

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211787

# 基于无线同步信息的继电保护分布式智能测试系统

于晓军<sup>1</sup>, 刘志远<sup>1</sup>, 吴建云<sup>1</sup>, 陈前臣<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 豪迈电力自动化技术有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 用传统方法对新建或改造后变电站的继电保护接线正确性进行检验, 需要一次系统带电并使相应的线路电流达到最小负荷电流。这不仅存在误操作风险, 而且有时难以完成检验任务。为解决上述问题, 提出了一种基于无线同步信息的继电保护分布式智能测试系统, 包括四个关键部分: 无线同步信息产生与传输子系统, 其以母线电压互感器的二次侧 A 相电压作为参考相量, 产生的同步信息通过 433 MHz 无线局域网络发布; 短时输出交流电流高达 1000 A 的同步大电流发生器; 用于同步记录继电保护装置输入端口的电压、电流波形数据的同步录波装置; 对波形数据进行分析判断并自动给出测试结果的智能测试分析软件。阐明了所提分布式智能测试系统的结构、工作原理、实现方法以及在现场检验测试的应用流程。所提方法已经在实际运行中使用, 具有较强的实用性。

**关键词:** 继电保护现场测试; 分布式智能测试系统; 无线同步信息; 同步大电流发生器; 同步录波装置

## A distributed intelligent testing system of relay protection based on wireless synchronization information

YU Xiaojun<sup>1</sup>, LIU Zhiyuan<sup>1</sup>, WU Jianyun<sup>1</sup>, CHEN Qianchen<sup>2</sup>

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China;

2. Haomai Electric Power Automation Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Using the traditional inspection method to check the wiring correctness of relay protection devices of newly built or reformed substations, there exists not only the risk of maloperation, but also sometimes it is difficult to complete the inspection task. The primary system needs to be charged and the corresponding line current made to reach the minimum load current. To solve the above problems, a distributed intelligent testing system for relay protection based on wireless synchronization information is proposed. It includes four key parts: the wireless synchronization information generation and transmission subsystem, using the A-phase voltage of secondary side of bus voltage transformer as the reference phasor, and releasing the produced synchronization information through the 433 MHz wireless local network; the synchronized high current generator of short-time output AC current up to 1000 A; the synchronized waveform recorder used to synchronously record the waveform data of voltages and currents on the input port of the relay protection device; the intelligent testing and analysis software used to give automatically the test results by analyzing and judging the waveform data. The structure, working principle, implementation method and the field testing procedure of the proposed distributed intelligent testing system are clarified. The proposed method has been used in actual operation and has strong practicability.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

**Key words:** relay protection field test; distributed intelligent testing system; wireless synchronization information; synchronized high current generator; synchronized waveform recorder

## 0 引言

交流信号输入通道和断路器跳合闸回路接线的正确性是交流电力系统继电保护装置可靠运行的前

提条件。在变电站新建、检修或改造工程竣工时, 拟投运的继电保护装置都必须经过严格的接线正确性检验。其中, 交流信号输入通道接线的正确性检验内容包括: 交流信号相序和相别一一对应关系检验; 交流信号每相极性正确性检验; 互感器变比以及星形/三角形接线正确性检验。而断路器跳合闸回

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800)

路接线的正确性检验内容涉及：继电保护装置出口与断路器对应关系的正确性检验；保护二次回路逻辑关系(如闭锁关系)的正确性检验。前者相对比较复杂，后者相对简单。本文将重点讨论前者。

交流信号输入通道接线正确性检验的传统方法是六角图法<sup>[1]</sup>。由于这种检验方法是在一次系统带电并使相应的线路电流达到最小负荷电流的条件下进行的，需要复杂和频繁的倒闸操作配合，工作量大且存在误操作风险，甚至有时难以完成。此外，交流信号的零序回路的隐患同样会引起非常严重的后果<sup>[2]</sup>，而用六角图法可能难以发现。多年来，国内外电力领域的专家、学者，针对继电保护的现场整组测试问题，提出一些实用的解决方案。比如，文献[3]设计了一种全站同步时钟扩展装置，并提出了一种基于该装置的智能变电站同步整组试验方法。所提方法较详细地考虑了智能变电站数据采集系统的同步测试需要，但不适用于常规变电站，对电压、电流互感器接线的正确性检验也涉及较少。文献[4]开发了一种模拟带负荷的测试系统，利用电力电子装置给母线施加三相交流高电压和给电流互感器原方施加三相交流大电流，可以用于替换传统测试方法中的带最小负荷电流环节，但文献[4]未提出整个测试系统方案。文献[5]提出了一种基于电力无线虚拟专网的继电保护智能移动运维系统方案，但未涉及一次电压、电流的施加问题。文献[6]则主要涉及到分相跳合闸装置的运维问题，而未涉及整组试验。文献[7]提出了一种基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统，主要针对智能变电站的继电保护测试，不适用于常规变电站的接线正确性检验。

实际上，继电保护交流信号输入通道接线的正确性检验需要满足三个要素：(1) 在互感器原方施加容量满足测试要求的三相工频交流信号的方法或装置；(2) 交流信号相位关系正确性的判断方法；(3) 同步采样或同步记录交流信号的手段。对于传统检验方法，采用母线加电、线路带负荷以满足要素(1)；采用六角图法满足要素(2)；采用相位表、示波器等仪器仪表满足要素(3)。为了满足上述要素 1，且避免调整负荷电流的繁琐倒闸操作，目前已经提出了用电力电子装置产生一次模拟交流信号的新思路<sup>[4]</sup>。同时，先进的电子技术、信号处理技术、无线通信技术、计算机技术和智能化技术在继电保护运行状态监视与评估、运行维护、故障识别以及整组测试等方面的应用已经得到广泛研究<sup>[6-17]</sup>。从而为继电保护装置交流信号通道接线正确性检验，开发同步采样或记录系统以及自动分析相位关系的软件

