

# 基于全站同步时钟扩展装置的智能变电站同步整组 试验方法的研究

刘海峰, 赵永生, 李辉, 梁文武, 敖非

(国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 论述了智能变电站模拟量分布式采样和数据同步的方式及带来的同步整组试验问题, 对比分析了两种常规的同步整组试验方法的优缺点和适应性, 提出了一种基于全站同步时钟系统扩展信号的同步整组试验方法。该方法巧妙地利用了布置在变电站就地各个间隔汇控柜内的同步信号作为测试输出的基准, 具有接线简单、同步精度高的优点, 实验室及现场测试的结果表明该方法具有良好的适应性。

**关键词:** 智能变电站; 同步时钟; 同步整组试验; 延时; 差动保护

## Study on the whole system synchronization testing method based on the clock extended device in smart substation

LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, LI Hui, LIANG Wenwu, AO Fei

(State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

**Abstract:** The distributed sampling value and its synchronous mode in smart substation are firstly analyzed. Then the advantages, disadvantages and adaptability of the two conventional testing methods are discussed. A new testing method and its function design are proposed based on total station synchronous signal extension device. The synchronous signal which has been laid out in switch yard is used to be the testing reference in this method. Finally, the precision of this method is tested. The results show that the method has high precision and good adaptability.

**Key words:** smart substation; synchronous clock system; whole system synchronization testing; time delay; differential protection

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)04-0150-05

## 0 引言

同步整组试验是考核继电保护装置采样同步性的关键项目。对于常规综合站, 继电保护装置模拟量采样是通过二次电缆从电压、电流互感器将二次量接入, 并由装置的 A/D 转换单元集中采样。这种方式模拟量输出连续, 采样传输延时小, 不同间隔间的数据具有天然同步性。而对于智能变电站, 模拟量采样由安装于就地汇控柜内的合并单元实现, 并通过光纤送到继电保护装置, 这种分布式采样使各间隔采样数据之间失去了天然同步性。跨间隔数据的同步是由保护装置根据合并单元的处理延时通过插值重采样的方式实现。由于各合并单元的数据处理延时不同, 需要精确测量各合并单元的延时, 并根据测量结果设置时延参数, 否则延时测量误差及参数整定错误将造成电压、电流之间失去同步性。

因此同步整组试验对智能变电站更加重要。

本文在论述了两种常规的智能变电站同步整组试验方法优缺点和适应性的基础上, 提出了一种基于全站同步时钟扩展装置的同步整组试验方法, 并给出了同步时钟扩展装置的功能设计方案, 研制出了样机。该方法不依赖于 GPS 的绝对时间, 以站内同步时钟系统作为同步信号源, 巧妙地利用了站内原有的同步时钟信号, 不受环境和场地的限制。实验室及现场试验结果表明该方法具有同步精度高、接线简单、适应性好的优点。

## 1 智能变电站的采样同步方式

在智能变电站中电流、电压采样常用的两种方式分别为电子式互感器加合并单元或电磁式互感器加合并单元, 合并单元按间隔安装于就地汇控柜内, 通过光纤与保护装置连接, 通过光纤或二次电缆与电

子式或电磁互感器相连, 如图 1 所示。

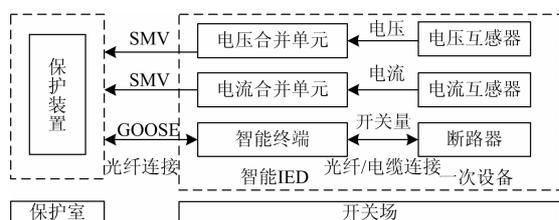


图 1 智能变电站的装置分布示意图

Fig. 1 Distribution of equipment of smart substation

这种分布式的采样模式使各个间隔数据处理延时各不相同, 带来了多间隔电流、电压之间数据同步采样的问题。为确保保护装置的运行可靠性, 《智能变电站继电保护技术规范》(Q/GDW-441)要求智能变电站间隔层 IED 与合并单元采用点对点方式, 同时明确要求“继电保护装置不依赖于外部时钟系统实现其保护功能”<sup>[1]</sup>。点对点直采保证了传输延时的稳定性, 避免了交换机排队机制带来的传输延时离散的问题。而整个采样过程中的延时除了传输延时外, 还包括多个环节的处理延时, 在此以电子式互感器的点对点传输为例分析数据采样环节的额定延时, 如图 2 所示。

