

无线同步信息应用于变电站继电保护的 分布式智能测试系统设计与实践

谈梦婷 冯晒玮

(国网湖北省电力公司武汉供电公司)

摘要：系统基于无线同步信息技术结合了先进的电子技术、信号处理、无线通信及计算机技术，旨在解决传统检验方法在操作复杂性、风险和灵活性方面的局限性。系统的实施流程包括从前期准备、测试执行到结果分析的多个阶段，每个阶段都经过精密设计以确保测试的高效性和安全性。该系统的设计理念、结构特点、工作原理及实际应用流程的细节描述，提供了一种有效的技术解决方案，以应对当前变电站继电保护检验领域面临的挑战，同时为未来电力系统的安全稳定运行提供了有力的技术支撑。

关键词：分布式智能测试系统；无线同步信息技术；继电保护装置接线检验；同步录波装置

2024.04.DQGY
57

0 引言

在现代电力系统中，继电保护装置的可靠性是维护电网安全运行的关键。其核心在于确保交流信号输入通道及断路器跳合闸回路接线的准确性。特别是在变电站新建、检修或改造等工程中，对继电保护装置接线的精确检验显得尤为重要。传统的检验方法，如六角图法，虽然历史悠久，但在操作复杂性、风险和灵活性方面存在明显的局限性^[1]。此外，随着智能变电站的发展，传统方法在新型电力系统环境下的适应性问题日益凸显。为了克服这些限制，业界专家和学者们提出了多种创新方案，例如利用电力电子装置模拟负荷测试、无线虚拟专网的运维系统、信息融合的自动测试系统等，旨在提高检验工作的效率和安全性。

然而，这些方案多数集中在智能变电站的应用，对于常规变电站的适用性以及细节处理上仍存不足。本研究正是基于这一背景，提出了一种适用于

各类变电站的分布式智能测试系统，特别关注于交流信号输入通道接线的正确性检验。该系统融合了先进的电子技术、信号处理、无线通信及计算机技术，不仅提高了测试的准确性和效率，还降低了操作的复杂性和风险^[2]。值得注意的是，这一系统在设计上考虑了不同类型变电站的适应性，使其能够广泛应用于电力系统的继电保护检验中。

本文阐述了该分布式智能测试系统的设计理念、结构特点、工作原理及实际应用流程。通过对这一新型系统的深入研究，旨在提供一种有效的技术解决方案，以应对当前变电站继电保护检验领域面临的挑战，同时为未来电力系统的安全稳定运行提供有力支撑。

1 分布式智能测试系统构成及原理

1.1 主要构成

分布式智能测试系统的主要构成基于无线同步信

息技术，涵盖了四个核心部分，以确保继电保护装置交流信号输入通道接线的精确性^[3]。首先，无线同步信息的产生与传输子系统，这一部分利用 433MHz 的无线局域网，以母线电压互感器的二次侧 A 相电压作为基准来传播同步信息。其次，系统所采用的同步大电流发生器则起到电力的变流及升流作用，可在控制的相应时间内将电力提升至需求的范围内，是控制系统稳定性的关键所在。而同步录波装置则包括 24 路录波采集单元装置，可在运行过程中对系统内的线路起到稳定电压及电流波形的作用。最后则是系统的操作端软件，是对于系统控制以及运行状态、数据显示的所在，软件具有较高的智能化控制作用，可依据设定检验系统信号输入通道接线的正确与否。本系统的设计在确保电流相位间相差 120°的同时，有效地整合了电子技术、信号处理以及计算机技术，显著提升了继电保护测试的准确性和效率。该系统的细节如图 1 所示。