系统将是明智选择。

需要强调的是，在传统的检验方法中，由于采用母线加电、线路带负荷的方法，一次侧的电压、电流为稳态交流信号，并且自然能够确保多个交流信号之间的同步(即频率相同、相位关系确定)。而对于采用电力电子装置产生一次模拟交流信号的测试方法，必须设计一种同步机制，以确保所有一次模拟/非模拟交流信号以及同步采样系统的同步。目前，用于变电站继电保护或站内系统测试的同步方法主要有三种：(1) 利用交流信号本身的特征进行同步<sup>[18-19]</sup>；(2) 利用全站同步时钟进行同步<sup>[3]</sup>；(3) 采用无线信道传输同步信息进行同步<sup>[11]</sup>。由于继电保护交流信号通道接线正确性检验具有临时性，且测试系统的设备需要频繁移动，因而采用上述第(3)种同步方法最合适。

此外，根据继电保护的运行情况<sup>[20-21]</sup>、面临新的挑战<sup>[22]</sup>以及技术的应用趋势<sup>[23-30]</sup>，用于变电站继电保护的现场整组测试(包括交流信号输入通道接线正确性检验测试)应该是多功能、智能化、易升级和易扩展的测试系统。

基于上述背景，本文提出一种基于无线同步信息的继电保护分布式智能测试系统(后文简称分布式智能测试系统)，并重点针对变电站继电保护装置的交流信号输入通道接线正确性检验阐述所提分布式智能测试系统的结构、工作原理、实现方法和在现场测试的应用流程。

## 1 分布式智能测试系统的结构和工作原理

### 1.1 系统结构

所提分布式智能测试系统的结构如图 1 所示，由四个部分组成：(1) 无线同步信息的产生与传输子系统；(2) 同步大电流发生器；(3) 同步录波装置；(4) 智能测试分析软件。其中：无线同步信息的产生与传输子系统以母线电压互感器的二次侧 A 相电压作为参考相量产生同步信息，同步信息通过 433 MHz 无线局域网络发布；同步大电流发生器由 3 个单相装置(单相主电路包括 1 组电力电子变流器和 1 个升流器)组成，配置同步信息收发机，受无线同步信息同步，短时输出最大单相电流高达 1 000 A；同步录波装置由单台或多台 24 路录波装置组成，也受无线同步信息同步，用于同步记录继电保护装置输入端口的电压波形、电流波形等；智能测试分析软件(图 1 未示出，安装在测试计算机中)，其功能是根据同步录波装置记录的波形数据进行智能分析判断，自动给出被测继电保护装置交流信号输入通道接线正确性的检验结果。此外，同步大电流发生器

是由三个单相装置组成的三相系统(各相电流之间相位相差  $120^\circ$ )，为了简明起见，图 1 中仅画出了一相装置。

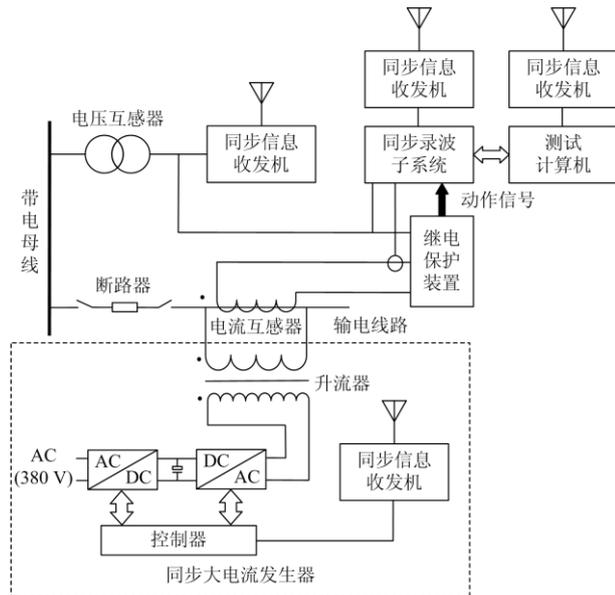


图 1 分布式智能测试系统的结构

Fig. 1 Structure of the distributed intelligent testing system

## 1.2 系统工作原理

图 1 所示的分布式智能测试系统的工作过程受测试计算控制。当测试系统接线完成并准备开始测试时，测试计算机在测试人员的操控下通过无线局域网进行轮询，以获取各个子系统/装置的状态。在确认均处于正常状态后，发布本次测试的试验参数(包括试验开始时刻和终止时刻、同步大电流发生器输出的电流幅值等)和试验命令。

各子系统/装置通过同步信息收发机收到上述信息后，先后进入试验就绪状态。显然，需要经过一定延时以等待最后进入试验就绪状态的子系统/装置。然后，从整个测试系统进入试验就绪状态开始到试验终止时刻的时间内，试验过程由同步脉冲控制。而同步脉冲由连接在电压互感器二次侧的同步信息收发机发出。在同步脉冲控制下，整个测试处于同步测试状态。其中：

