在线监测等特点。通过基于 IEEE 1588 定义的精确时间协议的算法解决了无线同步测量的问题, 实验测试证明该方法满足避雷器阻性电流测量的精度要求。

关键词: 阻性电流; 无线测量; 同步测量; IEEE 1588

中图分类号: TM84 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)05-0049-07

Arrester Resistive Current Measuring System Based on Wireless Synchronization

SONG Hui¹, SHENG Ge-hao¹, WANG Chuan-qing², SUN Jing²,
LI Xiao-bo², JIANG Xiu-chen¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Dezhou Power Supply Company, Dezhou 253008, China)

Abstract: The resistive current of an arrester is an important index of its status, however the conventional arrester resistive current measurement method has potential hazard in safety. This paper presents a wireless resistive current measurement method, which has such features as simple field wiring and online monitoring suitability. And the problem of wireless synchronous measurement is solved by the algorithm based on the IEEE 1588 Precision Time Protocol. Experimental results show that the present method meets the accuracy requirement for resistive current measurement.

Key words: resistive current; wireless measurement; synchronous measurement; IEEE 1588

0 引言

电力系统中存在着大量的避雷器, 其稳定运行对电力系统至关重要, 一旦 MOA 发生故障, 避雷器本身将造成损坏甚至是爆炸, 同时其他电气设备将失去过电压保护, 影响电力系统的安全运行^[1]。为了保证 MOA 安全运行, 减少停电和事故造成的经济损失, 必须定期对 MOA 的工作状况做检测。对于避雷器的状态检测, 之前主要采取测量其泄露电流全电流的方法, 而在现场运行中, 泄露电流全电流一般不能够直接反应出设备的好坏, 阻性电流却与设备状态有较好的相关性, 如某变电站避雷器的监测结果显示, 在避雷器出现明显故障时, 其阻性电流显著

增加, 而其泄露电流全电流却并无明显变化^[2-6]。

当前对避雷器阻性电流的测量通常是通过信号电缆将采集到的避雷器的电压和电流信号引入到一个测量设备, 其电压信号一般需要从互感器的二次侧引入, 这样, 每次测试都需要改动互感器的接线, 现场接线工作量大, 同时也给变电站的运行带来一定的安全隐患^[7]。文[8]提出了一种基于 GPS 同步的无线测量方法, 该方法现场测试时无需频繁改接互感器的接线, 且精度较高, 但是需要增加 GPS 同步模块, 现场搜星困难, 只适合户外变电站。为此, 笔者提出了一种基于 IEEE 1588 协议的无线同步测量方法, 测量时无需临时 PT 接线和铺设信号线, 同时具有在线监测互感器状态的功能, 特别对于高电压等

收稿日期: 2011-11-13; 修回日期: 2011-12-17

基金项目: 上海市科委科技攻关资助项目(10dz1203000)。

Project Supported by Shanghai Committee of Science and Technology (10dz1203000).

级的主干线路,降低了检测流程的复杂程度,提高了检测试验的安全性,且直接通过检测系统内部无线同步,适用于户外和城市变电站。

1 基于无线同步的避雷器 MOA 阻性电流测量方法原理及分析

笔者提出的避雷器阻性电流无线测量方法将 MOA 阻性电流测量设备分成电压监测装置和便携式电流测量装置两个单元,其中电压监测装置固定安装于 PT(CVT)互感器侧,负责采集和监测三相电压;便携式电流测量装置负责检测避雷器的泄漏电流全电流、发送同步测量命令和测试结果分析,便于一个装置对多个安装了电压监测装置的变电站进行测试。