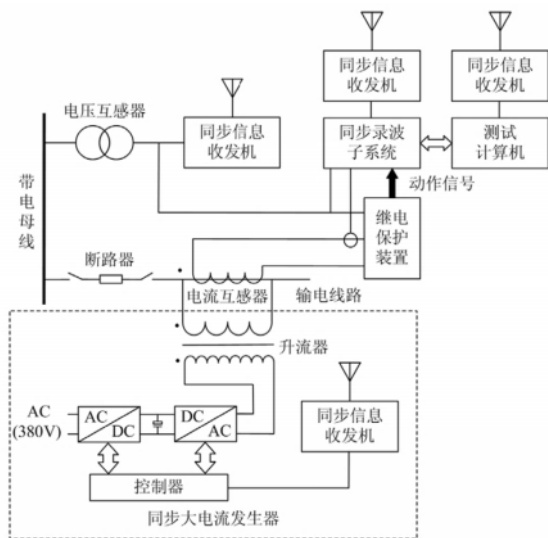


图 1 分布式智能测试系统结构示意图

1.2 操作原理与时序分析

1.2.1 控制与通信流程

分布式智能测试系统的控制与通信流程核心在于

测试计算机，其主要作用是进行系统工作状态的程控输入输出，从而保障系统的正常运转。在应用过程中，测试计算机会通过预先设定的参数发送命令。

1.2.2 同步操作的实现

系统内的各子系统和装置在接收到命令后，进入试验准备状态并引入延时机，以确保所有组件均达到预定就绪状态；此外，试验过程的主导力量为同步脉冲，由安装于电压互感器二次侧的同步信息收发机发出，该机根据试验参数和命令进行自动设置，从而实现同步脉冲发射的精确控制，保障了试验的有效性和可靠性^[4]。

1.2.3 各部分的协调工作

同步录波装置与同步大电流发生器通过同步脉冲上升沿的响应实现精准协调，确保了工频周期内数据采集与电流输出的同步性。具体而言，同步录波装置在每个同步脉冲上升沿启动，进行工频周期的同步采样，而同步大电流发生器则在试验准备状态下按设定值充电，并于同步脉冲上升沿输出 A 相装置的正弦波电流，形成高效、准确的测试系统。

1.2.4 数据采集与分析

试验终结后，测试计算机执行延时操作，随后自动轮询以收集各子系统和装置的状态信息，并确认试验流程无异常发生；接着，从同步录波装置中读取波形数据，利用智能分析及判断软件模块进行处理，最终形成详尽的测试结果和报告，这一过程体现了数据处理的高效性和智能分析的准确性。

1.2.5 时序图与数据处理

在无线同步信息的应用，对于系统运行状态可通过时序图直观地体现，在该系统中所采用的同步三相大电流发生器存在 120°的电压相位差，有效的波形数据需从同步测试状态第二个周期开始计算。系统中的一个关键参数是有效波形数据长度 n ，通常取值在 10~50 周期之间。测试计算机在下达命令后所需时间 m

与无线局域网通信速率及子系统状态报文长度相关^[5]。此外，同步大电流发生器就绪时间与其设计方案紧密相关。

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的创新设计与应用

在分布式智能测试系统中，无线同步信息收发机扮演着核心角色，其设计特点在于结合了同步脉冲传输功能。该装置是一种搭载 433MHz 频率幅移键控（ASK）无线电收发机。分布式智能测试系统同传统设备相比，增加了同步脉冲传输功能，其主要结构见图 2。

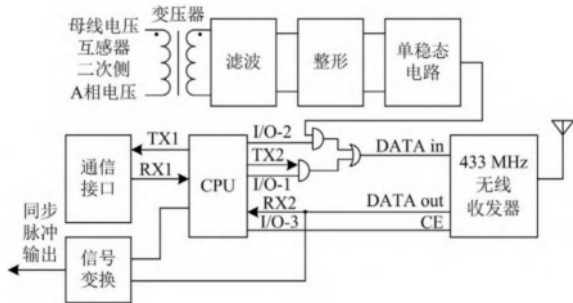


图 2 无线同步信息收发机系统结构示意图

无线通信模块主要通过以下关键连线实现功能：首先，数据输出端接入 CPU 的串行通信接口，确保数据传输的高效性；其次，数据输入端在特定电平条件下选择 CPU 的串行通信接口或同步脉冲信号，增加了系统的灵活性和适应性。在母线电压互感器中，通过对 A 相电压进行处理后则会得到脉宽 1.667ms 的 5~0V 反相脉冲信号。这种设计确保了同步脉冲信号与 CPU 通信接口的信号形式一致性，从而提高了信号的稳定性和可靠性^[6]。

为了便于在同步信息产生和传输子系统中的应用，每个同步信息收发机被赋予了一个独特的地址。为了避免操作上的复杂性和减少设置错误，同步信息收发机的地址通过面板上的地址拨码开关进行设置，