(1) 连接在电压互感器二次侧的同步信息收发机，根据收到的试验参数和试验命令进行自动设置并等待试验开始时刻的到来。试验开始时刻到来后延时  $t_{m1}$  开启同步脉冲发射模式。在同步脉冲发射模式下，该同步信息收发机在电压互感器二次侧 A 相电压每个从负到正过零点时刻发射脉宽为  $1.667\text{ ms}$  的正相同步脉冲(脉冲宽度对应于  $50\text{ Hz}$  电压信号的  $30^\circ$  相角)，直至试验终止时刻为止。这里

我们将同步脉冲发射模式开启时刻至第一个同步脉冲上升沿时刻的时间间隔记为  $\Delta t_{m1}$ 。因为  $\Delta t_{m1}$  不可能大于工频电压信号的 1 个周期，比  $t_{m1}$  小得多，所以试验参数设置时可以被忽略。此外，从第一个同步脉冲上升沿至试验终止时刻的时间区间称为同步测试时间，记为  $T_{SM}$ 。

(2) 同步录波装置，根据收到的试验参数和试验命令进行自动设置，然后进入试验就绪状态等待，直至收到第一个同步脉冲上升沿。在接收到每一个同步脉冲的上升沿时，开始进行一个工频周期的同步采样录波。记同步采样周期为  $T_S$ ，对于继电保护交流信号输入通道接线正确性检验来说，取  $T_S = 1\text{ ms}$  (对应于  $50\text{ Hz}$  交流信号每周 20 点采样)即可满足要求。

(3) 同步大电流发生器，根据收到的试验参数和试验命令进行自动设置，进而给直流母线充电至设定值。不言而喻，由于直流母线充电需要较长时间，同步大电流发生器最晚进入试验就绪状态。因此，参数  $t_{m1}$  的大小取决于同步大电流发生器直流母线充电速率。同样，在试验就绪状态下，同步大电流发生器也在等待第一个同步脉冲上升沿的到来。在同步测试状态下，同步大电流发生器的 A 相装置在每个同步脉冲的上升沿时刻开始输出一个频率为  $50\text{ Hz}$  的完整正弦波电流，直至试验终止时刻；而其 B、C 相装置则分别在滞后每个同步脉冲的上升沿  $120^\circ$ 、 $240^\circ$  时刻开始输出一个频率为  $50\text{ Hz}$  的完整正弦波电流，直至试验终止时刻到来后将最后一个正弦波电流完整输出为止。

(4) 测试计算机，在发布试验参数和试验命令后，开始处于等待状态直至试验终止时刻。试验终止时刻到来后，测试计算机再等待一个较短(比如  $100\text{ ms}$ )的延时  $t_{m2}$ ，以等待各个子系统/装置从同步试验状态退出而进入试验数据待读状态。接着，测试计算机自动轮询读取各子系统/装置的状态信息(包括试验过程的出错信息)。当确认各个子系统/装置在试验过程中均正常时，测试计算机读取同步录波装置中的波形数据并存储在试验数据库中；测试计算机启动智能分析和判断软件模块对本次试验波形数据进行处理，最终得出测试结果并生成测试报告。

将分布式智能测试系统的上述工作过程画成时序图，如图 2 所示。由图 2 可知，由于同步大电流发生器输出的 A、B、C 三相电流相间相位差为  $120^\circ$ ，同步录波装置提供的波形数据从同步测试状态第二个周期开始才是有效的。同时，同步测试状态的最后 1 个周期的波形数据也是无效的。为此，

我们约定去掉最前面和最后面各 2 个周期的波形数据。那么，图 2 中的参数  $n$  就是测试试验所要求的有效波形数据长度对应工频交流信号周期的个数。显然， $n$  是分布式智能测试系统的一个重要参数。但是，在满足检验测试要求的条件下， $n$  取较小的值可以降低同步大电流发生器的容量，一般而言，取 10~50 个周期比较合适。图 2 标出的另一个较长

的时间参数是  $m$ ，表示测试计算机从轮询子系统/装置状态开始到试验命令下达完毕所需要的时间对应工频交流信号周期的个数。易知，参数  $m$  与各子系统/装置状态报文长度和无线局域网的通信速率有关，可以取较大值，比如取  $m = 2\,000$  对应的时间为 4 s (对 50 Hz 交流信号而言)。