测量的基本原理见图 1。开始测量时便携式电流测量装置首先发送通信延迟测量命令到相应的电压测量装置,通过对电压测量装置回复的通信延迟信息进行合适的处理得到符合精度要求的通信延迟,电流测量装置随后发出同步测量命令,电压测量装置在收到同步测量命令时立即测量电压信号,通过基于 Fourier 级数的相位差检测算法计算电压基波瞬时相角,该算法利用信号进行 Fourier 分解后不同谐波的正交性,用基波信号将高次谐波滤除,就可以得到基波信号的准确瞬时相位值^[9-11],并将测得的电压基波相位通过无线通讯的方式传递给电流测量装置,电流监测装置在等待相应的通信延迟时间后与电压测量装置同步测量避雷器的泄漏电流,计算电流基波瞬时相位,并连同电压侧的瞬时相位计算出电压电流瞬时相位差,进而计算出避雷器泄漏电流的阻性分量。离散化的相位差计算方法见式(1)。

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

式(1)中: $U(n)$ 、 $I(n)$ 分别为 CVT 二次侧电压值与 MOA 全电流值的第 n 个采样值; T 为采样周期; N 为总采样点数。实际应用中,使用 12 位量化和 10 k 的采样速率,算法的误差小于 0.05° 。阻性电流的基波分量即为 $I_R = I_x \sin \varphi$ 。这样既保证了测量过程的简便性,又保证了测量结果的精确性。

根据上述测量方法原理,影响测量精度的关键

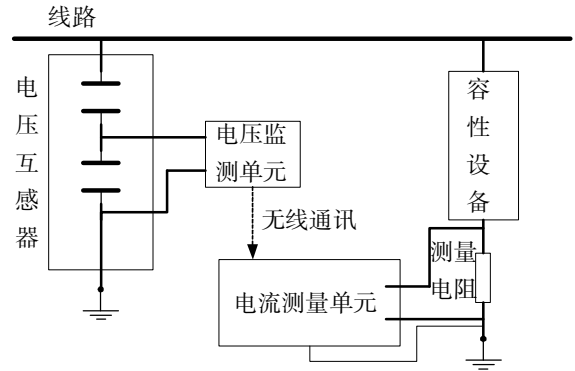


图 1 无线测量原理

Fig. 1 Wireless measurement principle

在于两个设备间如何实现电压与电流的同步测量。当前变电站内测量设备实现同步的主要方法有基于 GPS 的时间同步和基于以太网的时间同步^[12]。传统电力系统的同步测量广泛使用 GPS 实现时间同步,其 1 PPS(pulse per second)时钟精度可达到 200 ns,能够满足电力系统同步测控的需要。但 GPS 存在现场搜星困难,还有可能因为气候、故障及其他因素造成 PPS 脉冲失效,且需要独立的天线和接收模块,成本较高,难以大规模应用到现场 PMU 和 IED 中^[13]。基于以太网的时间同步方法大量应用在局域的电力系统中,如变电站层的时间同步和船舶电力系统的时间同步等^[14],该方法是利用网络时间同步协议,如 NTP/SNTP 协议和 IEEE 1588 协议等,校准局域的电力系统中的各个子节点,使其与时间同步服务器的时间同步,从而达到同步测量的目的,其时间精度可达亚微秒级,可以满足电力系统同步测量需要^[15]。但是这种方法一般需要有以太网电缆连接各个节点,而且系统中需要设立时间同步服务器。当前时间同步的方法还有通过国家授时中心的 BPL 长波授时系统同步和通过 CPLD 设计的高精度时钟同步等^[16]。

文中提出的方法主要借鉴 IEEE 1588 的定时原理,直接通过无线通信的方式实现同步测量。该方法中直接对通信延迟进行处理,在算法上易于实现,而且不会增加硬件成本。

2 基于 IEEE 1588 算法的无线同步测量方法研究

2.1 IEEE 1588 协议的时间同步原理

如前文所述,IEEE 1588 协议定义的精确时间协议(precise time pProtocol, PTP)主要应用于校准局域网中的各个节点的时钟,它采用报文同步,并采用边界时钟和透明时钟来适应不同的网络拓扑和通信技术,具有良好的开放性和互操作性^[17]。PTP 协议是一种主从式的时钟同步技术,整个系统有一个主时