而不是通过计算通信。在多小组同时作业的情况下，为了防止信号干扰，不同小组可选用不同的无线信道频率和地址码段，这一策略显著提升了系统的灵活性和适应性。

2.2 同步大电流发生器的创新设计及工作机制

同步大电流发生器是分布式智能测试系统的核心部分之一，由三个功能和结构完全相同的单相装置组成。这种设计确保了系统的整体一致性和效率。其原理框图如图 3 所示，反映了发生器的关键技术和构成要素。

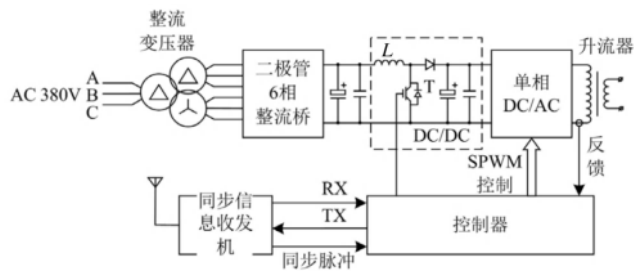


图 3 同步大电流发生器结构示意图

在同步大电流发生器各个装置、设备的作用下，能够使系统达到理想状态的输出电压纹波，并且在基于正弦波宽调变技术的非隔离式 DC/DC 变换器的作用下，可有效实现系统中直流电压的输入以及变频器输出的电流幅值的调整，从而有效地生成 50Hz 同步交流电流。最终，通过升流器的应用，DC/AC 变换器的输出电流被有效增强，达到预设的大电流输出水平^[7]。

在同步大电流发生器的控制体系中，依托于同步信息收发机的作用，能够完成系统中信息的有效传递，这种特性可显著提升电流与母线 A 相电压之间信号数据的传输，从而实现稳定的同步状态。另外，针对电路的应用，同步大电流发生器可依据同步脉冲路径完成交流电流的输出，从而精确控制并显著提高了测试过程的精准度和可靠性。

2.3 同步录波装置的高效设计与实现

同步录波装置对继电保护装置的交流信号输入端口进行同步记录，捕捉电压和电流波形数据，为智能测试分析软件提供关键输入。装置在每个同步脉冲上升沿开始采集波形数据，采样周期定为 1ms，使得每个 50Hz 交流信号周期内能采集 20 点数据。

该同步录波装置以其功能专一、体积小和重量轻便的特点，优化了现场使用的便利性，如图 4 所示。装置由 5 块板卡组成，包括工作电源板卡和同步控制与通信接口板卡。通信接口板卡专门处理同步信号，并能通过 RS485 接口与其他设备级联，实现高效的数据传输和设备协调。每块同步录波板卡配备 8 通道 A/D 转换器，每个通道均达到 16 位的分辨率，确保了信号采样的高精度。装置设计中增加的同步总线 SB，进一步降低了整体成本，同时未损失设备的性能和精确度。这种专用板卡和 RS485 通信接口的结合，以及高精度 A/D 转换器的应用，使得该同步录波装置在保持成本效益的同时，还具备了高精度和灵活的级联能力，完全符合分布式智能测试系统的需求。

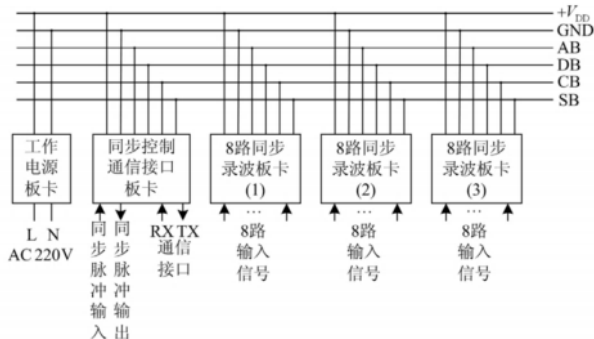


图 4 24 路同步录波装置的构成原理框图

2.4 智能测试分析软件的关键技术与框架

智能测试分析软件是分布式智能测试系统的核心，包含关键功能如数据库管理、人机交互界面、权限管理和异常诊断等，重点在于根据所采集到的同步

录波参数，完成智能化的数据分析与处理，从而保障继电保护装置输入信号通路的正确性^[7]。

软件运行分为三个主要阶段：

1) “同步测试状态前”阶段，软件需检查系统各子系统 / 装置状态，确认正常后方可配置试验参数并向各子系统 / 装置发布试验命令。若状态异常，则触发告警并终止程序运行。

