

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250922

## 变电站新一代继电保护远程验证技术研究及应用

谭乾<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 王丽伟<sup>2</sup>, 付元欢<sup>1</sup>, 刘玮<sup>1</sup>, 卢颖<sup>3</sup>, 许家焰<sup>4</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085;  
3. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 4. 北京四方继保工程技术有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 传统继电保护检修需人员进站并停电后借助测试仪工作, 耗费大量成本。为改变这种现状, 提出一种在线实施的新一代继电保护远程验证技术。首先, 基于南网成熟的主子站架构体系, 从通信和功能两个维度构建了一套安全可靠的技术架构。其次, 在主站创建或选取典型故障录波库中的录波文件, 经智能录波器远程下发至保护装置, 实现电气量的注入。进而, 保护装置采取钩子隔离机制回放录波数据, 触发模拟保护动作逻辑, 智能保护还开展虚回路在线模拟测试。最后, 智能录波器收集相关信息并生成验证报告上送主站, 完成保护动作行为的闭环测试。应用结果表明, 所开发产品能够安全高效地执行远程验证, 有助于运维工作的降本增效。

**关键词:** 变电站; 继电保护; 智能录波器; 远程验证; 在线模拟测试

### Research and application of a new generation remote verification technology for substation relay protection

TAN Qian<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, WANG Liwei<sup>2</sup>, FU Yuanhuan<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, LU Ying<sup>3</sup>, XU Jiayan<sup>4</sup>

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;  
2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 3. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, China; 4. Beijing Sifang Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Traditional relay protection maintenance requires personnel to enter substations and conduct tests with dedicated equipment after power outages, resulting in significant time and cost consumption. To address this issue, a new generation remote verification technology for relay protection that can be implemented online is proposed. First, based on the mature master-slave station architecture of CSG, a secure and reliable technical framework is established from both communication and functional dimensions. Second, recording files are created or selected from a typical fault recording database at the master station and remotely transmitted to the protection devices via intelligent recorders, enabling the injection of electrical quantities. Subsequently, the protection devices employ a hook-based isolation mechanism to replay the recording data, triggering simulated protection logic. Additionally, smart protection devices conduct online virtual circuit simulation tests. Finally, the intelligent recorder collects relevant information, generates a verification report, and uploads it to the master station, thereby completing a closed-loop test of protection actions. Field application results demonstrate that the developed system can perform remote verification safely and efficiently, contributing to cost reduction and efficiency improvement in maintenance work.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

**Key words:** substation; relay protection; intelligent recorder; remote verification; online simulation testing

## 0 引言

构建新型电力系统, 打造数智化坚强电网<sup>[1]</sup>是

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000); 南方电网公司科技项目资助(030000KC23120116(GDKJXM 20231556))

响应国家“十四五”规划和保障能源安全、实现“双碳”目标的重要举措, 数智化技术成为新型电力系统构建与电力行业数智化转型的关键<sup>[2]</sup>。继电保护是保障电力系统安全稳定运行的关键设备, 为适应新型电力系统的发展需求, 推动其向数字化、智能化方向升级, 已成为必然趋势。传统的继电保护升级和测试的模式, 已难以适应未来继电保护智能运

维的发展方向。在此背景下，探索新一代继电保护远程验证技术，成为一项紧迫且重要的课题。

变电站站控层采用制造报文规范(manufacture message specification, MMS)解决了设备间的互联互通问题，显著提升了站内设备通信的稳定性和可靠性。面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)与采样值(sampled values, SV)技术，实现了过程层信息可靠、快速的传输。通过采用光纤及虚回路代替大量物体电缆回路，深刻改变了变电站二次系统的技术形态。从我国变电站二次系统技术发展趋势<sup>[3]</sup>来看，主子站通信、故障诊断与智能运维<sup>[4-7]</sup>、虚回路校验<sup>[8]</sup>、二次回路告警<sup>[9]</sup>以及检修安措<sup>[10]</sup>等技术不断涌现，为保护远程验证技术的实现奠定了基础。

文献[11]基于测试功能构建的继电保护装置检验测试智能体，文献[12]基于长短期记忆网络的继电保护测试故障诊断方法，以及文献[13]提出一种基于模块化设计的综合测试系统，相比传统的仅用继电保护测试仪测试，能有效提升继电保护检验测试效率。文献[14]提出一种应对继电保护多场景的数字仿真测试方法，能满足各类继电保护仿真测试要求。同时，系统级调试和测试技术<sup>[15-17]</sup>与自动测试技术<sup>[18-20]</sup>的应用，也能有效提升调试效率、减少人力投入。这些研究属于继电保护就地测试范畴，在检验与调试阶段具有重要应用价值。

文献[21]提出继电保护故障信息系统全环节自动测试技术，通过远程全环节自动测试实现主站、变电站和间隔层保护装置功能的多步校对、自动结果评估和自动报表生成，主要解决继电保护故障信息系统的保护点表信息自动核对问题。文献[22]提出一种基于 IEC 61850 标准协议的数据对象建模方法，通过设计继电保护云测试系统框架，主要实现继电保护定值校验的智能预警功能。文献[23]提出基于自主可控技术的智能变电站继电保护远程智能测试方法，通过在站内部署一个或多个专用测试终端实现远程测试。该方法需要在站内固定部署测试系统，且测试时依赖现场人员配合接线，这对保护远程验证的推广有一定的局限性。文献[24]提出基于故障录波回放的智能变电站保护测试技术，通过利用继电保护测试仪回放故障录波完成保护试验，无需人工设置故障量，从而有效提升测试效率。该方法本质上仍是对保护测试仪测试方式的改进，尚未突破传统测试模式的局限。文献[25]提出一种基于主站远方不停电传动继电保护的远程验证方法，能够智能检验保护动作信号及跳合闸回路等关键信息，是一种有效的继电保护远程验证技术手段。然

而，该方法实际执行断路器跳合闸出口，在远程验证保护功能时需调度人员提前安排负荷转移，以保证用户供电可靠性，导致验证流程相对繁琐。

智能录波器是一种集成了故障录波、网络记录分析、二次系统可视化、智能运维等功能的综合设备，由管理单元与采集单元组成。它突破了传统故障录波器的单一应用场景，将保信子站和录波器融合并进一步升级，成为继电保护智能运维系统的核心载体，为保护远程验证提供了天然的技术平台。

因此，基于南网成熟运行的二次设备运维主站和智能录波器的主子站架构，构建一种安全可靠的保护远程验证技术体系。该体系从主站远程启动保护验证功能，通过下发录波数据模拟测试仪向装置注入电气量，安全触发保护验证流程，在不执行断路器跳合闸出口的前提下，代替传统人工检验方式，实现对保护动作行为及虚回路信号的远程验证，从而提供一种在线实施的保护远程验证技术手段。