钟,其余都是从时钟,PTP系统通过最佳主时钟算法确定系统中的主时钟。PTP定义了4种报文,分别是SYNC、Follow_up、Delay_Req和Delay_Resp。同步分为两个阶段:偏移测量阶段和延迟测量阶段,见图2^[18]。

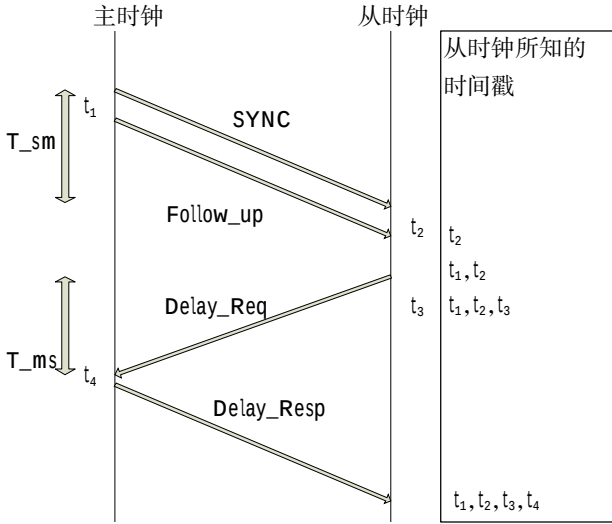


图2 IEEE 1588同步原理

Fig. 2 IEEE 1588 synchronization principle

偏移测量阶段:主时钟一般周期性地发送SYNC报文,一般每2s一次,主时钟测量SYNC发出的精确时间 t_1 ,并在随后的Follow_up信息帧发送给从时钟,从时钟测量接收到SYNC的精确时间 t_2 ,这样,从时钟在收到Follow_up信息帧的时候可以得到SYNC的真实发出时间和真实接收时间,并得到式(2)。

$$t_{\text{offset}} = t_2 - t_1 - t_{\text{Delay}} \quad (2)$$

延迟测量阶段:从时钟收到SYNC信息以后,在 t_3 时刻向主时钟发出延时请求信息包Delay_req,主时钟记录接收Delay_req的准确时间 t_4 ,并发送命令Delay_resp将 t_4 告知从时钟。从时钟此时将获知4个时间戳,并可以得到式(3)。

$$t_{\text{Delay}} = t_4 - t_3 + t_{\text{offset}} \quad (3)$$

结合式(1)、(2)可得

$$t_{\text{offset}} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (4)$$

$$t_{\text{Delay}} = \frac{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)}{2} \quad (5)$$

通过分析以上的计算过程可以看出,IEEE 1588可以计算时钟偏移、通信延迟并进行时间同步是基于一个重要的假设:前后路径对称,即报文从主时钟发送给从时钟和从从时钟发送给主时钟的通信延迟相同^[19]。所以只要理论上只要一个通信系统满足这个条件都可以用这种算法来完成时间同步。

2.2 无线通信的延迟分析

无线通信与有线通信相比由于减少了网络连线,系统的设计具有更大的灵活性,但是具有更大的传输延迟和更大的误码率。在正常通信条件下,无线通信延迟一般可以由式(6)表示^[20]。

$$\tau = t_{\text{DIFS}} + r t_{\text{slot}} + t_{\text{frame}}(j) + t_{\text{encoder}} + t_{\text{decoder}} + t_{\text{wait}} \quad (6)$$

式(6)中: t_{DIFS} 是MAC层定义的发送节点对信道状态的检测时间; t_{slot} 是MAC层定义的时间片; r 是 $[0, W_{\min}]$ 之间的随机数, $W_{\min}$ 是使用的通信协议定义的最小冲突避免时间; $t_{\text{frame}}(j)$ 是发送节点发送数据包(frame)的时间,与数据包的大小(j)和网络的传输速度(v_s)有关,即

$$t_{\text{frame}} = \frac{j}{v_s} \quad (7)$$

t_{encoder} 和 t_{decoder} 分别是发送节点对发送数据包进行编码和接收节点对数据包进行解码的时间,与具体硬件有关; t_{wait} 是数据包在发送节点的发送缓冲队列中等待发送的时间。