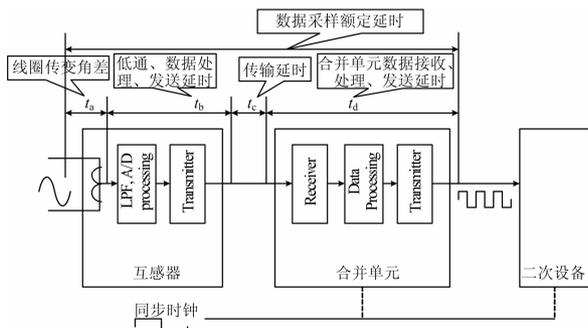


图 2 电子式互感器数据采样额定延时

Fig. 2 Sampling value delay rating of electronic transducer

$$t_{\text{delay}} = t_a + t_b + t_c + t_d$$

其中:  $t_a + t_b$  为电子式互感器的额定延时, 同型号产品该延时基本一致;  $t_c$  为数据的传输延时, 智能变电站中该部分为点对点光信号传输, 采样没有排队过程, 且站内距离比较短, 延时基本可以忽略不计;  $t_d$  为合并单元的数据处理延时, 其大小与 FPGA 的处理频率、报文长度等有直接关系, 并且可以精确计算出来, 该延时为  $\mu\text{s}$  级。在某现场实测结果为  $t_{\text{delay}} = 598.5 \mu\text{s}$ 。

折合成相位差为  $9.975^\circ$ , 足以影响保护的动作精度。因此, 此延时需要精确测量以提高多间隔之间数据的同步精度。

而对于电磁式互感器加合并单元采样的方式,

$t_a$  基本一致, 因此, 各间隔相互之间可以忽略, 并且没有  $t_b$  和  $t_c$  两个环节的延时。因此, 这种方式下的主要延时是合并单元的数据处理延时。为了使  $t_d$  固定不变以适应各种长度报文的处理, 目前常采用控制发送报文时刻的方式按最长报文设置延时, 从而使合并单元的延时变得非常精确而稳定。

各间隔合并单元自带延时信息发送给间隔层保护装置后, 保护装置依据该延时信息对采样时标进行调整, 然后通过插值重采样实现多间隔之间的数据同步<sup>[2-3]</sup>。对于线路差动保护, 常采用调整采样时刻法或调整采样序号的方法实现两侧数据的同步<sup>[4-6]</sup>。对于保护装置而言, 这种分布式采样同步方式引入了前置处理单元、合并单元、保护装置等多个环节的误差, 其同步效果对差动类保护、方向元件和距离元件的精度有直接的影响。因此, 现场需要对各间隔之间的同步性能进行系统性的测试。

## 2 智能变电站常规同步整组试验方法

目前, 常用的同步整组试验方法有两种: 一是从继电保护测试仪引二次长电缆到电压、电流合并单元。该方法数据源唯一, 但合并单元分散安装于一次设备就地汇控柜内, 各间隔之间空间距离较远, 尤其是主变三侧之间空间距离可达数百米之远, 试验接线非常不便。而且由于长电缆回路电阻较大而继电保护测试仪输出容量有限, 无法加入大电流。现场试验结果表明: 对于两根  $100 \text{ m}$ 、 $4 \text{ mm}^2$  的试验线, 其交流阻抗约为  $1.05 \Omega$ , 在此情况下现场实测继保测试仪的最大输出不失真电流仅为额定标称最大电流的  $75\%$ 。

另外一种方法是采用多台继电保护测试仪 GPS 同步触发的方式<sup>[7]</sup>。该方式解决了空间距离的问题, 但合并单元可能分布于室内, GPS 接收装置接收信号不稳定, 需引较长的 GPS 接收天线到室外, 而且不同厂家的继电保护和 GPS 接收天线自身存在误差, 接线繁琐且容易受场地和天气环境影响, 适应性不强。

上述两种方法均由常规变电站的整组试验方法延续而来, 有其局限性和适应性, 这使得智能变电站同步整组试验异常困难和麻烦。

## 3 基于全站同步时钟扩展装置的同步整组试验方法

考虑到目前智能变电站和传统综自站的合并单元和保护装置均引入了同步时钟信号。本文针对上述技术方案的不足, 研制了一种可接收全站同步时钟信号的扩展装置, 并提出了一种基于该装置的整