### 1 技术架构

#### 1.1 通信架构

为确保保护远程验证过程的安全可靠，需构建满足内生安全技术<sup>[26]</sup>的通信架构，如图 1 所示。

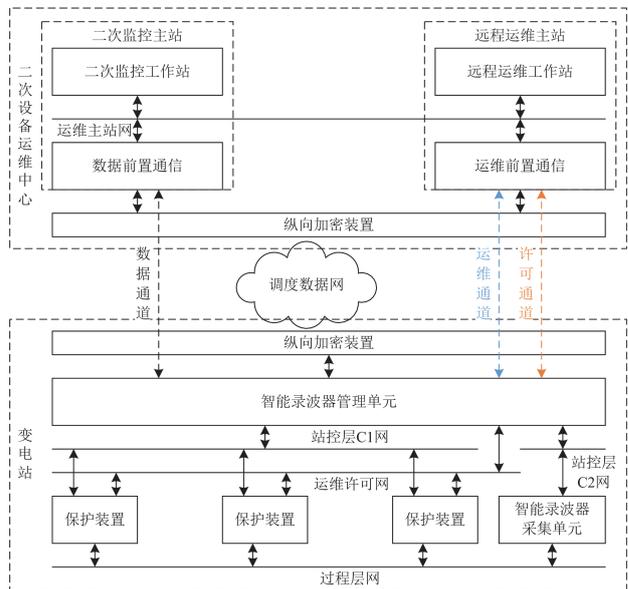


图 1 通信架构

Fig. 1 Communication architecture

保护远程验证属于远程运维操作类功能，为避免设备及系统遭受劫持、攻击或引发保护误动等风险，在业务网络、业务流程、通信协议等多个层面建立综合的具备自我防护能力的内生安全机制，以确保其安全可靠实施。

### 1) 业务网络安全

根据业务类型, 主子站通信划分为数据通信、许可通信和运维通信 3 类, 并分别建立互相独立的逻辑通道。各通道采用不同的协议及端口, 实现业务间的安全隔离。其中, 数据通信通道为现有通道, 实现主站对站内二次设备的实时监控; 许可通信和运维通信通道为新增通道, 分别负责主站对站内二次设备的远程运维授权许可及具体运维操作。

管理单元通过同一物理通道, 将数据通信通道连接二次监控主站, 将许可通信和运维通信通道连接远程运维主站。同时, 分别通过站控层网和运维许可网与保护装置通信。此外, 厂站端可独立配置管理单元作为许可子站, 主站端可独立配置许可主站, 从硬件层面实现许可与运维功能的物理分离。

保护装置组建站控层 C1 网, 通过 MMS 与管理单元通信, 既实现原有数据交互, 还响应并处理主站远程运维数据。同时, 保护装置还组建独立的运维许可网, 实现许可通道与运维通道的物理隔离, 从而构建安全可靠的专网专用环境。

### 2) 业务流程安全

为提升远程运维业务流程的安全性, 采取主站、管理单元及保护装置三级许可机制, 防患通信全链路面临的入侵与攻击风险。首先, 保护装置建模远程检修软压板, 主站通过数据通信通道远程将其投入后, 方可响应主站许可命令; 其次, 管理单元在接收到保护装置返回的许可成功信号后, 才转发主站下发的远程运维数据至保护装置; 最后, 主站在确认许可已成功下发保护装置后, 将状态同步至远程运维模块, 该模块据此开放远程运维操作的权限。

同时, 设计许可撤销命令用于关闭主站、管理单元与保护装置的许可权限, 以及超时撤销许可功能确保它们自动关闭各自的许可权限。

### 3) 通信协议安全

数据通信通道保持现有的主子站 MMS 代理模式通信协议。运维通信通道采用基于传输层安全性协议(transport layer security, TLS)的主子站 MMS 代理模式通信协议, 确保运维通信数据的保密性、完整性与真实性。同时, 结合调度数字证书技术, 运用国密算法构建运维通信的安全认证机制, 确保通信双方身份的真实性与抗抵赖性。

许可通信通道基于 IEC 60870-5-103 协议扩展实现, 增加身份认证与抗抵赖性机制。该通道采用短连接通信模式, 仅在运维许可或撤销时临时建立通信连接, 避免长期占用通信资源。

总之, 通信架构已充分融合上述安全机制, 通

过协同开发主站、管理单元及保护装置, 封堵了各环节潜在的安全漏洞。该架构在保持保护运行方式的情况下, 在线开展远程验证作业。整个流程不执行断路器跳合闸出口操作, 不涉及硬压板操作, 也无需现场人员配合, 符合远程在线模拟测试的要求。

许可通信流程如图 2 所示。



图 2 许可通信流程

Fig. 2 License communication process

## 1.2 功能架构

通过提升主站、管理单元与保护装置的能力, 构建一种无需测试仪、也无需人员到场的继电保护远程验证技术体系, 从而实现在主站端高效、安全、灵活地开展继电保护远程在线模拟测试工作。

功能架构如图 3 所示。



图 3 功能架构

Fig. 3 Function architecture

## 2 关键技术

通过测试仪验证保护功能,本质上是对保护装置注入信号。若不依赖测试仪,将传统的采样信号直接注入方式,改为向保护装置注入录波数据,这为继电保护远程验证提供了一条新的技术路径。基于电力系统暂态数据交换通用格式(common format for transient data exchange, COMTRADE)与GOOSE通信技术,本文提出录波创建、录波注入回放及虚回路在线模拟测试等技术,实现保护功能远程在线模拟闭环测试。

### 2.1 录波创建技术

主站通过收集电网实际故障录波和实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)动模试验的故障录波,创建装置典型故障录波库。在进行保护远程验证时,除了选取该库中的典型故障录波用于验证外,还可通过以下方式创建录波数据。

#### 1) 算法生成录波

对于工频电压、电流信号,计算理想交流信号的离散采样点  $x(n)$ , 如式(1)所示。

$$\begin{cases} x(n) = A \cdot \sin(2\pi f_c n \Delta t + \phi) + V_{dc} \\ \Delta t = 1/f_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $n$  为采样点序号;  $A$  为信号幅值;  $f_c$  为信号频率;  $\Delta t$  为采样间隔;  $\phi$  为初相角;  $V_{dc}$  为直流分量;  $f_s$  为采样率。