在该系统中,由于电流测量装置和电压监测装置的无线通讯模块采用相同的硬件设计,所以式(6)中 t_{DIFS} 、 t_{encoder} 和 t_{decoder} 在前后路径上相同且基本为确定值,该系统为双机通信,不存在通信冲突,因此式(6)中 $r t_{\text{slot}}$ 和 t_{wait} 项均为0。因此,式(6)可以简化为

$$\tau = \tau_s + \tau_v \quad (8)$$

式(8)中: τ 为整个系统的延迟; τ_s 为系统延迟中的固定延迟,主要由数据处理时间和硬件发送数据包时间组成; τ_v 为系统延迟中变化的部分,主要是数据包传输的时间。

为研究通信延迟的变化规律,文中首先连续测量了该系统一组180个无线通信延迟数据样本,使用SPSS 18.0软件进行分析,首先绘出其序列图,见图3。

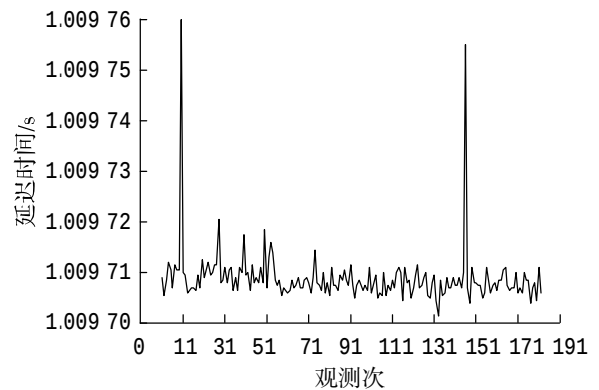


图3 通信延迟序列图

Fig. 3 Communication delay sequence diagrams

从图3中可以看出无线通信延迟的序列没有明

显周期和变化趋势,是平稳序列,然后计算这组数据延迟 12 期的自相关系数,并进行纯随机性检验,结果见表 1。

表 1 通信延迟序列自相关表
Tab. 1 Communication delay sequence
autocorrelation coefficient

滞后	自相关	标准误差 ^a	Box-Ljung 统计量		
			值	df	Sig. ^b
1	0.053	0.074	0.528	1	0.467
2	0.010	0.073	0.545	2	0.761
3	0.047	0.073	0.959	3	0.811
4	0.004	0.073	0.961	4	0.916
5	-0.002	0.073	0.962	5	0.966
6	0.026	0.072	1.090	6	0.982
7	-0.051	0.072	1.597	7	0.979
8	-0.039	0.072	1.891	8	0.984
9	-0.031	0.072	2.079	9	0.990
10	0.043	0.072	2.432	10	0.992
11	-0.018	0.071	2.493	11	0.996
12	0.030	0.071	2.674	12	0.997

注:a. 假定的基础过程是独立性(白噪音);b. 基于渐近卡方近似。

从表 1 中可以看出这组数据延迟 12 期以内的自相关系数一直非常小,在零附近波动,各阶延迟下 BL 统计量的显著性水平 Sig. 值都非常大,远大于一般显著性水平 0.05,所以可以确定,该组序列为纯随机序列。对于纯随机序列来说,可以由最小二乘法得出的算术平均值来对这组数据进行良好的估计^[24],且本组数据方差,因此可以确定该系统前后路径延迟基本相同,使用基于 IEEE 1588 定义的精确时间协议的算法,完全可以对无线通信延迟进行有良好精确度的处理。