2) “同步测试状态”阶段，软件处于等待模式，监视测试过程，确保无异常发生。采用嵌入式系统的程序设计理念，通过同步脉冲计数和超时设置来提高程序运行的可靠性。

3) “同步测试状态后”阶段，软件确保所有子系统和装置的状态转换，从同步录波装置读取波形数据后，对其进行处理，包括剔除前后冗杂记录与数据，并采用直线插值的方式校准三相电流的波形数据，以确保数据的准确性和可用性：

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \times (y_2 - y_1) \quad (1)$$

式中， y_1 、 y_2 为两个变量代表已知点的 y 坐标值； x 为 y 值的点的 x 坐标（ x_1 、 x_2 为 y_1 、 y_2 的 x 坐标）； $\frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}$ 为比例因子（用于确定 x 位于 x_1 和 x_2 之间的相对位置）； $(y_2 - y_1)$ 为两个已知点 y 值之差。

随后，软件利用离散傅里叶变换（DFT）法计算交流信号的幅值和相位，从而判断交流信号输入通道接线的正确性。尽管对接线正确性判断的技术较为成熟，但对于预测接线错误位置的技术仍在研究之中，本文不作详细讨论。

3 实施分布式智能测试系统的操作流程

实行分布式智能测试系统，其核心在于保障测试的精确性与高效性，涵盖了准备、执行、分析等关键阶段。准备阶段的重心为继电保护装置的系统化分类，旨在明确化测试任务，增强其针对性。执行阶段则需关注细节，如自动化继电保护装置的运

行状态，它对电力系统的稳定运行至关重要，尤其在信息传输安全性方面。

关于测试指标，涉及平均故障时间及其恢复时间，以及效果程度，这些反映了继电保护装置在电力系统中的作用和影响。测试过程采用定数截断法评估故障时间，确保了数据的准确性。此外，配置方案中引入的 WBH-801T2-DA-G 测试设备，以其高灵敏度和故障识别系统为特色，保证了电子互感器采集回路的稳定性。

提升电力系统继电保护及自动化装置的可靠性，不仅需要技术上的创新，还包括操作规范的提升和电磁干扰的有效控制。这些措施共同构建了一个安全、高效的电力系统。

最终阶段则专注于对测试数据的深入分析，形成全面、精确的测试报告，强调测试系统的操作性和精准度的提升。通过这种多维度的方法论，分布式智能测试系统在继电保护装置的应用中显示了其先进性和实用性。

4 结束语

本研究成功地设计并实施了一种分布式智能测试系统，该系统专门针对继电保护装置的接线检验。系统的创新之处在于融合了无线同步信息技术、电力电子技术和计算机技术，有效地提升了测试的准确性和效率，同时降低了操作的复杂性和风险。通过实验验证，该系统显示出优异的性能，特别是在确保电力系统安全稳定运行方面显示出其显著优势。此外，系统的适用性广泛，不仅适用于智

能变电站，也适用于传统变电站，这在提升电网维护的灵活性和可靠性方面具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘玢岩，尹昕，潘远林，等. 基于空充暂态电流的线路保护 CT 极性校验方法 [J]. 电力系统保护与控制，2023，51（12）：99-108.
- [2] 孟江雯，李仲青，詹荣荣，等. 适应变电站二次系统全面优化的继电保护系统级测试关键技术 [J]. 电网技术，2023，47（9）：3791-3799.
- [3] 陈洪伟，刘琪. 基于无线通信技术的继电保护多维研究 [J]. 光源与照明，2023，（2）：213-215.
- [4] 来智浩，高钰琛，翟常营，等. 基于信号路径跟踪算法与并发分层架构的热过载保护装置自动校验方法研究 [J]. 高压电器，2022，58（11）：121-127.
- [5] 于晓军，刘志远，吴建云，等. 基于无线同步信息的继电保护分布式智能测试系统 [J]. 电力系统保护与控制，2022，50（11）：121-129.
- [6] 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.
- [7] 陈伟华，张浩，刘倩，等. 基于乒乓对时的智能变电站二次无线核相 [J]. 农村电气化，2020（4）：39-42.

（收稿日期：2023-12-16）