模拟故障中常见的谐波或暂态过程,可通过叠加多频分量计算包含谐波、暂态分量信号的离散采样点  $x(n)$ , 如式(2)所示。

$$\begin{cases} x(n) = A \cdot \sin(2\pi f_c n \Delta t + \phi) + V_{dc} + y(n) + z(n) \\ y(n) = \sum_{h=2}^H A_h \cdot \sin(2\pi h f_c n \Delta t + \phi_h) \\ z(n) = A_{decay} e^{-\alpha n \Delta t} \cdot \sin(2\pi f_d n \Delta t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $y(n)$  为谐波分量离散采样点;  $A_h$  为谐波幅值;  $h$  为谐波次数;  $H$  为最大谐波次数;  $\phi_h$  为谐波初相角;  $z(n)$  为暂态衰减分量离散采样点;  $A_{decay}$  为衰减分量幅值;  $\alpha$  为衰减系数;  $f_d$  为衰减分量频率。

模拟突变故障波形,可通过分段函数计算突变故障波形信号的离散采样点  $x(n)$ , 如式(3)所示。

$$x(n) = \begin{cases} A \cdot \sin(2\pi f_c n \Delta t + \phi) + w(n) \\ (A + \Delta A) \sin(2\pi f_c n \Delta t + \phi + \Delta \phi) + w(n) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w(n) = V_{dc} + y(n) + z(n)$ ;  $\Delta A$  为跳变幅值;  $\Delta \phi$  为跳变相角,以故障前后进行公式分段。

计算频率振荡故障波形信号的离散采样点  $x(n)$ , 如式(4)所示。

$$\begin{cases} x(n) = o(n) \cdot \sin(2\pi f_c n \Delta t - p(n) + \phi) \\ o(n) = A[1 + m \cos(2\pi f_u n \Delta t)] \\ p(n) = \frac{\Delta f}{f_v} \cos(2\pi f_v n \Delta t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $o(n)$  为幅值调制数;  $m$  为幅值调制系数;  $f_u$  为幅值调制频率;  $p(n)$  为频率调制数;  $f_v$  为频率调制频率;  $\Delta f$  为跳变频率。

对于开关量,如断路器分合闸、保护动作信号,属于离散二值信号  $d(t)$ , 通常表示为

$$d(t) = \begin{cases} 1 & \text{闭合/动作} \\ 0 & \text{断开/未动作} \end{cases} \quad (5)$$

计算开关量的离散采样点  $x(n)$ , 可直接按采样时间  $t_n = n \Delta t$  设置当前开关量值, 如式(6)所示。

$$x(n) = d(t_n) \quad (6)$$

选择故障类型及装置录波通道, 根据需求设置相应的参数后, 依据上述公式计算波形采样点。检查确认波形符合预期, 即可保存为 COMTRADE 标准格式的录波文件, 供后续验证使用。

#### 2) 波形编辑

在波形编辑界面, 从装置典型故障录波库选取故障录波文件加载录波, 生成录波通道  $j$  采样值序列  $C_j$ , 如式(7)所示。

$$C_j = \{(t_0, x(0)), (t_1, x(1)), \dots, (t_n, x(n))\} \quad (7)$$

挑选编辑的波形通道, 选定起始及结束时间段的波形, 可执行裁剪、拷贝、粘贴、插入、删除操作, 生成录波通道  $j$  新采样值序列  $C'_j$ , 如式(8)所示。

$$C'_j = \{(t_0, x'(0)), (t_1, x'(1)), \dots, (t_n, x'(n))\} \quad (8)$$

可视化编辑波形的裁剪功能是保留选定时间段波形; 拷贝功能是拷贝选定时间段波形, 再通过粘贴替换其他时间段相同相位波形, 或从相同相位采样点插入所拷贝波形; 删除功能是删除选定时间段波形。波形编辑操作后, 可另存为 COMTRADE 标准格式的新波形文件, 供后续验证使用。

#### 3) 波形融合

从源录波中选取需融合至目标录波的通道进行融合, 融合后新录波通道采样率与时间轴均以目标波形为准。在进行通道数据融合时, 系统自动选取录波启动前的采样点作为对齐基点, 通过计算对齐基点的相位角确定精准对齐位置, 并采用二阶拉格朗日插值算法计算合并通道采样点实现波形融合。二阶拉格朗日插值算法通过合并不同通道的异步采样点, 实现波形对齐与重构。算法核心是通过相邻 3 个采样点构造二次多项式, 以拟合局部波形特征。

不同录波的两个通道采样点是不同步的, 通道 1 的时间序列  $t^1$  和值序列  $e^1$  如式(9)所示。通道 2 的时间序列  $t^2$  和值序列  $e^2$  如式(10)所示。

$$\begin{cases} t^1 = [t_0^1, t_1^1, \dots, t_n^1] \\ e^1 = [e_0^1, e_1^1, \dots, e_n^1] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} t^2 = [t_0^2, t_1^2, \dots, t_n^2] \\ e^2 = [e_0^2, e_1^2, \dots, e_n^2] \end{cases} \quad (10)$$

为将通道 2 插值到通道 1 的时间戳  $t^1$  上, 以通道 1 第  $i$  个采样点, 找到通道 2 中最近的 3 个点  $(t_{k-1}^2, e_{k-1}^2)$ 、 $(t_k^2, e_k^2)$ 、 $(t_{k+1}^2, e_{k+1}^2)$ , 满足  $t_{k-1}^2 \leq t_i^1 \leq t_{k+1}^2$ , 计算插值后的第  $i$  个  $e_i^2$  值, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} e_i^2 = e_{k-1}^2 \cdot \Delta e_{k-1} + e_k^2 \cdot \Delta e_k + e_{k+1}^2 \cdot \Delta e_{k+1} \\ \Delta e_{k-1} = \frac{(t_i^1 - t_k^2)(t_i^1 - t_{k+1}^2)}{(t_{k-1}^2 - t_k^2)(t_{k-1}^2 - t_{k+1}^2)} \\ \Delta e_k = \frac{(t_i^1 - t_{k-1}^2)(t_i^1 - t_{k+1}^2)}{(t_k^2 - t_{k-1}^2)(t_k^2 - t_{k+1}^2)} \\ \Delta e_{k+1} = \frac{(t_i^1 - t_{k-1}^2)(t_i^1 - t_k^2)}{(t_{k+1}^2 - t_{k-1}^2)(t_{k+1}^2 - t_k^2)} \end{cases} \quad (11)$$

两个通道融合后第  $i$  个采样点为  $(t_i^1, e_i^1, e_i^2)$ 。

## 2.2 录波注入回放技术

录波数据由主站经管理单元注入保护装置, 整个注入流程严格遵循既定的安全通信机制。保护装置基于当前软硬件架构, 在解析与回放录波过程中, 采用录波校验、钩子隔离、多中央处理器(central processing unit, CPU)同步等机制, 确保录波回放的安全性和可靠性。录波注入回放流程如图 4 所示。