2.3 基于 IEEE 1588 同步算法的实现同步测量的方法

通过时间同步方法和该系统实际需要进行分析,笔者设计了一种基于由 IEEE 1588 定义的精确时间协议进行通信时延处理的方法。该方法也将同步过程分为两个阶段,在测量开始时,电流检测设备首先向电压测量设备发送时间同步命令(sync),同步命令中包含电流检测设备发送 sync 时的准确时间 t_1 ,电压检测设备在接收到 sync 时记录接收的准确时间 t_2 ,电压检测设备在收到 sync 信息以后,在 t_3 时刻发出同步命令回复信息包(Delay_req),电流检测设备接收 Delay_req 命令,记录准确的接收时间 t_4 ,因此得到式(1)、(2),按照式(3)、(4),电流检测设备就可以计算出通信延迟 t_{Delay} 和 t_{offset} 两个设备之间的

时间偏差,由于通信延迟是随机序列,为确保达到可靠的精确度,测量系统将上述过程重复 10 次,求取通信延迟的平均值作为通信延迟的最终结果,并使用命令 Delay_resp 发送给电压检测设备,电压检测设备校准自己的时钟后,电流检测设备再发出同步测量命令,两个设备就可以在同一个时间点进行同步测量。

系统完整的测量过程流程图见图 4。

3 性能测试与误差分析

首先测试通信延迟处理算法的同步性能,测试方法如下:将一信号源同时接到电压监测装置和电流测量装置的信号采集端,电流采集装置计算信号的过零点及两个装置测量信号的相位差,以此比较两个设备之间的同步性能^[22]。测试了 100 组数据,统计量见表 2。

表 2 同步性能测试结果统计表
Tab. 2 Synchronization performance test result

	相位差/(°)	系统同步误差/s
N(有效个数)	100.0	100.0
均值	0.106 3	5.905×10^{-6}
标准差	0.001 445	8.029×10^{-8}
极小值	0.104 3	5.796×10^{-6}
极大值	0.115 8	6.434×10^{-6}

系统的误差主要包括时间同步算法的误差和硬件晶振频率带来的误差。时间同步算法的误差主要包括 IEEE 1588 协议的固有误差和时间戳带来的误差,IEEE 1588 协议的固有误差是由前后路径对称的假设带来的,前文已对其进行了论述;时间戳是产生误差的主要原因,最理想的时间戳产生方式是报文发送时直接在物理层产生时间戳,该系统是电流测量装置从其内部时钟芯片中读取发送报文的时间,会产生一定的误差。硬件设计也会带来误差,数字电路受时钟信号控制,该系统采用 25 MHz 的晶振,软件同步最高可以到 0.04 μs ,而且实际晶振频率也并不是标称的 25 MHz,一般有一定的频率漂移,也会影响到同步精度。

基于无线同步的阻性电流测量流程图见图 4。从图 4 中可以看出,系统同步误差小于 6 μs ,换算测量出角度误差在 1°左右,可以满足避雷器阻性电流同步测量的要求^[23-26]。

