

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221757

# 继电保护远方不停电检验系统设计及工程化应用

黄国平<sup>1</sup>, 许家焰<sup>2</sup>, 陈锦荣<sup>1</sup>, 刘秀甫<sup>1</sup>, 刘秋英<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 北京四方继保工程技术有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 继电保护装置呈现爆炸式增长趋势, 传统的继电保护停电检验方式存在不能按时开展检验工作、需要耗费巨大的人力和经济成本等问题。为了解决上述问题, 设计了一套安全高效的继电保护远方不停电检验系统。基于现有的变电站继电保护系统, 通过采用继电保护不停电传动功能, 扩展变电站智能运维业务的方式实现。并充分考虑继电保护远方不停电检验的安全性, 设计了继电保护、智能录波器、主站三级多重安全防误。为了实现高效的智能检验, 设计了跳合闸回路监视预警、开关机械特性监视预警和主子站一体化功能等核心功能。通过工程化应用的遵循原则、应用情况及效果表明, 所提系统可以改变继电保护传统人工停电检验模式, 具有实用化价值和工程化前景。

**关键词:** 继电保护; 智能录波器; 主站; 远方不停电检验; 智能检验

## Design and engineering application of a remote intelligent test system for relay protection

HUANG Guoping<sup>1</sup>, XU Jiayan<sup>2</sup>, CHEN Jinrong<sup>1</sup>, LIU Xiufu<sup>1</sup>, LIU Qiuying<sup>1</sup>

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, China;  
2. Beijing Sifang Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Relay protection devices show an explosive growth trend. There are some problems in the traditional method of relay protection test. For example, it cannot carry out the inspection work on time, and requires huge human resources and economic costs, etc. To solve the above problems, a safe and efficient relay protection remote power-on test system is designed. Based on the existing relay protection system of a substation, the system is realized using the power-on transmission function of relay protection, and expanding the intelligent operation and maintenance business of the substation. The system fully considers the security of relay protection remote power-on test, and designs three-level multiple security error prevention of relay protection, with an intelligent recorder and master station. To achieve an efficient intelligent test, the system designs such core functions as monitoring and warning of the trip and close circuits, monitoring and warning of mechanical characteristics of switches, and integration of master and slave stations. Given the principle, application and effect of engineering application, the system can change the traditional manual power-off test mode of relay protection, and has practical value and engineering prospect.

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

**Key words:** relay protection; intelligent recorder; mater station; remote power-on test; intelligent test

## 0 引言

随着电网规模的不断扩大, 变电站数量逐年递增, 继电保护装置呈现爆炸式增长趋势。电网检修部门为了确保继电保护装置及其回路的可靠运行, 每年都要制定计划、安排停电检修。传统的继电保

护检验方式存在不能按时开展检验工作、需要耗费巨大的人力和经济成本等问题, 迫切需要一套安全高效的继电保护远方不停电检验系统支撑继电保护检验工作。

文献[1]探讨了继电保护不停电传动检验新技术, 尝试了主子站实现继电保护远方不停电传动。迄今为止, 继电保护不停电传动的应用在国家电网和南方电网都以保护装置界面菜单触发不停电传动为主。尝试的继电保护远方不停电传动仅是远方遥

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000);  
中国南方电网有限责任公司项目资助(GDKJXM20220154)

控触发, 由继电保护本体做简单逻辑判断, 没有远方不停电传动条件的预判, 更没有考虑从主站到子站、再到继电保护的三级多重安全防误。此外, 继电保护不停电传动只能人工分析传动信号, 没有研究传动过程在线监视及智能诊断等智能检验技术。

文献[2]梳理了评估继电保护状态所需的状态信息集, 探讨状态信息集的构成及获取方式, 提出基于不同类别状态信息的运维检修的方法。文献[3]基于 IEC 61850 规约的多模块协同工作的系统架构, 给出了一种继电保护检验测试智能体的实现方案。文献[4]研究了智能变电站改扩建二次系统测试的新方法。上述研究与继电保护远方不停电检验无关。