组试验方法。

### 3.1 全站同步时钟信号扩展装置的功能设计

全站同步时钟信号扩展装置可接收全站同步时钟系统的对时信号,包括 IRIG-B 光信号、TTL 电平信号,并具有 GPS 天线接口,用于兼容 GPS 直接对时的同步方式。对外提供 IRIG-B 光纤脉冲、串口、TTL 电平等多种信号用于同步触发多台继电保护测试仪。扩展装置可以显示当前时间,具有定时触发功能,可以在设定的触发时间到达后输出同步触发信号,改变测试仪的输出状态。装置可以工作在三种模式下,分别为 GPS 模式:以内部集成 GPS 模块的秒脉冲作为参照脉冲,由 GPS 天线完成授时同步;IRIG-B 码(光纤、TTL、RS422)模式:以输入的 B 码起始码元为参照脉冲;内部时钟模式:以输出的秒脉冲为参照。通过上述多种接口的设置,可以兼容当前各种同步时钟系统和继电保护测试仪的对时接口,并能够直接外接 GPS 天线,兼容实现基于 GPS 绝对时间的同步测试方法。

### 3.2 全站同步时钟信号扩展装置的结构设计

扩展装置在硬件上分为控制单元、接收单元和发送单元。控制单元负责解析显示时间、人机操作、控制同步信号触发及发送时间报文。接收单元由 IRIG-B 码接口转换电路和 GPS 解析模块组成,IRIG-B 码接口电路将各种电气形式的信号转换为 TTL 电平,GPS 解析模块接收 GPS 天线的时信号,以串口数据的形式传给控制单元。发送单元由逻辑控制电路、FPGA、串口和 IRIG-B 码输出电路组成。逻辑控制电路控制不同链路的同步触发信号的选择和传递,保证有效的同步触发信号发送给被授时设备;FPGA 输出 IRIG-B 时间码;串口通信电路将解析的时间报文以串行码形式转发给被授时设备。其硬件结构原理如图 3 所示。

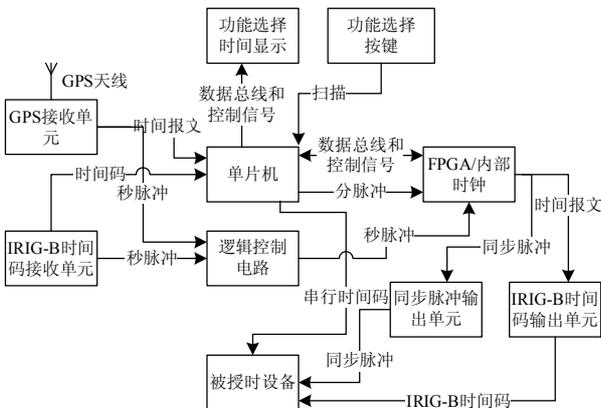


图 3 硬件结构原理图

Fig. 3 Hardware structure of the total station synchronous clock signal extension mechanism

### 3.3 试验方法

采用多台继电保护测试仪在跨间隔保护的各侧就地合并单元处分别向合并单元中加入模拟量。同时,在合并单元处将全站同步时钟系统用于给合并单元对时的光纤信号接入到全站同步时钟扩展装置,再将扩展装置输出的同步扩展信号分别接入继电保护测试仪和合并单元,同时将智能终端的开出节点接入继电保护测试仪。这样,继电保护测试仪及被测保护装置均与站内同一个同步时钟信号源实现了同步。如图 4 所示。

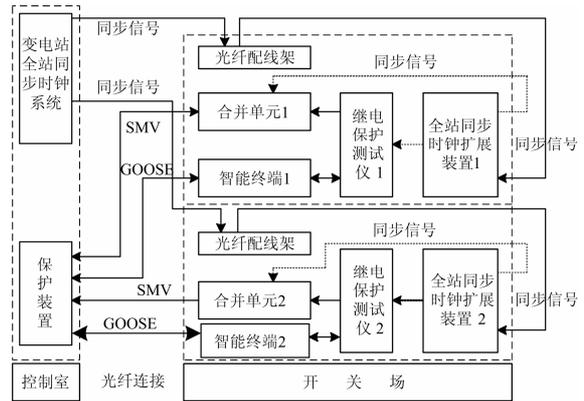


图 4 基于全站同步时钟扩展装置的同步整组试验方法示意图  
Fig. 4 Diagram of whole system synchronization testing method based on the clock extended device