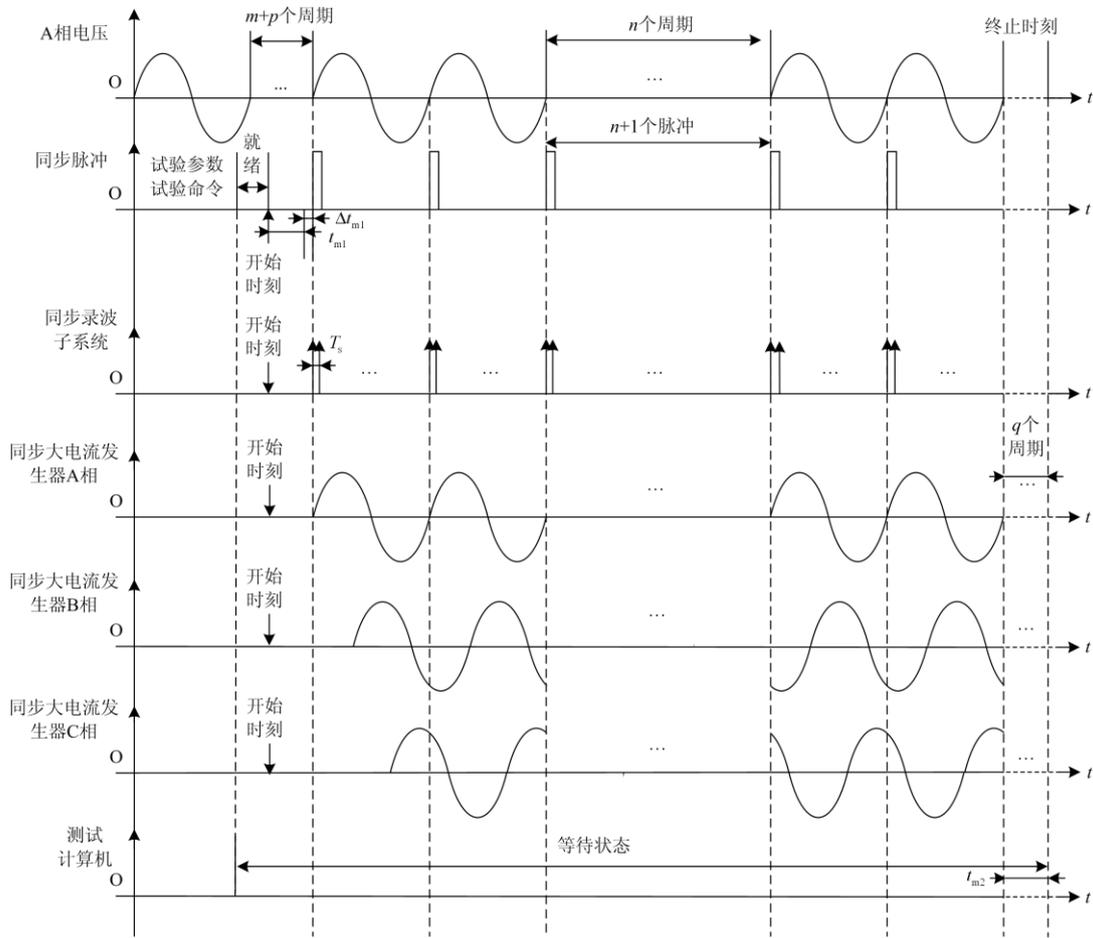


图 2 分布式智能测试系统的工作时序图

Fig. 2 Work-timing sequence diagram of the distributed intelligent testing system

此外，记等待同步大电流发生器就绪时间  $t_{m1}$  对应且取整的交流信号周期数为  $p$ ，则  $p$  与同步大电流发生器的设计方案有关，一般  $t_{m1}$  取 5~8 s。所以， $p$  可取 250~400 之间的整数。又将在试验终止时刻之后等待各子系统/装置从同步测试状态退出进入试验数据待读状态的等待时间  $t_{m2}$  对应且取整的交流信号周期数记为  $q$ ，一般  $t_{m2}$  取 0.5~1 s 即可，所以  $q$  可取 25~50 之间的某个整数。

本小节前文从系统工作时序和系统时间参数两个方面介绍了分布式智能测试系统的工作原理。实际上，在测试计算机中运行的智能测试分析软件需

要根据某种方法判断被测对象接线是否正确。易知，根据同步录波装置提供的波形数据，采用离散傅里叶算法(DFT)可求得继电保护装置交流信号输入端口的三相电压、三相电流的幅值和相位，进而可根据幅值大小和各种相位关系对各交流信号的相别、相序以及极性的正确性作出判断。在此，对这方面的相关技术细节不再赘述。需要指出的是，在同步测试状态下，同步脉冲发射频率等于母线电压频率 ( $f_p \leq 50 \pm 0.2$  Hz)，而同步大电流发生器输出的交流电流的频率恒为 50 Hz，且同步录波装置的采样周期  $T_s = 1$  ms，严格地讲，用波形数据进行 DFT 计算

得出的交流信号的幅值和相位会有一定误差。但是, 由于本文采用了每周跟踪同步的方法, 仅需要对同步大电流发生器产生的交流电流信号的 B、C 相波形数据进行简单预处理(参见 2.3 和 2.4 小节), 计算精度完全能够满足继电保护交流输入通道接线正确性检验的要求。

## 2 分布式智能测试系统的实现方法

### 2.1 无线同步信息收发机原理设计

无线同步信息产生与传输子系统中的关键装置是同步信息收发机。在本文提出的分布式智能测试系统中, 同步信息收发机是一种带有同步脉冲传输功能的幅移键控(ASK)的 433 MHz 无线电收发机, 其原理框图如图 3 所示。

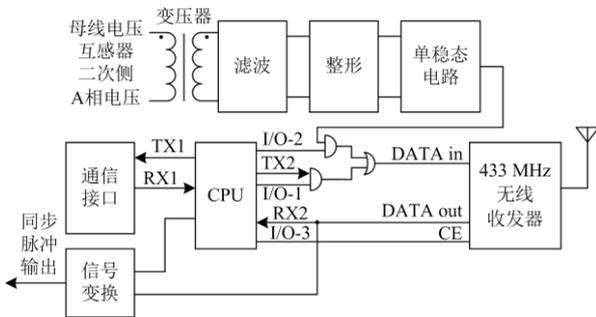


图 3 同步信息收发机的原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of the synchronization information transceiver