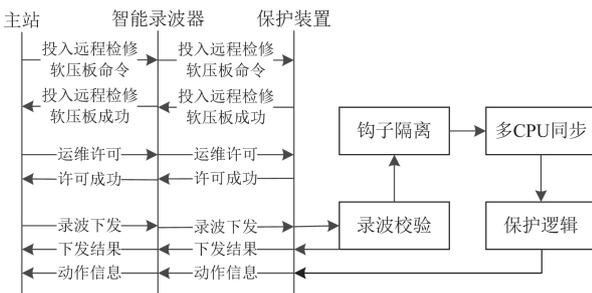


图 4 录波注入回放流程

Fig. 4 Wave recording injection playback process

### 1) 录波校验

保护装置在接收到录波文件后, 首先解析文件内容, 对录波数据进行合法性校验, 包括核对录波通道和装置配置是否一致, 检查录波数据长度及采样频率是否超限, 必要时对采样数据进行抽取处理, 以确保录波数据能够被保护装置后续正确处理。

### 2) 钩子隔离

钩子隔离通过钩子机制实现不同进程或线程之间的消息隔离。借鉴该原理, 录波校验通过后, 保护装置采取强隔离措施, 挂载钩子函数。此时保护装置不再从实际采样数据源读取数据, 而是将录波采样数据填入采样缓冲区, 供后续处理使用。录波回放及试验完成后, 立即卸载钩子函数、取消隔离措施, 恢复保护装置正常运行状态。

### 3) 多 CPU 同步

对于采用双 CPU 冗余配置的线路、变压器等保护装置, 以及采用主子机 CPU 配置的母差保护装置, 采样缓冲区数据通过装置内部高速数据总线同步至所有保护 CPU, 从而触发各保护 CPU 执行相应的保护逻辑。

### 4) 保护逻辑

为避免对变电站正常运行造成影响, 仅验证保护功能逻辑。保护动作后, 装置触发上送带检修品质的 MMS 动作报告至管理单元。常规变电站的保护动作实际不会触发跳合闸继电器出口, 而智能变电站的保护通过虚回路在线模拟测试技术, 进一步模拟验证 GOOSE 跳合闸回路的情况。

## 2.3 虚回路在线模拟测试技术

为完整验证智能变电站保护动作逻辑, 需将保护跳合闸回路纳入验证范围, 并将智能终端等订阅装置一并纳入测试体系。订阅装置通过配合试验保护模拟完整动作过程, 触发相关动作信号, 闭锁跳合闸继电器出口, 从而实现远程安全的闭环验证。

GOOSE 报文由报文头(Head)和协议数据单元(protocol data unit, PDU)两部分组成。IEC 61850 Ed2.0 版本将 Ed1.0 版本中 PDU 原有的布尔型参数 Test 改为 Simulation, 明确了模拟测试机制的实现方式, 并定义 Head 中的 Reserved1 字节最高位 S 配合该机制。Simulation 参数用于标识 GOOSE 报文是由模拟设备发出的, 还是实际设备发出的<sup>[27]</sup>。若报文由模拟设备发出, Simulation 置为 TRUE, 同时 S 置为 1。基于 GOOSE 报文的 Simulation 模拟测试机制, 为远程验证保护功能提供了规范依据, 使得在线模拟测试跳合闸回路功能可在标准框架下实施。

### 1) Simulation 模拟测试设计

根据 IEC 61850 标准, 物理设备逻辑节点(logical node for physical device, LPHD)中的数据对象(data object, DO)Sim 用于标识设备是否处于模拟模式。将 LPHD.Sim.stVal 设为 TRUE 时, 装置进入模拟模式; 设为 FALSE 则返回正常运行模式。

根据 IEC 61850 标准, GOOSE 监视逻辑节点(logical node for goose supervision, LGOS)中的数据

对象 SimSt，用于指示所监听 GOOSE 报文是否处于模拟状态。设置 LGOS.SimSt 为 TRUE，则装置处于模拟状态；设置 FALSE 则返回正常状态。同时，SimSt 与 LGOS 中的 St、GoCBRef 等 DO 配合使用。LGOS.St 是订阅功能状态(TRUE 为工作态，FALSE 为非工作态)，LGOS.GoCBRef 则标识当前监视的订阅控制块，每个订阅块由独立的 LGOS 进行监视。

试验保护在接收主站下发的录波文件后，启动录波数据回放前，其内部逻辑自动将装置切换至模拟模式。GOOSE 订阅方装置则需通过与试验保护交互 GOOSE 报文，接收模拟模式开启或返回运行模式的通知。为实现该功能，双方需在前缀(prefix)为 Sim 的通用过程输入/输出逻辑节点(generic process input/output, GGIO)上进行模拟模式输入、输出虚端子建模，将输出虚端子建模于数据集 dsGOOSE 中，并互相订阅输入和输出虚端子。此外，为分别实现模式通知与结果返回，需建模两套独立的输入、输出虚端子。整个交互过程与其他虚回路相同，可由智能录波器实时监测。

模拟测试模式建模要求如表 1 所示。

表 1 模拟测试模式建模要求

Table 1 Modeling requirements for simulation testing mode

属性名称	属性类型	选择类型	属性描述
公用逻辑节点信息			
Mod	INC	必备	模式
Beh	INS	可选	行为
Health	INS	可选	健康状态
NamPlt	LPL	可选	逻辑节点铭牌
状态信息			
SetMode	SPS	必备	设置模拟模式(输出)
ModeSt	SPS	必备	模拟模式状态(输出)
InSetMode	SPS	必备	设置模拟模式(输入)
InModeSt	SPS	必备	模拟模式状态(输入)

虚回路在线模拟测试流程如图 5 所示。

### 2) 跳合闸回路远程验证

文献[28]对跳合闸回路建模及监测开展了研究，通过构建跳合闸回路模板，基于变电站配置描述文件(substation configuration description, SCD)创建跳合闸回路的一维监测模型，预设回路信号并实时监测其正确性，能有效验证虚回路存在的失效风险。

在其研究基础上，进一步扩展应用于远程验证保护跳合闸的完整动作过程。具体而言，智能录波器增加对试验保护与订阅装置之间模拟模式交互的监测，并对 GOOSE 报文中的 Simulation 参数及 Reserved1 字节 S 位同步监测，校核保护模拟跳合闸动态特性。最后，管理单元输出远程验证报告供主站调阅，确保试验的完整性、安全性及高效性。