智能变电站网络结构发生很大变化, 采用光纤传输数据, 通过光纤通信链路实现各装置的联系<sup>[5]</sup>, 二次回路由网络虚回路取代电缆硬回路导致信息不透明<sup>[6]</sup>, 给智能变电站二次安全措施和二次回路监视带来挑战。智能变电站二次安全措施研究集中在系统开发实现<sup>[7-8]</sup>、二次安全措施方法<sup>[9-11]</sup>、二次安全措施防误的技术<sup>[12-13]</sup>等方面, 解决二次安全措施的操作安全性、拟定工作票的难度大、工作效率低、缺乏有效防误等问题。在智能变电站二次回路监视方面, 文献[14]研究了一种智能变电站过程层的网络状态监控方法, 文献[15]开发了一种智能变电站二次回路在线监测及故障诊断系统, 还有各种二次回路故障诊断技术<sup>[16-18]</sup>及故障定位技术<sup>[19-20]</sup>研究, 解决二次回路可视化及通信链路故障排查等问题。上述研究都不涉及继电保护远方不停电检验技术。

南方电网《继电保护通用技术规范》规范了继电保护装置界面菜单不停电传动功能, 但没有规范继电保护远方不停电传动技术要求。

智能录波器作为变电站智能运维的核心载体, 是集成了故障录波、网络记录分析、二次系统可视化、智能运维的设备, 由管理单元与采集单元组成。基于智能录波器研究继电保护远方不停电检验功能, 能扩展变电站智能运维业务。

本文基于现有的变电站继电保护系统, 涉及的工作包括: 1) 设计了继电保护远方不停电检验系统; 2) 从远方操作安全的角度, 设计了系统的主站、智能录波器和继电保护的三级多重安全防误; 3) 系统设计的核心功能为继电保护远方不停电检验提供了高效精准的智能检验技术支撑。通过工程化应用的遵循原则、应用情况及效果表明, 系统可以改变继电保护传统人工停电检验模式, 推动继电保护远方智能检验工作的开展, 实现了降本增效。

## 1 系统架构设计

继电保护远方不停电检验系统由调度端的主站、厂站端的智能录波器和继电保护组成。其中, 调度端主站包括分站、系统适用厂站覆盖智能变电站和常规变电站。

系统使用流程包括: 1) 二次检修人员使用调度端主站或分站工作站在满足传动条件时执行继电保护远方不停电传动操作, 将传动控制命令下发厂站端的智能录波器管理单元; 2) 智能录波器管理单元将控制命令转发继电保护执行; 3) 继电保护和智能录波器采集单元将传动跳闸触发的所有传动信息上传智能录波器管理单元处理; 4) 智能录波器管理单元将所有传动信息及智能检验结果上传主站处理。

系统架构如图 1 所示。

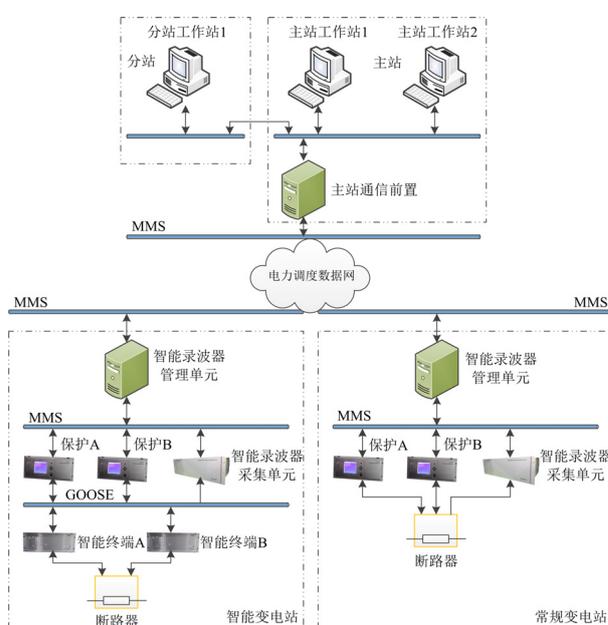


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

## 2 系统三级多重安全防误设计

### 2.1 继电保护本体多重安全防误

继电保护是远方不停电检验的运维对象, 远方不停电传动命令的执行终端。继电保护需要在自身正常运行状态时, 响应合法的传动遥控命令并执行传动, 其肩负最重要的第一级本体安全职责。

#### 1) 继电保护传动遥控条件防误

模型设计“远方不停电传动软压板”, 压板只能在装置界面就地投退。继电保护在“远方操作硬压板”和“远方不停电传动软压板”均投入时, 满足传动遥控首要条件, 否则闭锁传动遥控。