由图 3 可以看出, 本文设计的同步信息收发机与常规的用于无线通信收发机的不同之处在于增加了同步脉冲传输功能。下面简要介绍同步信息收发机的工作原理和设计要点。

图 3 的设计方案采用 433 MHz 无线通信模块, 其关键连线为: (1) 无线通信模块的数据输出 DATA out 接入 CPU 的串行通信接口 RX2 引脚。(2) 无线通信模块的数据输入信号 DATA in 在 CPU 引脚 I/O-1 为高电平、I/O-2 为低电平的条件下选择 CPU 的串行通信接口 TX2 发出的信号; 在 CPU 引脚 I/O-1 为低电平、I/O-2 为高电平的条件下选择同步脉冲信号。(3) 同步脉冲为母线电压互感器 A 相电压经变压器隔离和降压后, 再经过滤波电路、整形电路和单稳态电路而获得的与 A 相电压信号反相的、脉宽为 1.667 ms 的 5~0 V 的反相脉冲信号, 采用反相脉冲的目的是与通信接口 TX2 的信号形式一致。(4) 根据整个系统设计衔接情况, 同步信息收发机从无线信道接收到的同步脉冲转换为正相电脉冲信号输出, 所以设置了信号变换环节。(5) 同步信

息收发机也是一种半双工的无线通信装置, 所以, 433 MHz 无线通信模块与 CPU 采用通用异步串行通信。同时, CPU 又需要通过另一个通用异步通信接口与其他单元建立通信, 以便转发无线通信信息。

此外, 为了构建同步信息产生和传输子系统, 各个同步信息收发机需要设置唯一地址。为了使用方便, 可以通过在其面板上设置地址拨码开关, 以避免通过计算通信设置地址码带来的麻烦。考虑到同一个大型变电站可能有 2 个或以上小组同时开展继电保护交流信号输入通道接线的正确性检验工作, 在这种情况下, 可以选择采用不同的无线信道频率, 并采用不同的同步信息收发机的地址码段。

### 2.2 同步大电流发生器原理设计

同步大电流发生器由三个结构和功能均完全相同的单相装置组成。所以, 下面重点介绍单相同步大电流发生器。

图 4 为本文设计的单相同步大电流发生器的原理框图。采用整流变压器、二极管 6 相整流桥以及后面的滤波电容构成输出电压纹波较小的整流器电路; 采用非隔离的简单 DC/DC 变换器改变后续 DC/AC 变换器的直流输入电压的大小, 以便 DC/AC 实现输出交流电流幅值的宽范围调节能力; 采用 SPWM 控制的单相 DC/AC 产生同步的 50 Hz 交流电流, 并采用升流器将较小的 DC/AC 输出电流升到大电流输出。

图 4 技术方案的控制配置了同步信息收发机。从而, 控制器可以与测试计算机进行信息交换, 同时可以将产生的大电流与母线 A 相电压信号同步。当用作 A 相同步大电流发生器时, 在每周同步脉冲上升沿即开始输出交流电流; 当用作 B、C 相同步大电流发生器时, 分别在每周同步脉冲上升沿后延时 120° 和 240° 开始输出交流电流。

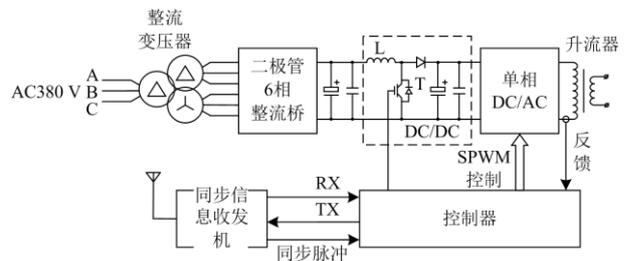


图 4 单相同步大电流发生器原理框图

Fig. 4 Schematic diagram of the single-phase synchronized high current generator

### 2.3 同步录波装置原理设计

同步录波装置的功能是同步记录被测继电保护装置交流信号输入端口的各路交流电压、交流电流

的波形数据，以供测试计算机的智能测试分析软件使用。因此，采用一般的具有同步录波功能的录波装置是可行的。但是，正如前文所述的那样，由于采用了每周跟踪同步的方式，同步录波装置在每个同步脉冲的上升沿开始采集第一点波形数据。如选择采样周期为 1 ms，则对于 50 Hz 交流信号每个周期采样 20 点数据，这对数据存储容量要求是极低的。如此，同步录波装置可以设计成功能专一、体积小、重量轻的灵巧装置，以方便现场使用。鉴于上述理由，本文给出一种同步录波装置的技术方案，其原理框图如图 5 所示。

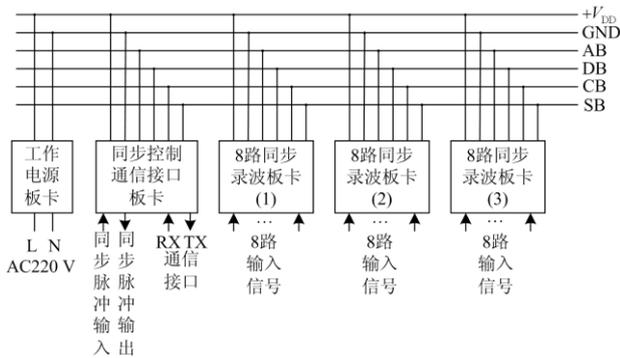


图 5 所提 24 路同步录波装置原理框图  
Fig. 5 Schematic diagram of proposed 24-channel synchronization recorder

图 5 所示的 24 路同步录波装置总共有 5 块板卡。其中，工作电源板卡给其他板卡提供工作电源。同步控制和通信接口共用 1 块板卡，并将接入的同步脉冲再次引出以供 2 台及以上 24 路同步录波装置级联而构成 48 路、72 路、96 路等更多通道的同步录波系统；通信接口可选用 RS485 以便于级联(注：由于波形数据量很小，RS485 通信速率完全满足要求)。8 路同步录波板卡共 3 块，每块仅用 1 片 8 通道 A/D 转换器即可，A/D 转换器分辨率选用 16 位完全能够满足测试要求。此外，图 5 所示技术方案与非同步录波装置相比仅增加了同步总线 SB。由上述可知，实现图 5 所示的 24 路同步录波装置，成本很低。