110 kV 线路保护动作监测逻辑如图 6 所示。

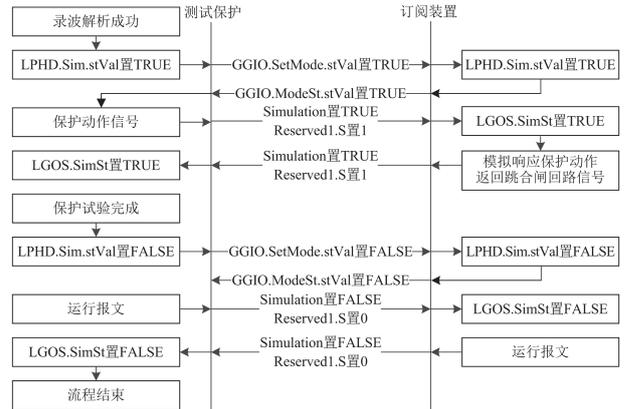


图 5 虚回路在线模拟测试流程

Fig. 5 Online simulation testing process for virtual circuit

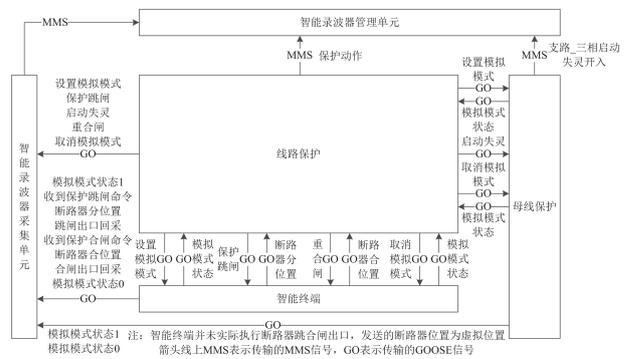


图 6 110 kV 线路保护动作监测逻辑

Fig. 6 Monitoring logic of 110 kV line protection action

## 2.4 远程验证技术实现

为系统阐述主站、管理单元及保护装置三级协同实现远程验证的技术方案，完整覆盖远程在线闭环模拟测试的全流程，技术实现流程如图 7 所示。

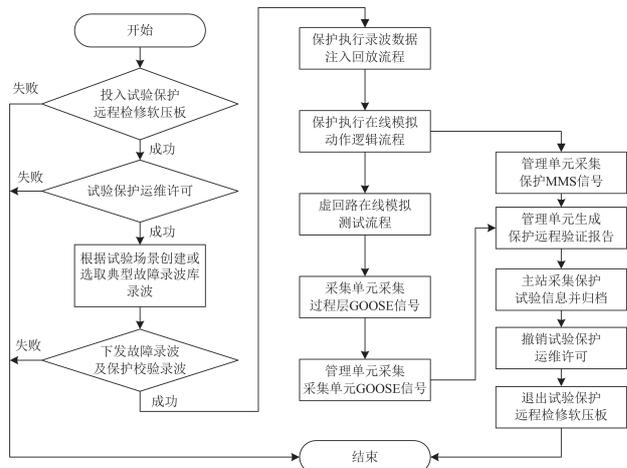


图 7 技术实现流程

Fig. 7 Technical implementation process

与现有国内外技术相比, 本文所提技术的主要优势包括:

1) 扩展现有通信架构, 构建覆盖业务网络、业务流程及通信协议的多层面综合安全体系, 系统设计了适应保护远程运维需求的内生安全机制;

2) 通过远程下发录波文件, 结合保护装置的安全钩子隔离措施, 实现录波数据的可靠注入与回放, 能够快速、有效地触发保护动作, 完成保护功能的在线闭环模拟测试;

3) 支持自动执行安全的虚回路在线模拟测试, 实现智能变电站保护动作全逻辑远程验证。

### 3 技术应用

本文所提技术已在四方股份相关装置中得到完整实现, 涵盖主站、智能录波器、110 kV 线路保护、110 kV 变压器保护、110 kV 母线保护及智能终端等设备。前期在广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室搭建了包括上述产品的最小系统进行测试验证, 新增功能满足项目技术要求, 且未影响产品原有功能与性能。最后, 在广东某 110 kV 变电站开展挂网试运行, 在变电站运行状态下, 成功进行了多次保护远程在线验证试验, 结果与实验室验证效果一致, 达到了项目预期目标。

#### 3.1 作业流程

为指导继电保护远程验证高效作业, 制定继电保护远程验证作业流程如图 8 所示。

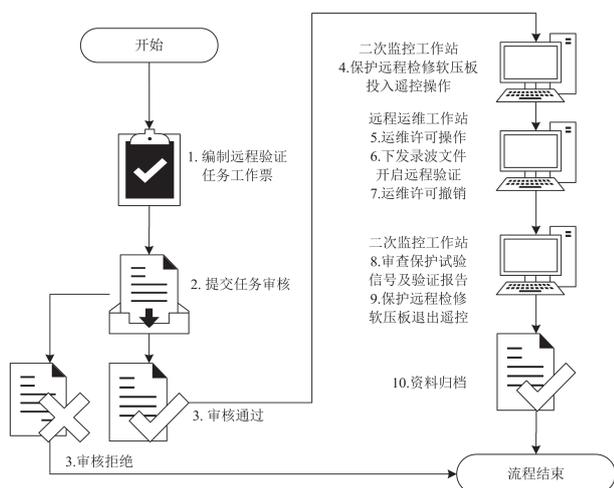


图 8 继电保护远程验证作业流程

Fig. 8 Remote verification workflow of relay protection

传统检修模式下, 至少需要两名运检人员进站并停电开展保护检修工作, 单个间隔的保护检修通常耗时 1 天, 总体工作量不低于 2 人·天。若由两位

运检人员在主站执行保护远程验证, 可分钟级完成单个保护装置的远程闭环测试试验, 整个作业流程最长不超过 1 h, 总体工作量不超过 2 人·时。

#### 3.2 录波创建

根据式(3)生成线路保护 A 相短路故障、BC 相正常的三相电流波形。设置故障前电流幅值均为 0.5 A, 相位分别为 A 相 0°、B 相 -120°、C 相 120°,  $f_c$  为 50 Hz,  $f_s$  为 4 kHz, 故障后 A 相电流  $\Delta I$  为 1.5 A 及  $\Delta\phi$  为 0°, 且不含直流、谐波及衰减分量。生成的三相电流波形如图 9 所示。