2) 继电保护传动使能条件防误

模型设计“不停电传动使能”控制，采取增强型控制建模。继电保护执行“不停电传动使能”控制命令，开放远方不停电传动使能状态后，满足不停电传动跳闸控制的其中一个条件。远方不停电传动使能开放时间默认 30 min，超过开放时间后，继电保护自动退出使能状态，并闭锁传动跳闸控制。

3) 继电保护传动信号条件防误

继电保护远方不停电传动适合具备重合闸功能的线路保护。线路保护满足所有传动信号条件时，允许执行传动跳闸控制命令，存在闭锁传动信号条件则禁止执行传动跳闸控制命令，如表 1 所示。

表 1 继电保护传动信号条件

信号名称	闭锁传动	允许传动
重合闸充电状态	未完成	
运行状态(如 PT 断线、CT 断线等)	异常	不存在
自检告警状态	异常	闭锁传动
保护启动状态	启动	条件
异常、故障或启动等信号返回时间	小于 1 min	

4) 继电保护传动跳闸控制防误

模型设计“不停电传动”控制，采取增强型控制建模。线路保护采取分相跳闸设计时，传动跳闸控制信号分为“不停电传动 A 相”、“不停电传动 B 相”、“不停电传动 C 相”；线路保护采取三相跳闸设计时，传动跳闸控制信号为“不停电传动”。

传动跳闸控制防误的关键逻辑如下：

- a) 执行传动跳闸控制命令时，判断两次传动间隔时间不小于 1 min，否则闭锁传动跳闸控制命令；
- b) 驱动跳闸出口继电器闭合脉宽时间为 40~100 ms，跳开断路器后快速实现重合闸；
- c) 处于传动控制操作状态时，不影响装置其余保护功能运行。

综上所述，远方不停电传动逻辑如图 2 所示。

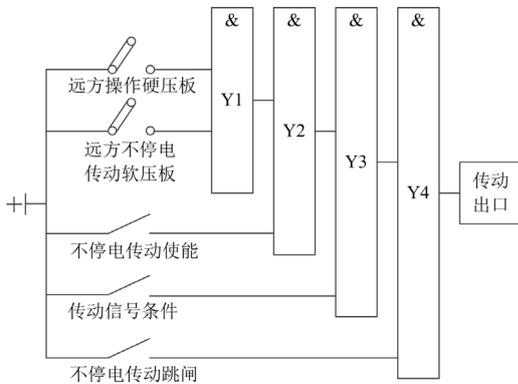


图 2 远方不停电传动逻辑图

Fig. 2 Logic chart of remote power-on transmission

2.2 智能录波器远方多重安全防误

智能录波器是远方不停电检验的关键载体，支撑主站和自身人机界面实施远方不停电传动操作，属于系统的控制及情报中心。智能录波器实时监测继电保护运行状态，逐一执行传动使能控制和传动跳闸控制，其肩负第二级远方控制安全职责。

1) 智能录波器传动预判条件防误

智能录波器实时预判继电保护的各种状态，满足所有传动预判条件时，开放远方不停电传动控制权限，否则闭锁传动控制权限，如表 2 所示。

表 2 智能录波器传动预判条件

Table 2 Transmission pre-judgment conditions of intelligent recorder

预判条件	闭锁传动	允许传动
保护通信状态	中断	
远方操作硬压板状态	退出	
检修硬压板状态	投入	
重合闸充电状态	未完成	不存在
运行状态	异常	闭锁传动
软压板状态	异常	条件
采样状态	异常	
定值状态	异常	
两次传动间隔时间	小于 1 min	

表 2 部分预判条件判断逻辑如下所述。

a) 运行状态：实时监测保护运行、自检、启动信号。无任何启动和异常告警信号，预判结果为正常，否则，预判结果为异常。

b) 压板状态：实时监测保护压板状态，与预先设置的基准值比较，完全一致时，预判结果为正常，否则，预判结果为异常。

c) 采样状态：实时校核保护与另一套保护或智能录波器采集单元的同源采样的一致性，误差在允许范围内，预判结果为正常，否则预判结果为异常。

同源采样比对判据为交流电流相对误差不大于 2.5%或绝对误差不大于  $0.02I_n$  为正常，两者都大于为异常；交流电压相对误差不大于 2.5%或绝对误差不大于  $0.002U_n$  为正常，两者都大于为异常；误差阈值可设置。当无同源采样时，不预判只记录。