多台继电保护测试仪在接入同步信号后,通过秒脉冲将多台测试仪的输出按照设置的角度进行同步,在每个秒脉冲的上升沿到来的时候按照保护测试仪设置的输出初相角进行同步。以分脉冲作为输出量同步突变的基准,暨待设置的同步触发分脉冲上升沿时刻,多台继电保护测试仪会同时按照设置改变输出量,从而实现保护动作行为的测试。同时,由于智能终端的开出接点也可以接入继电保护测试仪,还能够完成从采样到保护动作出口涵盖全过程数据处理、传输及动作延时的保护整组动作时间的测试,具有十分重要的意义。

这种方法巧妙地利用了变电站内的同步时钟系统的相对时间作为测试仪器和被测设备的同步源,信号源唯一,消除了测试仪器和被测设备依赖不同 GPS 装置的信号源自身误差,进一步提高了测试的精度。而且不依赖 GPS 卫星信号的绝对时间,不受其接收信号质量的影响,具有很强的适应性。同时,智能变电站内同步信号均已经布置到了合并单元和保护装置,试验时不需要额外接入同步信号线,从而大大简化了现场接线。另外,扩展装置可以同时测试仪器和被测设备进行同步,特别适合某些依赖

外部同步信号进行数据同步处理的设备的整组试验。实验室测试结果表明在同一个同步信号源下, 多台时钟扩展装置的同步信号输出精度达到了 80 ns, 而触发的多台继电保护测试仪的输出误差与继电保护测试仪自身的同步精度有关。

#### 4 现场测试结果

某220 kV 智能变电站采用电磁式互感器加合并单元的采样方式, 输入为模拟量, 对侧为常规变电站。在该智能变电站现场采用了上述方法对站内变压器差动保护以及220 kV 线路差动保护进行了同步整组性能测试。

##### 4.1 主变差动保护试验

变压器为 YYD11 接线方式的自耦变压器, 保护装置的各相关参数均按照变压器实际参数整定, 对差动保护的高低压侧进行了同步整组测试。

两台继电保护测试仪按照变压器高低压侧额定值输入三相正序对称电流, 相位差 150°, 模拟穿越性电流, 如表 1 所示。

表 1 继电保护测试仪输入值

Table 1 Input value of protection relay test instrument

	高压侧/A	低压侧/A
A 相	0.376∠0°	2.597∠-150°
B 相	0.376∠-120°	2.597∠-270°
C 相	0.376∠-240°	2.597∠-30°

保护装置中的显示值表明相位误差仅为 1°, 这个误差还包含了保护装置只显示到整数位的数据处理误差, 实际误差应小于 1°, 满足差动保护的试验要求。如表 2 所示。

表 2 保护装置显示值

Table 2 Show value of relay protection

	高压侧/A	低压侧/A	差流
A 相	0.378∠0°	2.595∠-151°	0.005I <sub>c</sub>
B 相	0.378∠-120°	2.601∠-271°	0.007I <sub>c</sub>
C 相	0.375∠-240°	2.602∠-31°	0.006I <sub>c</sub>

同时采用 100 m 长电缆直连方式做了对比试验, 测试结果如表 3 所示。

表 3 电缆直连方式下保护装置显示值

Table 3 Show value of relay protection based on cable direct-connect testing method

	高压侧输入值/A	低压侧输入值/A	差流显示值
A 相	0.376∠0°	2.597∠-150°	0.006I <sub>c</sub>
B 相	0.376∠-120°	2.597∠-270°	0.006I <sub>c</sub>
C 相	0.376∠-240°	2.597∠-30°	0.007I <sub>c</sub>

从上述对比结果来看, 采用基于全站时钟扩展装置的智能变电站同步整组试验方法的精度与采用同一信号源通过长电缆输出的效果等同, 具有很高的同步精度。

##### 4.2 线路差动保护试验

对于线路差动保护两侧的整组同步试验来说, 由于空间距离很远, 无法像主变保护那样采用站内同一个同步时钟系统。因此, 需要将同步扩展装置接入变电站两侧的同步时钟, 由 GPS 实现两侧同步时钟系统的同步, 实际上成为以 GPS 信号为基准的同步方式。

两侧采样一侧为合并单元的分布式采样, 一侧为常规微机式保护的集中式采样。两侧CT变比分别为1 250/1和1 200/1, 平衡系数为0.96。试验时智能站侧的保护测试仪将电流量输出接至就地的模拟量合并单元, 常规侧的保护测试仪将电流量接至保护装置。初相位分别为0°和180°, 模拟穿越性电流流过线路, 实际测得A、B 两套线路差动保护的两侧电流相位差及差流分别如表4、表5所示。