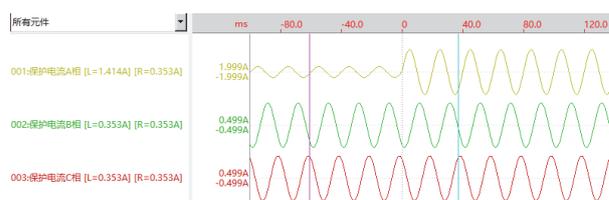


图 9 三相电流波形

Fig. 9 Three-phase current waveform

根据式(4)生成线路保护三相电流频率振荡故障波形。设置故障前电流幅值和相位、 $f_c$  和  $f_s$  同上,  $m$  为 0.5,  $f_u$  为 10 Hz,  $f_v$  为 10 Hz,  $\Delta f$  为 1 Hz, 生成的频率振荡故障波形如图 10 所示。

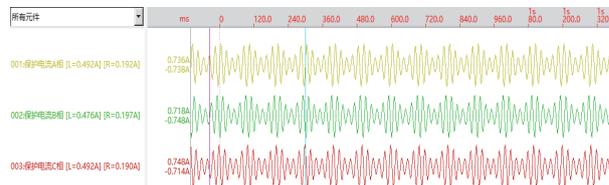


图 10 频率振荡故障波形

Fig. 10 Frequency oscillation fault waveform

采用录波融合算法, 将两个不同装置同时刻故障记录的三相电流通道进行合并对齐, 并分别以分离展示(图 11)和叠加展示(图 12)的形式呈现。通过波形对比可见, 该算法实现了波形的精确对齐与完全重叠, 表明其具备较高的融合精度。

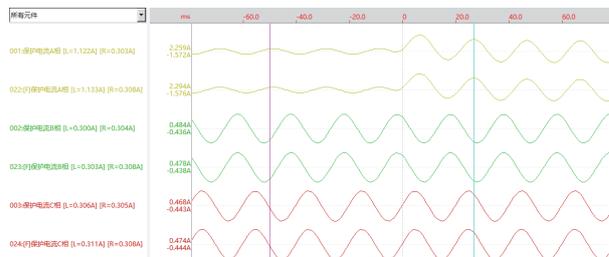


图 11 录波融合分离展示

Fig. 11 Wave recording fusion separation display

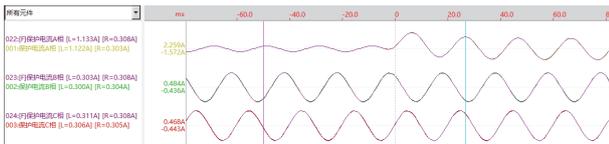


图 12 录波融合叠加展示

Fig. 12 Wave recording fusion overlay display

### 3.3 保护远程验证

#### 1) 安全测试

当设备数字证书无效，主站与管理单元之间的许可通信和运维通信、管理单元与保护装置之间的许可通信均无法建立正常连接。

若主站未收到保护装置返回的许可成功信号，则无法开启远程运维操作权限；若管理单元未收到该信号，则禁止转发主站下发的录波文件至保护装置；若保护装置未投入远程检修压板，且未收到主站运维许可命令，则禁止处理主站下发的录波数据。

#### 2) 验证流程

保护远程验证的逻辑流程主要包括以下步骤：

(1) 主站经管理单元遥控投入试验保护的远程检修软压板，保护装置将软压板状态置为投入；

(2) 主站经管理单元向试验保护下发许可命令，保护装置开启运维许可状态；

(3) 主站经管理单元向试验保护下发试验录波文件，保护装置解析并校验录波文件合法后，通过钩子隔离与多 CPU 同步机制，将录波数据回放为试验采样数据，进而启动保护逻辑触发保护动作；

(4) 智能保护与订阅装置启动虚回路在线模拟测试状态，保护触发 GOOSE 跳合闸信号，订阅装置响应 GOOSE 信号并返回对应的 GOOSE 模拟信号，随后各装置返回为正常运行状态；

(5) 智能录波器收集保护动作及跳合闸回路信号，生成保护远程验证报告上送主站；

(6) 主站经管理单元向试验保护下发许可撤销命令，三者均关闭运维许可状态；

(7) 主站经管理单元遥控退出试验保护的远程检修软压板，保护装置将软压板状态置为退出。

#### 3) 验证案例

模拟 RTDS 特性，在故障发生后加入直流分量和谐波分量，生成 110 kV 线路保护三相跳闸且重合闸成功的 0 km 处 A 相接地故障录波，如图 13 所示。

图 13 中故障后蓝色纵向标签线所在位置的采样点谐波分析结果如表 2 所示。

管理单元采集保护装置的 MMS 信号，同时采集单元采集过程层 GOOSE 信号并上送至管理单元，最终整理生成的保护远程验证报告如表 3 所示。

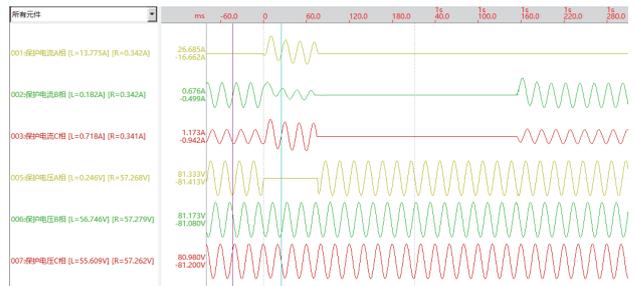


图 13 110 kV 线路保护 A 相故障波形

Fig. 13 A-phase fault waveform for 110 kV line protection

表 2 谐波分析结果

Table 2 Harmonic analysis results

A				
通道名称	基波分量	直流分量	2 次谐波	3 次谐波
保护电流 A 相	13.721	8.076	0.817	0.554
保护电流 B 相	0.187	0.187	0.028	0.020
保护电流 C 相	0.719	0.185	0.031	0.020
通道名称	4 次谐波	5 次谐波	6 次谐波	7 次谐波
保护电流 A 相	0.421	0.348	0.299	0.267
保护电流 B 相	0.015	0.012	0.012	0.010
保护电流 C 相	0.015	0.013	0.012	0.011

表 3 保护远程验证报告

Table 3 Protection remote verification report

序号	相对时间/ms	动作信号名称	信号值
1	0	线路保护_保护启动	动作
2	6	线路保护_快速距离保护动作	动作
3	6	线路保护_保护三跳出口	动作
4	7	线路保护_保护跳闸_GO	动作
5	17	线路保护_接地距离 I 段动作	动作
6	83	线路保护_故障相别	AN
7	83	线路保护_故障测距/km	0.005
8	83	线路保护_故障电流/A	13.158
9	83	线路保护_零序电流/A	0.002
10	99	线路保护_保护跳闸_GO	复归
11	99	线路保护_接地距离 I 段动作	复归
12	99	线路保护_快速距离保护动作	复归
13	99	线路保护_保护三跳出口	复归
14	1091	线路保护_重合闸动作	动作
15	1091	线路保护_重合闸动作_GO	动作
16	1201	线路保护_重合闸动作	复归
17	1201	线路保护_重合闸动作_GO	复归
18	5106	线路保护_保护启动	复归
序号	相对时间/ms	跳合闸信号名称	信号值
1	0	线路保护_设置模拟模式	TRUE
2	2	智能终端_模拟模式状态	TRUE
3	2	母线保护_模拟模式状态	TRUE
4	7	线路保护_保护跳闸	动作