### 2.4 智能测试分析软件框架设计

智能测试分析软件作为分布式智能测试系统的主要软件包，必须具备诸如数据库、人机界面、权限管理以及异常诊断等功能。但是，本文的目的不是作为产品开发指导书，而是立足于阐明实现分布式智能测试系统的关键技术。因此，本小节后文，我们将针对智能测试分析软件的核心功能(即根据同步录波装置记录的波形数据自动分析、自动判断

被测继电保护装置交流输入信号通道接线的正确性)介绍相应的软件框架设计。图 6 是实现核心功能的智能测试分析软件的原理框架。

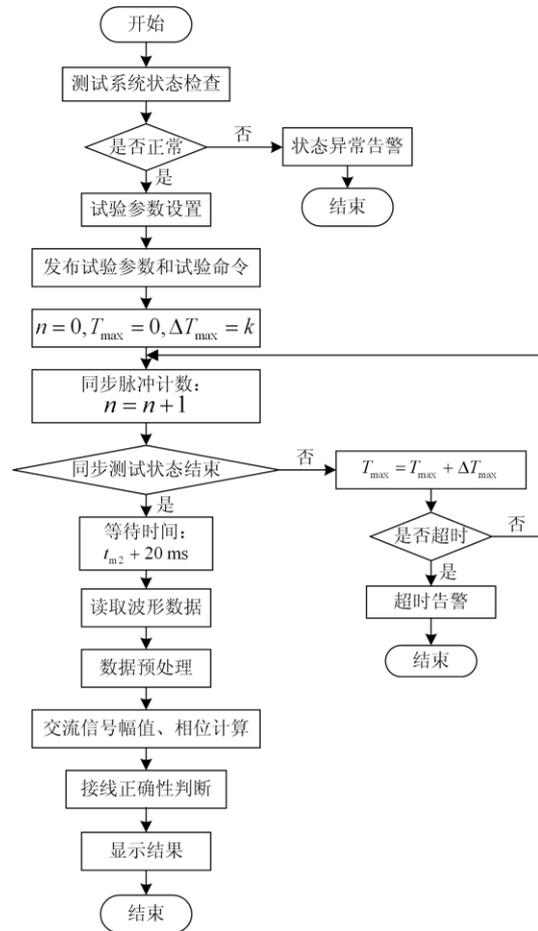


图 6 智能测试分析软件原理框架  
Fig. 6 Principle framework of the intelligent analysis software

图 6 软件原理框架的设计依据是智能测试分析软件运行的如下三个阶段。

第一阶段称为“同步测试状态前”阶段。在该阶段智能测试分析软件需要完成的任务包括两个内容：(1) 检查分布式智能测试系统各个子系统/装置的状态，只有所有子系统/装置的状态均正常时，才可以进行下一步，否则进行测试系统状态异常告警并结束程序运行；(2) 在测试系统状态正常的条件下，配置试验参数，进而向各子系统/装置发布本次试验的试验参数和试验命令。

第二阶段称为“同步测试状态”阶段。该阶段测试系统在同步脉冲的控制下工作，智能测试分析软件处于等待状态。但是，智能测试分析软件需要知道“同步测试状态”阶段是否结束，同时还要监视测试系统是否出现异常。因此，本文采用嵌入式

系统的程序设计理念, 通过对同步脉冲计数作为判断条件, 并通过超时设置测试系统异常退出条件, 以解决程序运行的可靠性问题。

第三阶段称为“同步测试状态后”阶段。在该阶段, 智能测试分析软件首先通过延时等待所有子系统/装置从同步测试状态退出。然后, 从同步录波装置读取波形数据。进而, 对读取的波形数据进行两步预处理: (1) 剔除最前面和最后面各 2 个周波的波形数据; (2) 采用线性插值方法以修正 A、B、C 三相电流的两个周波衔接处的采样数据, 以提高幅值计算和相位计算的精度。之所以要进行第(2)步预处理, 是因为同步大电流发生器输出交流电流为 50 Hz, 而同步脉冲的频率是母线电压频率, 虽然两者相差很小(以系统频率偏移 0.2 Hz 考虑, 两者周期最大偏差约 90  $\mu$ s, 周期相对误差约为 0.4%), 但 A、B、C 三相电流波形都在其两个周波的衔接处有微小畸变。在上述基础上, 智能测试分析软件将采用 DFT 法计算交流信号的幅值和相位。接着, 根据计算得到交流信号的幅值和相位, 作出被测继电保护装置交流信号输入通道接线的正确性判断。实际上, 根据幅值和相位关系作出接线正确性判断并不难, 而难在接线不正确的情况下预测何处接线存在错误。关于这个问题的解决方案, 尚处于研究之中, 本文不展开讨论。

### 3 分布式智能测试系统的应用流程

前文对分布式智能测试系统的结构、工作原理和各子系统/装置的技术方案作了较详细的介绍。为了阐明其在实际应用中的方式, 本小节给出简要的应用流程。具体步骤如下:

(1) 根据现场测试任务要求, 梳理需要检验测试的继电保护装置的种类, 并分割成若干个现场测试子任务。

(2) 针对各个测试子任务, 制订相应的测试系统构建方案, 进而确定各个测试子任务需要的测试系统设备配置清单。

(3) 针对各个测试子任务, 确定相应的电压互感器、电流互感器的变比及接线形式(星型或三角形接线), 以便确定施加同步大电流的幅值大小和相位。

(4) 针对各个测试子任务进行试验参数确定, 并形成参数配置清单。

(5) 针对各个测试子任务, 制订测试试验详细步骤。

(6) 按照制订的测试试验步骤进行测试接线, 特别注意需要严格按照安全规范要求进行操作。

(7) 检查测试系统接线和通信的情况, 确定一切

准备就绪无误后, 才能进行下一步的正式测试试验。

(8) 按照图 6 的流程进行正式测试试验。

(9) 对测试试验结果进行分析整理, 并形成测试试验报告。

显然, 上述应用步骤还是比较粗线条的。实际应用时, 可以对上述大的步骤进一步细化, 以增强可操作性。

## 4 结论

本文从实用的角度出发, 提出了一种基于无线同步信息的分布式智能测试系统。通过系统结构和工作时序阐明了所提分布式智能测试系统的工作原理; 对各个子系统/装置的技术方案进行了设计和介绍, 并给出了应用流程。实际上, 所提分布式智能测试系统, 可以根据需要构成比较庞大的分布式测试系统, 虽然文中未重点强调, 但易于理解。另外, 本文在论述所提分布式智能测试系统的应用过程时, 应用场景针对运行频率偏离额定频率很小的大型变电站。但是, 所提方法和分布式智能测试系统, 对于运行频率偏离额定值较大的小型电力系统的继电保护测试也是适用的。在这种情况下, 需要在发射同步脉冲之前发布实测系统频率值, 以便同步大电流发生器和同步录波装置参照使用。

需要在此提及的是, 本文采用了电力电子装置产生大电流替代线路负荷电流的技术方案。但考虑到用电力电子装置产生三相高压交流电压以替代母线电压的技术方案, 势必大幅度增加测试系统的成本、设备的体积与重量, 因而未采用。

此外, 本文所提方法已经在实际运行中使用, 使用效果表明, 所提分布式智能测试系统具有较强的实用性。

### 参考文献

- [1] 李志兴, 许志华, 张泽良, 等. 利用六角图对 500 kV 自耦变压器进行带负荷测试的原理与分析[J]. 陕西电力, 2013, 41(12): 75-78.  
LI Zhixing, XU Zhihua, ZHANG Zeliang, et al. Principle and analysis method of test with load for 500 kV autotransformer by using hexangular vector chart[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(12): 75-78.
- [2] 郑奎璋, 周玉兰. 贵州电力系统八·六事故中 220 千伏母线差动保护误动作原因分析[J]. 电网技术, 1990, 14(1): 49-53.  
ZHENG Kuizhang, ZHOU Yulan. Analysis of the cause of the maloperation of a 220 kV busbar differential protection during the August 6th Accident in Guizhou Power System[J]. Power System Technology, 1990, 14(1):

- 49-53.
- [3] 刘海峰, 赵永生, 李辉, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 150-154.  
LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, LI Hui, et al. Study on the whole system synchronization testing method based on the clock extended device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 150-154.
- [4] 尚镇, 化亮, 朱转军. 模拟带负荷测试(系统)装置的研究与应用[J]. 计算技术与自动化, 2020, 39(4): 13-19.  
SHANG Zhen, HUA Liang, ZHU Zhuanjun. Research and application of analog load test (system) device[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(4): 13-19.
- [5] 崔玉, 吴奕, 张志, 等. 基于电力无线虚拟专网的继电保护智能移动运维系统设计及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 176-181.  
CUI Yu, WU Yi, ZHANG Zhi, et al. Intelligent mobile operation and maintenance technology and its application of relay protection based on power wireless virtual private network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 175-181.
- [6] 杨能, 尹国慧, 苗长青, 等. 特高压变电站选相分合闸装置运维技术研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(8): 45-48.  
YANG Neng, YIN Guohui, MIAO Changqing, et al. Research on operation and maintenance technology of phase selection switching device in ultra-high voltage substation[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(8): 45-48.
- [7] 陈飞建, 吕元双, 樊国盛, 等. 基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 158-163.  
CHEN Feijian, LÜ Yuanshuang, FAN Guosheng, et al. Automatic test system of relay protection device for smart substation based on information fusion technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 158-163.
- [8] 黄彦钦, 余浩, 尹钧毅, 等. 电力物联网数据传输方案: 现状与基于 5G 技术的展望[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3581-3593.  
HUANG Yanqin, YU Hao, YIN Junyi, et al. Data transmission schemes of power internet of things: present and outlook based on 5G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3581-3593.
- [9] 赵寿生, 刘乃杰, 赵志宏, 等. 保护装置利用尖峰脉冲判别二次 CT 断线的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 128-133.  
ZHAO Shousheng, LIU Naijie, ZHAO Zhihong, et al. A new method for distinguishing secondary CT disconnection by using spikes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 128-133.
- [10] 李仲青, 高翔, 李永丽, 等. 考虑继电保护隐性故障的风险评估技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊): 29-35.  
LI Zhongqing, GAO Xiang, LI Yongli, et al. The development of risk assessment technology related to a hidden failure of protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S): 29-35.
- [11] 王冬辉, 罗建平, 方芳, 等. 基于无线射频通信的变电站间隔相量校核装置的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 162-169.  
WANG Donghui, LUO Jianping, FANG Fang, et al. Research on a substation interval phasor check device based on RF communication[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 162-169.
- [12] 邹剑锋, 张建雨, 金盛, 等. 基于 5G 通信的新型配电网馈线自动化方法研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(11): 28-33.  
ZOU Jianfeng, ZHANG Jianyu, JIN Sheng, et al. Research on new type distribution network feeder automation method based on 5G communication[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(11): 28-33.
- [13] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 继电保护相关二次回路的在线状态检测技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 108-113.  
YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. On-line state detection technology of relay protection relevant secondary circuits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 108-113.
- [14] 洪嘉炜, 杨剑友, 奚洪磊, 等. 基于移动互联的变电站故障录波及报文分析装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 157-163.  
HONG Jiawei, YANG Jianyou, XI Honglei, et al. Research on fault recording and message analysis device based on mobile internet[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 157-163.
- [15] 钱海, 贾松江, 杨飞, 等. 基于移动互联的继电保护设备智能运维技术研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 60-66.  
QIAN Hai, JIA Songjiang, YANG Fei, et al. Intelligent operation and maintenance technology for relay protection equipment based on mobile internet[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 60-66.
- [16] LU Yang, LI Yongli, SONG Jinzhao, et al. On-line monitoring and state evaluation for relay protection operating circuit[C] // 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection(APAP), October 21-24, 2019, Xi'an, China: 706-710.
- [17] WANG Yincheng, ZHU Jie, DAI Wei, et al. A fast blocking method of bus protection when CT