表 4 A 套保护装置显示值

Table 4 Show value of relay protection A

电流	相别	本侧/A	对侧(通道显示)/A	差流/A
0.2	A	0.2002∠0°	0.1995∠178°	0.005
	B	0.2002∠-121°	0.1995∠59°	0.005
	C	0.2002∠120°	0.2002∠-62°	0.005
1	A	1.008∠0°	0.992∠179°	0.027
	B	1.000∠-121°	0.992∠59°	0.027
	C	1.008∠119°	0.992∠-61°	0.027
5	A	5.031∠0°	5.000∠179°	0.059
	B	5.000∠-121°	5.000∠59°	0.059
	C	5.031∠119°	5.000∠-61°	0.059

表 5 B 套保护装置显示值

Table 5 Show value of relay protection B

电流	相别	本侧/A	对侧(通道显示)/A	相位差	差流/A
0.2	A	0.2	0.2	180°	0.0
	B	0.2	0.19	180°	0.0
	C	0.2	0.2	180°	0.0
1	A	1.0	1.0	179°	0.01
	B	1.0	1.0	179°	0.01
	C	1.0	1.0	179°	0.01
5	A	5.02	5.01	179°	0.06
	B	4.99	5.01	179°	0.08
	C	5.00	5.01	179°	0.08

由表4、表5中数据可以看出, 两套线路相位差在1°~2°, 差动保护的差流大小虽然随两侧电流增大的变化而增大, 但误差最大也仅为80 mA, 满足

差动保护的性能要求。

### 5 结语

差动保护的采样同步性非常重要，其性能优劣直接影响到保护的動作行为。智能变电站合并单元下方就地后，空间距离较远，保护装置的采样由常规变电站的集中式变为分布式，同步整组试验变得异常困难。针对此问题，本文提出了一种基于全站同步时钟扩展装置的整组试验方法，并给出了装置的设计方案。该方法巧妙地利用了变电站内已有的同步时钟系统作为测试仪器和被测设备的同步信号源，克服了现有方法的缺点。通过现场试验结果表明，该方法接线简单、同步精度高，不受GPS信号接收质量的影响，可以用于站内多间隔和两个站之间的线路光纤差动保护的同步整组试验的需要，能广泛适用于合并单元模拟量输入的各种保护的同步整组试验。

本文相关授权实用新型专利：ZL201420158200.5

### 参考文献

[1] Q/GDW 441-2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京：国家电网公司，2010.  
Q/GDW441-2010 technical specifications of protection for smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2010.

[2] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.  
HUANG Can, XIAO Chifu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.

[3] 闰志辉, 胡彦民, 周丽娟, 等. 重采样移相技术在过程层 IED 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 64-66, 71.  
YAN Zhihui, HU Yanmin, ZHOU Lijuan, et al. Application of resample phase shifter technique in process layer IED[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 64-66, 71.

[4] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 数字电流差动保护中几种采样同步方案[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 46-49, 53.

GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Sampling synchronization methods in digital current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 46-49, 53.

[5] 李文正, 李宝伟, 倪传坤, 等. 智能变电站光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 136-140.  
LI Wenzheng, LI Baowei, NI Chuankun, et al. Study on synchronization method for optical differential protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 136-140.

[6] 李宝伟, 倪传坤, 唐艳梅, 等. 智能变电站组网传输采样值光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 142-147.  
LI Baowei, NI Chuankun, TANG Yanmei, et al. Research of the sample synchronization scheme for optical differential protection based on sampled value transmit by network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 142-147.

[7] 卜强生, 宋亮亮, 张道农, 等. 基于GPS对时的分散采样差动保护同步测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 149-153.  
BU Qiangsheng, SONG Liangliang, ZHANG Daonong, et al. Research on the test method of distributed sampling differential protection synchronization based on GPS time[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 149-153.

收稿日期：2014-05-11； 修回日期：2014-10-29

#### 作者简介：

刘海峰(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及自动化技术, 主要从事继电保护专业技术及管理等工作; E-mail: lhfseawind@163.com

赵永生(1964-), 男, 学士, 高级工程师, 从事继电保护专业技术及管理等工作;

李 辉(1983-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为高压直流输电、电力系统继电保护及自动化技术。

(编辑 葛艳娜)