d) 定值状态：召唤保护运行区定值，与预先设置的定值比较，完全一致时，预判结果为正常，否则，预判结果为异常。

2) 智能录波器传动控制安全防误

智能录波器远方不停电传动控制操作应流程化，人机界面操作简单，以确保智能录波器安全传动控制。智能录波器控制关键防误逻辑如下所述。

a) 遥控“不停电传动使能”成功, 保护使能状态置 1 后, 开放“不停电传动”控制权限进行遥控。

b) 遥控需逐一通过操作人和监护人身份验证, 才能下发预选命令, 预选成功后才能下发执行命令。

### 2.3 主站远方多重安全防护

主站是远方不停电检验的实施方, 发起远方不停电传动操作, 属于系统的指挥中心。主站实时监测继电保护运行状态, 逐一执行传动使能控制和传动跳闸控制, 其肩负第三级远方控制安全职责。

#### 1) 主站传动预判条件防误

主站判断继电保护满足所有传动预判条件, 开放远方不停电传动控制操作权限, 否则闭锁传动控制操作权限, 如表 3 所示。

表 3 主站传动预判条件

Table 3 Transmission pre-judgment conditions of master station

预判条件	闭锁传动	允许传动
保护模型状态	异常	不存在
保护通信状态	中断	闭锁传动
智能录波器预判条件状态	异常	条件
两次传动间隔时间	小于 1 min	

a) 保护模型状态: 主站实时监测保护模型和主站数据库的一致性, 是否有保护模型异常告警。模型无异常时预判结果为正常, 否则, 预判结果为异常。

b) 保护通信状态: 主站实时监测智能录波器上送的智能录波器与保护通信状态(正常或中断)。

c) 智能录波器预判条件状态: 主站获取智能录波器预判条件结果, 智能录波器预判条件结果无异常时, 预判结果为正常, 否则, 预判结果为异常。

#### 2) 主站传动控制安全防护

主站远方不停电传动控制操作应流程化, 人机界面操作简单, 以确保主站安全传动控制。主站控制关键防误逻辑和智能录波器一致。

## 3 系统核心功能设计

### 3.1 跳合闸回路监视预警

跳合闸回路监测通过分析断路器跳合闸回路在异常发生前后的电流变化情况, 达到对跳合闸回路实时监测的目的<sup>[21]</sup>。智能录波器通过实时监视诊断继电保护的跳合闸回路信号, 检验继电保护动作行为和跳合闸回路正确性, 是系统智能检验的重要技术要求及评价指标。

智能录波器智能诊断跳合闸回路信号是否符合预设规则, 当采集的跳合闸回路信号与预设信号完全一致, 无缺漏或错误信号时, 诊断跳合闸回路检验结果为正常, 否则, 诊断为异常。检验结果异常

时, 根据采集的信号分析跳合闸过程并判断异常原因, 定位跳合闸回路异常位置。

220 kV 及以上线路保护单相远方不停电传动跳合闸回路逻辑如图 3 所示。

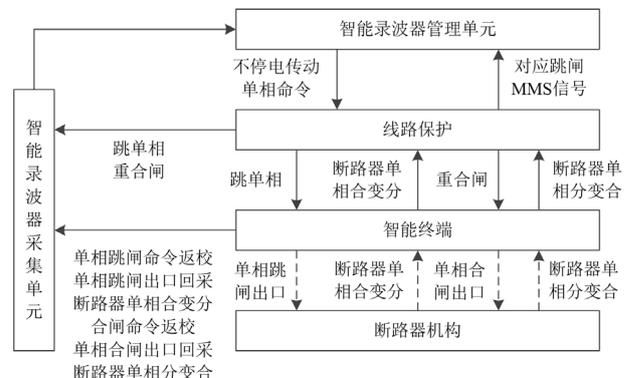


图 3 线路保护单相远方不停电传动跳合闸回路逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of the trip and close circuit of single phase remote power-on transmission of line relay protection

保护不停电传动跳合闸回路信号如表 4 所示。

表 4 继电保护不停电传动跳合闸回路信号

Table 4 Trip and close circuit signal of power-on transmission of relay protection