用高精度信号发生器分别产生相差不同的电压信号和全电流信号,通过该系统进行测量,见图 5。

测量结果见表 3。

从表 3 中可以看出该系统阻性电流的测量精度

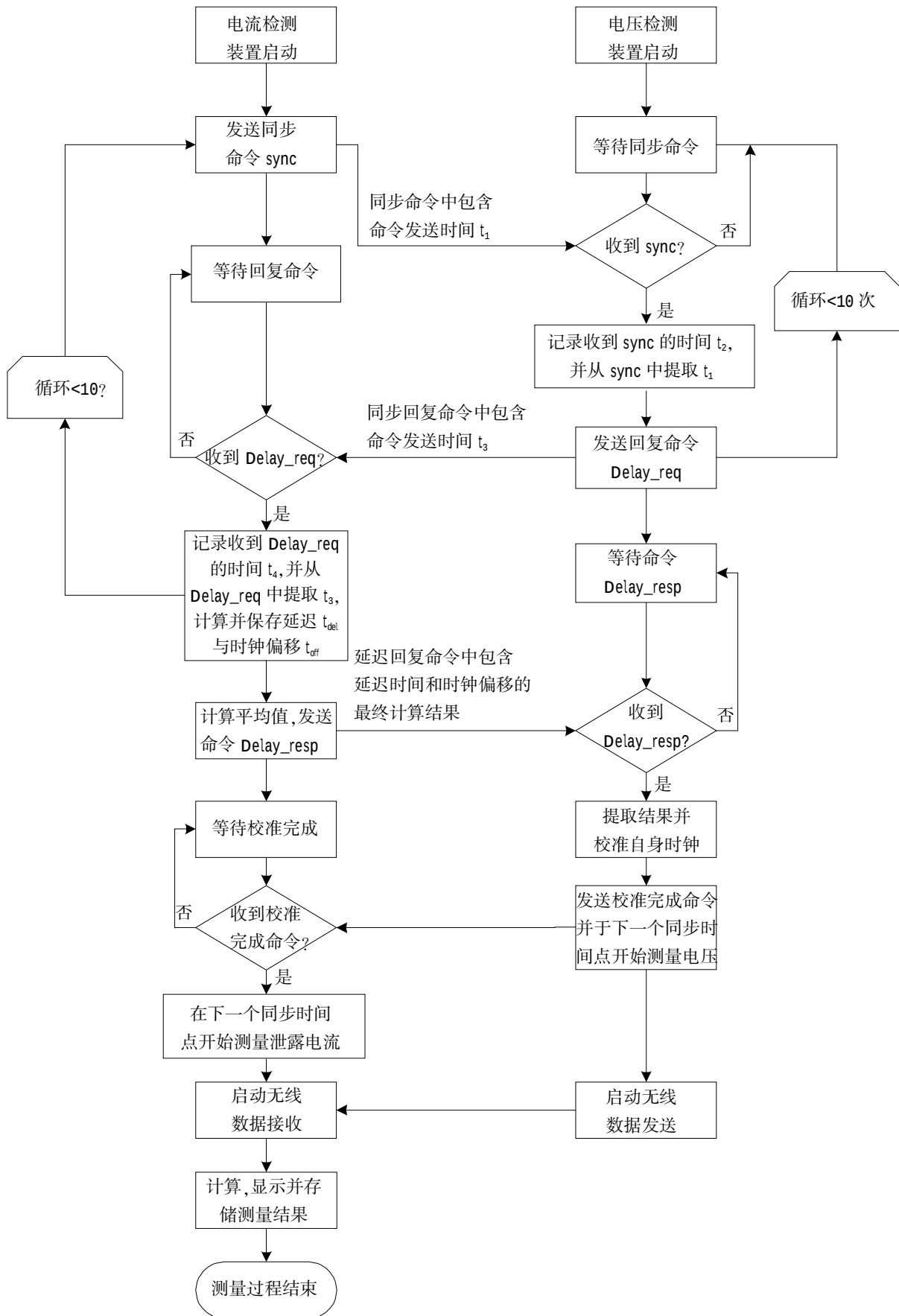


图 4 基于无线同步的阻性电流测量流程图

Fig. 4 Resistive current measuring based on wireless synchronization flow chart



图 5 系统测试连线图

Fig. 5 Connection of system test

表 3 基于无线同步的阻性电流测量系统测试结果

Tab. 3 Resistive current measuring system based on wireless synchronization test results

序号	实际值			测量值		
	全电流/ mA	相差/(°)	阻性电 流/mA	全电流/ mA	相差/ (°)	阻性电 流/mA
1	1.008	5	0.087 85	1.002	4.662	0.081 44
2	2.014	30	1.007	2.006	31.31	1.042
3	2.986	60	2.586	2.891	59.14	2.482
4	3.898	75	3.765	3.866	73.97	3.716

在 7% 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》中对于阻性电流测量精度 10% 的要求,且接线简单,具有很大的发展前景。