续表 3

序号	相对时间/ms	跳合闸信号名称	信号值
5	7	线路保护_启动失灵	动作
6	8	母线保护_支路6三相启动失灵开入	动作
7	8	智能终端_收到保护跳闸命令	动作
8	110	智能终端_断路器位置	分
9	110	线路保护_TWJ	合
10	112	智能终端_跳闸出口回采	动作
11	1091	线路保护_重合闸	动作
12	1092	智能终端_收到保护合闸命令	复归
13	1194	智能终端_断路器位置	合
14	1194	线路保护_TWJ	分
15	1196	智能终端_跳闸出口回采	动作
16	5106	线路保护_设置模拟模式	FALSE
17	5108	智能终端_模拟模式状态	FALSE
18	5108	母线保护_模拟模式状态	FALSE
验证结果		保护正确动作	

选取线路保护装置典型故障录波库中 ABC 三相短路且重合闸成功的故障录波, 下发至装置启动远程验证。保护装置动作行为与电网实际故障动作一致, 动作生成的录波部分通道波形如图 14 所示。

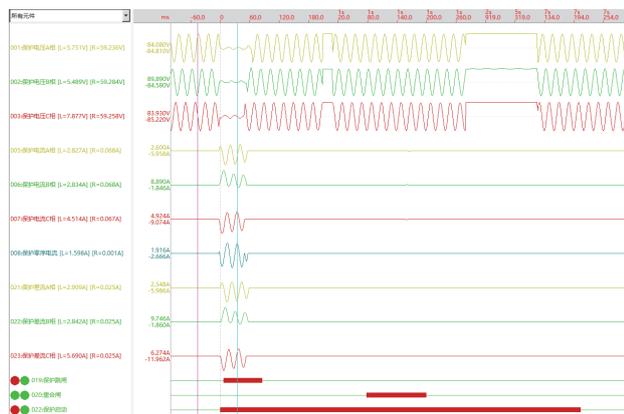


图 14 110 kV 线路保护 ABC 相故障波形

Fig. 14 ABC-phase fault waveform for 110 kV line protection

主站整理的站级故障归档报告如表 4 所示。

#### 4 结语

本文基于南网成熟运行的二次设备运维主站与智能录波器构成的主子站架构体系, 从通信与功能两个维度, 开展了变电站新一代继电保护远程验证技术研究。通过提出录波创建、录波注入回放及虚回路在线模拟测试等关键技术, 实现了保护远程闭环测试, 形成了一套安全可靠的保护在线运行模拟测试技术方案。经实验室测试验证和工程挂网试运行的在线验证, 所开发产品功能满足技术要求, 且

表 4 站级故障归档报告

Table 4 Station level fault archiving report

归档状态	归档单位	归档人	归档时间
试验归档	广东中调	XXX	2025-06-27 08:20:42
厂站	故障设备	故障相别	故障时间
XX 站	110 kVXX 线	ABC 相	2025-06-27 08:10:52
故障类型	故障持续时间	故障电流	故障情况
瞬时性	58 ms	6.23 A	110 kVXX 线 ABC 相故障 测距: 5.2 km(距 XX 站) 重合成功
保护名称	相对时间/ms	动作相别	动作元件
XX 保护	0	—	保护启动 动作
XX 保护	10	—	分相差动动作 动作
XX 保护	10	ABC	保护动作 动作
XX 保护	86	—	分相差动动作 复归
XX 保护	86	—	保护动作 复归
XX 保护	1081	—	重合闸动作 动作
XX 保护	1201	—	重合闸动作 复归
XX 保护	7208	—	保护启动 复归
保护名称	故障参数	故障值	
XX 保护	故障相别	ABC	
XX 保护	测距	5.2 km	
XX 保护	零序电流	1.52 A	
XX 保护	故障电压	11.59 V	
XX 保护	故障电流	6.23 A	
XX 保护	故障差流	5.73 A	
保护名称	故障录波文件名称		
XX 保护	PL1106_RCD_165_20250627_081052_007_f		
初步定论	保护正确动作		
正确次数	误动次数	拒动次数	不正确动作原因
2	0	0	无
下一步需要开展的工作及拟采取的措施			无

未影响产品原有功能与性能, 充分证明了技术的可行性与先进性。该技术可为保护远程检验提供高效可靠的系统支撑, 有助于实现继电保护运维工作的降本增效, 具备显著的实用价值和工程推广前景。

本文所提技术架构可支持保护程序远程升级、配置修改等远程维护功能, 相关技术方案仍有持续深化与拓展的空间。在保护装置完成上述远程维护操作后, 可在主站开展保护远程验证, 这一能力尤为重要。同时, 随着新型电力系统与数智化坚强电网建设的加速推进, 该技术还可广泛应用于新能源等领域, 为减少人力依赖、降低装置维护成本提供支撑, 能够创造可观的经济效益与社会效益。