信号名称	变电站类型	采集设备
继电保护分相或三相跳闸信号		
智能终端收到保护单跳或三跳信号		
智能终端分相或三相跳闸出口回采信号	智能	采集
智能终端断路器分相或三相位置分信号	变电站	单元
继电保护重合闸出口信号		
智能终端分相或三相合闸出口回采信号		
智能终端断路器分相或三相位置合信号		
继电保护分相或三相传动出口信号		
继电保护分相或三相跳闸位置 TWJ 合信号	常规	管理
继电保护重合闸出口信号	变电站	单元
继电保护分相或三相跳闸位置 TWJ 分信号		

由表 4 可知, 智能变电站跳合闸回路 GOOSE 信号和常规变电站跳合闸回路 MMS 信号比较, 前者反映的回路节点更多更细、更能形象反映回路操作的过程, 更有利于精准定位回路异常位置。

### 3.2 开关机械特性监视预警

开关机械特性是判断断路器合格与否的一个重要指标, 用于评估断路器是否存在隐患, 能否继续服役。断路器的开关机械特性可以停电检修时使用专用设备或在线监测技术<sup>[22-23]</sup>进行监测。

智能录波器通过继电保护远方不停电检验, 采用初步评估算法处理保护跳合闸回路信号, 采用精准评估算法处理采集单元录波数据, 分别初步评估和精准评估开关机械特性, 提高智能录波器智能运

维技术水平,减少断路器停电检修频次,实现变电站一次运维的降本增效。

开关机械特性初步评估算法库需按间隔初始化设置,包括跳闸出口信号关联点、合闸出口信号关联点、断路器位置信号关联点、初步开关分反应时间阈值  $T_{os1}$  以及初步开关合反应时间阈值  $T_{cs1}$ 。

开关机械特性初步评估算法时序如图 4 所示。

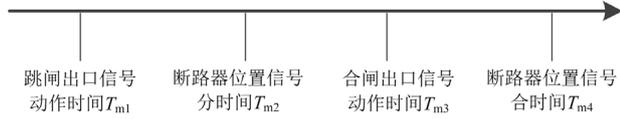


图 4 初步评估算法时序图

Fig. 4 Sequential diagram of preliminary evaluation algorithm

根据图 4,初步评估算法的执行步骤如下所述。

1) 计算初步开关分反应时间  $T_{o1}$

$$T_{o1} = T_{m2} - T_{m1} \quad (1)$$

2) 计算初步开关合反应时间  $T_{c1}$

$$T_{c1} = T_{m4} - T_{m3} \quad (2)$$

3) 比较  $T_{o1}$  与  $T_{os1}$  的大小,当  $T_{o1} < T_{os1}$  时,初步评估断路器的开关机械特性正常,否则,评估异常。

4) 比较  $T_{c1}$  与  $T_{cs1}$  的大小,当  $T_{c1} < T_{cs1}$  时,初步评估断路器的开关机械特性正常,否则,评估异常。

开关机械特性精准评估算法库需按间隔初始化设置,包括采集单元的断路器位置通道号、采集单元的相电流通道号、精准开关分反应时间阈值  $T_{os2}$  以及精准开关合反应时间阈值  $T_{cs2}$ 。

开关机械特性精准评估算法时序如图 5 所示。

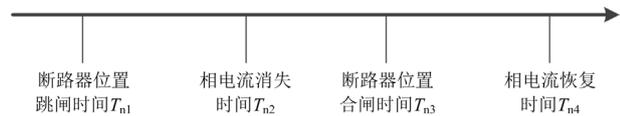


图 5 精准评估算法逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of accurate evaluation algorithm

根据图 5,精准评估算法的执行步骤如下所述。

1) 计算断路器位置跳闸时间  $T_{n1}$ ,根据动作相别计算断路器位置通道录波数据的值由 1 变成 0 的时间。

2) 计算相电流消失时间  $T_{n2}$ ,根据动作相别计算相电流通道录波数据的电流有效值由大于死区值变为小于死区值的时间;断路器三相跳合闸设计时,计算三相电流消失时间并取最大值,如式(3)所示。