4 结语

文中主要提出了一种基于无线通信同步的避雷器阻性电流测量方法,该方法具有现场接线简单、安全性好,同时具有较高的灵敏度,测试结果表明了该方法的有效性。文中重点研究了该方法中对通信延迟进行处理的时间同步算法,该算法基于 IEEE 1588 定义的精确时间协议,通过修改更加适合于无线双机同步,且不会显著增加硬件成本,具有良好的移植性,下一步的工作主要在对该算法的进一步修正上,如在同步过程中对时间戳的产生方式等,以达到更好的精度。

参考文献:

- [1] 李顺尧. 金属氧化物避雷器测试方法对比与分析[J]. 高压电器, 2010, 46(3):94-97.
LI Shun-yao. Comparison and analysis of MOA test methods[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3):94-97.
- [2] 王倩, 孟珍, 施荣, 等. 金属氧化物避雷器交流老化试验无人值守监控系统[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 281-284.
WANG Qian, MENG Zhen, SHI Rong, et al. Unwatched supervisory control system of MOA accelerated aging test [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4):281-284.
- [3] 左文启, 顾渊博. 220 kV 金属氧化物避雷器红外热缺陷及处理分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(1):26-28.
ZUO Wen-qi, GU Yuan-bo. Thermal defect of 220 kV MOA by infrared diagnosis and field treatments analysis [J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(1):26-28.
- [4] 林蒙丹, 赵雪林. 基于 GPRS 传输的 MOA 自动在线监测系统的研究[J]. 电瓷避雷器, 2010(3):31-34.
LIN Meng-dan, ZHAO Xue-lin. Study on MOA automatic on-line monitoring system based on GPRS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(3):31-34.
- [5] 张博宇, 李光范, 陈立栋, 等. 避雷器及其比例单元的散热特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2010(4):46-50.
ZHANG Bo-yu, LI Guang-fan, CHEN Li-dong, et al. Study on the thermal dispersion ability of MOA and MOA section[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(4):46-50.
- [6] 李晓, 查军. 110 kV 氧化锌避雷器事故分析及防范措施[J]. 高压电器, 2003, 29(7):54-55.
LI Xiao, CHA Jun. Analysis of accident of 110 kV MOA arrester and precaution [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(7):54-55.
- [7] 宫建立, 秦松林. 电容电桥法测量金属氧化物避雷器的阻性电流分量[J]. 高压电器, 2007, 43(5):394-397.
GONG Jian-li, QIN Song-lin. Capacitance-bridge method used in measuring the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5):394-397.
- [8] 王又佳, 段大鹏, 江秀臣, 等. 基于无线通讯和 GPS 授时的便携式 MOA 检测系统[J]. 电瓷避雷器, 2009(5): 41-45.
WANG You-jia, DUAN Da-peng, JIANG Xiu-chen, et al. Portable MOA detection system based on wireless communication and GPS time giving [J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(5):41-45.
- [9] 彭波, 陈俊武, 周志成, 等. 基于无线传输的不良绝缘子检测系统研究[J]. 高压电器, 2007, 43(4):310-312.
PENG Bo, CHEN Jun-wu, ZHOU Zhi-cheng, et al. Study on on-line monitoring system based on wireless communication for faulty insulators [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4):310-312.
- [10] 王又佳, 段大鹏, 江秀臣, 等. 基于 Fourier 级数的相位差算法在 MOA 检测中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(4):142-145.
WANG You-jia, DUAN Da-peng, JIANG Xiu-chen, et al. An algorithm of phase difference measurement based on fourier series and application in detection of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4):142-145.
- [11] 李开霞, 张金波, 胡钢. 用相角差法判断金属氧化物避雷器性能优劣的研究[J]. 高压电器, 2007, 44(1): 23-25.