- disconnected based on braking current and zero sequence current[C] // 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 23-25, 2020, Chengdu, China: 1-6.
- [18] 黄家凯, 高厚磊. 输电线路自同步电流差动保护[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1944-1951.  
HUANG Jiakai, GAO Houlei. Self-synchronized current differential protection scheme for transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1944-1951.
- [19] 石吉银. 基于暂态负荷的变压器保护一次电流检验方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 148-155.  
SHI Jiyin. Primary current test method for transformer protection based on transient load[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 148-155.
- [20] 杜严行, 叶树平, 马银环, 等. 一起 35 kV 主变压器跳闸事故分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(5): 56-60.  
DU Yanxing, YE Shuping, MA Yinhan, et al. Analysis of a 35 kV main transformer tripping accident[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(5): 56-60.
- [21] 张烈, 王德林, 刘亚东, 等. 国家电网 220 kV 及以上交流保护十年运行分析[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1654-1659.  
ZHANG Lie, WANG Delin, LIU Yadong, et al. Analysis on protective relaying and its operation conditions in 220 kV and above AC system of SGCC in past ten years[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1654-1659.
- [22] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11.
- [23] 刘鑫, 唐广瑜, 向博, 等. 基于功能相关性的智能变电站二次系统功能测试验证方法[J]. 中国测试, 2020, 46(2): 124-130.  
LIU Xin, TANG Guangyu, XIANG Bo, et al. Functional test verification method for secondary system of smart substation based on functional correlation[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(2): 124-130.
- [24] 李宽, 刘震, 牛健飞, 等. 交流继电保护动作性能在多馈入直流系统中适应性仿真分析[J]. 山东电力技术, 2022, 49(2): 23-28, 53.  
LI Kuan, LIU Zhen, NIU Jianfei, et al. Adaptive simulation analysis of AC relay protection performance in multi-infeed DC system[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(2): 23-28, 53.
- [25] 南东亮, 王维庆, 任祖怡, 等. 基于多故障场景的大规模安全稳定控制系统可信测试方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 165-171.  
NAN Dongliang, WANG Weiqing, REN Zuyi, et al. Reliability test method of large-scale security and stability control system based on multi-fault scenario[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 165-171.
- [26] 王源涛, 潘武略, 马伟, 等. 基于数据中台和物元可拓理论的二次设备状态评估[J]. 浙江电力, 2021, 40(12): 111-116.  
WANG Yuantao, PAN Wulue, MA Wei, et al. State assessment of power secondary equipment based on data center and matter-element extension theory[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(12): 111-116.
- [27] 冯跃, 吴跃康, 任杰, 等. 基于无线同步技术的数字化变电站二次系统新型测试方法[J]. 中国测试, 2020, 46(1): 117-123.  
FENG Yue, WU Yuekang, REN Jie, et al. A new testing method based on wireless synchronization technology for the secondary system of digital substation[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(1): 117-123.
- [28] 杨胡萍, 黄煌, 何志勤, 等. 基于数据拟合的继保设备失效率调整因子模型[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 96-101.  
YANG Huping, HUANG Huang, HE Zhiqin, et al. Adjustment factor model of relay protection equipment failure rate based on data fitting[J]. Electric Power, 2021, 54(9): 96-101.
- [29] 罗琨, 时永肖, 李正新, 等. 智能变电站继电保护装置寿命模型及其辨识方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 96-101.  
LUO Kun, SHI Yongxiao, LI Zhengxin, et al. A life model and its identification method for relay protection device in smart station[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 96-101.
- [30] 吕志宁, 胡子珩, 宁柏锋, 等. 针对电力系统的物联网需求攻击研究进展与发展趋势[J]. 南方电网技术, 2020, 14(1): 24-30.  
LÜ Zhining, HU Ziheng, NING Baifeng, et al. Review of research progress and development trend of Internet of Things demand attack on power system[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(1): 24-30.

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-03-21

作者简介:

于晓军(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护和运行控制等方面工作。E-mail: 15549315@qq.com

(编辑 张爱琴)