## 参考文献

- [1] 辛保安. 数智化坚强电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2025.
- [2] 王朋, 张迪, 张勇军, 等. 新型电力系统数智化关键技术应用研究与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 175-187.  
WANG Peng, ZHANG Di, ZHANG Yongjun, et al. Research and prospects for key digital-intelligent technology applications in new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 175-187.
- [3] LI Mingjie, LIU Yu, SHU Zhihui, et al. Research and judgement on technical development trend of substation secondary system in China[C]// CIGRE 2022 Session, August 28-September 2, 2022, Paris, France.
- [4] KONG Xiangyu, XU Yong, JIAO Zaibin, et al. Fault location technology for power system based on information about the power internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6682-6692.
- [5] ZHANG Jiwen, WANG Yulong, YANG Yeya, et al. Fault diagnosis and intelligent maintenance of industry 4.0 power system based on internet of things technology and thermal energy optimization[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 55.
- [6] 周海成, 石恒初, 曾令森, 等. 基于关系超图增强 Transformer 的智能站二次设备故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 123-132.  
ZHOU Haicheng, SHI Hengchu, ZENG Lingsen, et al. Fault diagnosis of an intelligent substation secondary device based on a relational hypergraph-enhanced Transformer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 123-132.
- [7] 闫明, 郭文豪, 胡永乐, 等. 基于 5G 的配电网智能故障诊断方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 15-20.  
YAN Ming, GUO Wenhao, HU Yongle, et al. Intelligent fault diagnosis method of distribution network based on 5G[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 15-20.
- [8] 叶远波, 李端超, 谢民, 等. 面向新型电力系统的智能变电站虚回路自动校验技术研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 91-99.  
YE Yuanbo, LI Duanchao, XIE Min, et al. Research on automatic calibration technology of virtual circuit in smart substation for novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 91-99.
- [9] 李玉峰, 吴晓宾, 孔海波, 等. 基于多参信息量的智能变电站继电保护二次回路故障在线诊断[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(3): 172-175.  
LI Yufeng, WU Xiaobin, KONG Haibo, et al. Online diagnosis of relay protection secondary circuit fault in intelligent substation based on multi-parameter information[J]. Techniques of Automation & Applications, 2021, 40(3): 172-175.
- [10] 俞伊丽, 张展耀, 接晓霞, 等. 基于知识图谱与SCD文件的智能变电站二次检修安全措施自动生成技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 129-142.  
YU Yili, ZHANG Zhanyao, JIE Xiaoxia, et al. Automatic generation technology of secondary safety measures in an intelligent substation based on a knowledge graph and SCD files[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 129-142.
- [11] 彭桂喜, 袁思遥, 孙昊, 等. 继电保护装置检验测试智能体的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 174-179.  
PENG Guixi, YUAN Siyao, SUN Hao, et al. Study and implementation of a test agent for relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 174-179.
- [12] 陈桂芳, 董秀成, 郑永康, 等. 基于长短期记忆网络的继电保护测试故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 65-73.  
CHEN Guifang, DONG Xiucheng, ZHENG Yongkang, et al. Fault diagnosis of a relay protection test based on a long short-term memory network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 65-73.
- [13] 许勇斌, 孙运兵, 段贤稳, 等. 基于模块化设计的继电保护综合测试系统[J]. 机电工程技术, 2024, 53(12): 118-125.  
XU Yongbin, SUN Yunbing, DUAN Xianwen, et al. A comprehensive testing system for relay protection based on modular design[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(12): 118-125.
- [14] 刘清泉, 杨鹏, 李铁成, 等. 应对继电保护多场景的数字仿真测试方法[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 118-125.  
LIU Qingquan, YANG Peng, LI Tiecheng, et al. Digital simulation test method for multiple scenarios relay protection[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 118-125.
- [15] 雍明月, 朱勇, 严伟, 等. 一种基于组态方式的变电站二次设备系统级调试方法[J]. 电网技术, 2021, 45(增刊2): 208-214.  
YONG Mingyue, ZHU Yong, YAN Wei, et al. Research and implementation of a system level commissioning method of substation secondary equipment based on configuration mode[J]. Power System Technology, 2021, 45(S2): 208-214.
- [16] 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): 3791-3798.

- MENG Jiangwen, LI Zhongqing, ZHAN Rongrong, et al. Key technology of relay protection system-level testing considering comprehensive optimization of substation secondary system[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3791-3798.
- [17] 门强, 刘涛, 张俊, 等. 基于自主可控技术的智能变电站继电保护远程智能测试方法与应用[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 185-192.
- MEN Qiang, LIU Tao, ZHANG Jun, et al. Remote intelligent test method and application of relay protection of smart substation based on autonomous controllable technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 185-192.
- [18] 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.
- [19] 孔凡坊, 林珑, 陈培训, 等. 智能变电站二次设备自动测试技术研究[J]. 电网技术, 2021, 45(增刊 1): 75-79.
- KONG Fanfang, LIN Long, CHEN Peixun, et al. Research on automatic testing technology of secondary equipment in smart substation[J]. Power System Technology, 2021, 45(S1): 75-79.
- [20] 叶远波, 章昊, 王同文, 等. 基于边缘物联网的电力系统二次继保设备测试管控技术[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 156-162, 174.
- YE Yuanbo, ZHANG Hao, WANG Tongwen, et al. Test and control technology for secondary relay protection equipment of power system based on edge IoT[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 156-162, 174.
- [21] NAN Dongliang, TAN Jinlong, ZHANG Lu, et al. Research on the remote automatic test technology of the full link of the substation relay protection fault information system[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1370-1380.
- [22] HUANG Xiang, QI Beibei, ZHUANG Shuyi, et al. Data object modeling for industrial internet of things and its efficient implementation in a cloud test system for relay protection[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2025, 10(1): 1-25.
- [23] 门强, 刘涛, 张俊. 基于自主可控技术的智能变电站继电保护远程智能测试方法与应用[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 185-192.
- MEN Qiang, LIU Tao, ZHANG Jun. Remote intelligent test method and application of relay protection of smart substation based on autonomous controllable technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 185-192.
- [24] 李涵, 宋宇, 楚皓翔. 基于故障录波回放的智能变电站保护测试技术研究[J]. 电气技术, 2021, 22(12): 78-83, 89.
- LI Han, SONG Yu, CHU Haoxiang. Research on intelligent substation protection test technology based on fault recording and playback[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(12): 78-83, 89.
- [25] 黄国平, 许家焰, 陈锦荣, 等. 继电保护远方不停电检验系统设计及工程化应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 152-159.
- HUANG Guoping, XU Jiayan, CHEN Jinrong, et al. Design and engineering application of a remote intelligent test system for relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 152-159.
- [26] 李涛, 兰小龙, 李贝贝, 等. 内生安全支撑的新型网络体系结构与关键技术研究构想与成果展望[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 1-13.
- LI Tao, LAN Xiaolong, LI Beibei, et al. Research framework and anticipated results of new network architecture and key technologies supported by endogenous security[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 1-13.
- [27] 宋福海, 刘宏君, 李进. IEC 61850 Ed2.0 和 Ed1.0 GOOSE 差异分析及实现策略[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(2): 88-93.
- SONG Fuhai, LIU Hongjun, LI Jin. IEC 61850 Ed2.0 and Ed1.0 GOOSE difference analysis and implementation strategy[J]. Electric Power ICT, 2021, 19(2): 88-93.
- [28] 许家焰, 武芳瑛, 李瑞, 等. 智能变电站继电保护二次虚回路失效风险动态识别技术[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(1): 160-170.
- XU Jiayan, WU Fangying, LI Rui, et al. Dynamic identification technology for the failure risk of secondary virtual circuit of relay protection in intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1): 160-170.

收稿日期: 2025-08-25; 修回日期: 2025-12-12

作者简介:

谭乾(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护;

王峰(1982—), 女, 硕士, 教授级工程师, 研究方向为继电保护;

许家焰(1976—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为变电站设备监控及二次智能运维技术。E-mail: xujiayan@sf-auto.com

(编辑 许威)