$$T_{n2} = \max \{T_{n2a}, T_{n2b}, T_{n2c}\} \quad (3)$$

式中:  $T_{n2a}$  为 A 相电流消失时间;  $T_{n2b}$  为 B 相电流消失时间;  $T_{n2c}$  为 C 相电流消失时间。

3) 计算断路器位置合闸时间  $T_{n3}$ ,根据动作相别计算断路器位置通道录波数据的值由 0 变成 1 的时间。

4) 计算相电流恢复时间  $T_{n4}$ ,根据动作相别计算相电流通道录波数据的电流有效值由小于死区值变为大于死区值的时间;断路器三相跳合闸设计时,计算三相电流恢复时间并取最大值,如式(4)所示。

$$T_{n4} = \max \{T_{n4a}, T_{n4b}, T_{n4c}\} \quad (4)$$

式中:  $T_{n4a}$  为 A 相电流恢复时间;  $T_{n4b}$  为 B 相电流恢复时间;  $T_{n4c}$  为 C 相电流恢复时间。

5) 计算精准开关分反应时间  $T_{o2}$

$$T_{o2} = T_{n2} - T_{n1} \quad (5)$$

6) 计算精准开关合反应时间  $T_{c2}$

$$T_{c2} = T_{n4} - T_{n3} \quad (6)$$

7) 比较  $T_{o2}$  与  $T_{os2}$  的大小,当  $T_{o2} < T_{os2}$  时,精准评估断路器的开关机械特性正常,否则,评估异常。

8) 比较  $T_{c2}$  与  $T_{cs2}$  的大小,当  $T_{c2} < T_{cs2}$  时,精准评估断路器的开关机械特性正常,否则,评估异常。

需要说明的是,初步评估算法库的  $T_{os1}$  和  $T_{cs1}$  需大于精准评估算法库的  $T_{os2}$  和  $T_{cs2}$ ;在初步评估正常时,需继续执行精准评估算法。

### 3.3 主子站一体化功能

主站和作为子站的智能录波器可复用的功能包括传动条件预判和远方不停电检验结果诊断。两个功能都需要工程配置实现,智能录波器已具备相应的基础,主站并不具备。主站实现开发工作量较大,以及面向辖域的所有变电站将面临巨大的配置工作。此外,多个主站接入同一个变电站时,多个主站都需要耗费重复的工程配置工作。

在智能录波器必须实现上述两个功能,且已具备一定基础和配置工作量可控的前提下,基于遵循资源合理分配和系统工程应用不增加经济成本的原则,采取轻主站重子站的主子站一体化功能策略。主站无需完整实现上述两个功能,由智能录波器协助实现,主站直接从智能录波器获取相应结果。

智能录波器需要自身建模支撑主站从其获取传动条件预判结果和远方不停电检验结果。

1) 传动条件预判建模

模型设计“不停电传动预判遥控”控制,采用直控建模,实例化填写逻辑节点“prefix”属性为变电站 SCD 模型内继电保护的“IED Name”,用于自动配置关联保护装置,实现主站发起传动预判遥控命令,通知智能录波器启动实时预判流程。

模型设计“不停电传动预判完成”信号,在智

能录波器生成不停电传动预判信息文件后, 发送信号给主站, 通知主站召唤信息文件获取预判结果。

### 2) 远方不停电检验建模

模型设计“远方不停电传动完成”信号, 在智能录波器生成远方不停电传动定检报告后, 发送信号给主站, 通知主站召唤报告文件获取检验结果。

总之, 系统执行一次远方不停电传动控制流程包括传动预判控制阶段、传动使能控制阶段、传动跳闸控制阶段、传动跳闸报告阶段等 4 个阶段。主子站一体化信息流如图 6 所示。