- LI Kai-xia, ZHANG Jin-bo, HU Gang. Performance evaluation of metal oxide surge arrester with phase difference method[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 44(1):23-25.
- [12] 申屠刚, 钱钢, 杨贵玉, 等. 基于时间同步技术的新型远方终端单元设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 45-48.
- SHEN Tu-gang, QIAN Gang, YANG Gui-yu, et al. New remote terminal unit based on time synchronization technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 45-48.
- [13] 汪祺航, 黄伟, 吴在军, 等. 基于 IEEE 1588 标准的变电站同步网络的研究[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(1): 51-54.
- WANG Qi-hang, HUANG Wei, WU Zai-jun, et al. Research of substation synchronization network based on IEEE 1588 standard[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(1): 51-54.
- [14] 钱美, 韩江桂, 尹为民. 船舶综合电力系统同步测量的实现[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 101-104.
- QIAN Mei, HAN Jiang-gui, YIN Wei-min. Ships integrated power system realization of synchronous measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 101-104.
- [15] 贾宏阁, 关维国, 邹德君, 等. 基于 IEEE 1588 的变电站网络时钟同步的研究与应用[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 296-301.
- JIA Hong-ge, GUAN Wei-guo, ZOU De-jun, et al. Investigation and application of network time synchronization in substation based on IEEE 1588 [J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 30(5): 296-301.
- [16] 吴建鲁, 刘煜. 基于 IEEE 1588 的时间同步技术研究[J]. 工业控制计算机, 2010, 23(11): 4-8.
- WU Jian-lu, LIU Yu. Research on time synchronization technology based on IEEE1588[J]. Industrial Control Computer, 2010, 23(11): 4-8.
- [17] 王莉. IEEE 1588 协议测试方法[J]. 电信网技术, 2010(5): 71-76.
- WANG Li. IEEE 1588 protocol testing method[J]. Telecommunications Network Technology, 2010(5): 71-76.
- [18] ANSI/IEEE 1588—2008. Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S].
- [19] 梁志光. 面向电力系统同步相量测量的时钟同步技术的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- LIANG Zhi-guang. Time synchronization technology research and implementation facing synchronous phasor measurement of the power system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [20] 韩安太. 无线网络控制系统中的延时分析及算法设计[D]. 浙江: 浙江大学, 2007.
- HAN An-tai. The analysis of network-induced delay and algorithm design on wireless networked control system[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2007.
- [21] 胡永春, 张雪松, 许伟国, 等. IEEE1588 时钟同步系统误差分析及其检测方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 107-111.
- HU Yong-chun, ZHANG Xue-song, XU Wei-guo, et al. Error analysis and detection method for IEEE 1588 Clock synchronization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 107-111.
- [22] 李豹, 舒乃秋, 李自品, 等. 高精度金属氧化物避雷器测试仪标准装置的研制[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 95-97.
- LI Bao, SHU Nai-qiu, LI Zi-pin, et al. Development of high-precision standard device for ZnO arrester testing instrument[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1):95-97.
- [23] 杨殿成. 金属氧化物避雷器带电测试干扰分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5):130-132.
- YANG Dian-cheng. Study on interphase interference to on-line measurement of metal oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):130-132.
- [24] 杨玉娟. 750 kV 高原型交流系统用金属氧化物避雷器[J]. 电瓷避雷器, 2010(5):33-36
- YANG Yu-juan. 750 kV plateau type MOA for AC system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(5):33-36.
- [25] 王兰义, 赵冬一, 胡淑慧, 等. 线路避雷器的研究进展[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 26-34.
- WANG Lan-yi, ZHAO Dong-yi, HU Shu-hui, et al. Development trends of line arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(1): 26-34.
- [26] 严玉婷, 黄炜昭, 江健武, 等. 避雷器带电测试的原理及仪器比较和现场事故缺陷分析[J]. 电瓷避雷器, 2011(2): 57-62.
- YAN Yu-ting, HUANG Wei-zhao, JIANG Jian-wu, et al. Principle and instrument comparison of arrester live line test and analysis on the flaw in field[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2):57-62.
- 宋辉(1987—), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测。