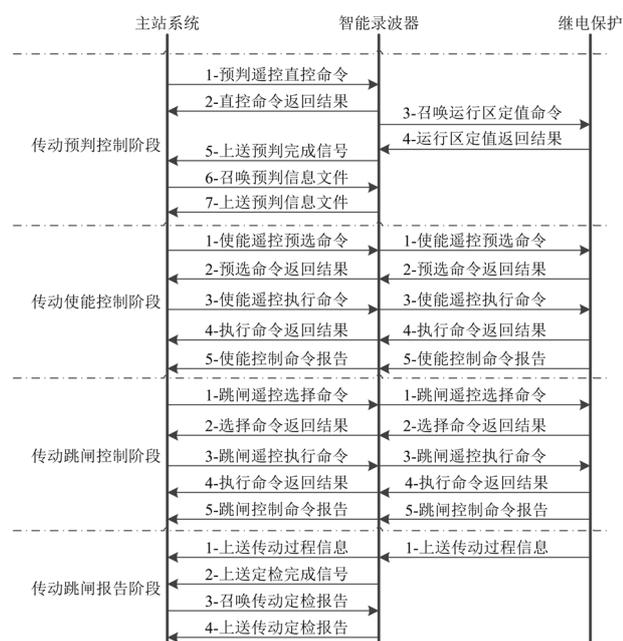


图 6 主子站一体化信息流

Fig. 6 Integrated information flow of master and slave station

## 4 工程化应用

本文为了打造一套安全高效的继电保护远方不停电检验系统, 实现工程化应用目标, 遵循的主要原则如下所述。

### 1) 应用范围

适用新建、改扩建智能站和常规站, 主要应用于 220 kV 及以下电压等级具备重合闸的线路保护。

### 2) 远方范围

支持在调度端主站和分站, 也支持在厂站端智能录波器进行继电保护远方不停电检修操作。

### 3) 智能检验

系统满足操作安全性、操作流程化、快速报告检验结果等特征, 摆脱人工分析检验信号的繁琐工作, 提高工作效率和准确性, 实现智能检验。

### 4) 网络安全

远方不停电传动操作属于远方控制范畴, 系统在通信层面遵循网络通信安全要求, 采用白名单等网络安全策略, 拦截潜在的网络攻击风险。

### 5) 制定规范

为了推动系统及技术在南方电网全网工程化应用, 制定了南方电网公司级的继电保护远方不停电检验技术规范, 并积极申报中电联的团体标准。

智能录波器传动界面布局设计如图 7 所示。



图 7 智能录波器传动界面

Fig. 7 Transmission UI of intelligent recorder

系统已在广东电网佛山局的变电站率先进行了工程化应用。为了验证系统的成熟度及技术可靠性与先进性, 在主站端和厂站端对国内主流厂家 10~220 kV 各电压等级线路保护进行了上百次远方不停电传动检验试验。工程应用效果如表 5 所示。

表 5 工程应用效果

Table 5 Engineering application effect

比对项目	系统效果	传统效果
检验方式	不停电智能检验	停电人工检验
检验位置	调度端主站或 厂站端智能录波器	继电保护
检验时间	不超过 30 min/台	最少 1 天/台
检验成本	极低人工成本	较大人工成本+ 差旅成本+停电成本

由表 5 可知, 系统提高了检验效率和节省了检验成本, 为进一步工程化应用提供了有力依据。

## 5 结论

本文架构的继电保护远方不停电检验系统覆盖智能站和常规站, 包括指挥中心的调度主站、控制及情报中心的智能录波器和运维对象的继电保护。

系统聚焦于安全, 采取三级多重安全防误机制, 确保各级执行检验操作满足安全条件, 各级守好各自检验操作的安全职责, 杜绝传动造成停电事故。

系统通过跳合闸回路监视预警、开关机械特性

监视预警、主子站一体化功能等核心功能实现智能检验,为继电保护远方不停电检验提供高效精准的系统技术支撑,实现电力系统运维的降本增效。

本文为了达到工程化应用目标,明确了制定规范等主要遵循原则。通过工程化应用情况及效果,验证了系统的成熟度及技术可靠性与先进性,改变了继电保护传统人工停电检验模式,证明了系统及技术具有实用化价值和工程化前景。

### 参考文献

- [1] 汪际峰,刘之尧,张弛,等. 继电保护检验新技术探索[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 1-6.  
WANG Jifeng, LIU Zhiyao, ZHANG Chi, et al. Exploration of new technology for relay protection testing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 1-6.
- [2] 刘琨,黄明辉,李一泉,等. 智能变电站继电保护在线运检方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 58-65.  
LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 58-65.
- [3] 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.
- [4] CHEN Fan, NI Yimin, ZHAO Guoqing, et al. Research of new method about the test of secondary system for refurbishment and extension of smart substation[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 1498-1502.
- [5] HUANG Q, JING S, LI J, et al. Smart substation: state of the art and future development[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1098-1105.
- [6] 郝少华,李勇,张铁峰,等. 新一代智能变电站通信网络及管理系统方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 148-154.  
HAO Shaohua, LI Yong, ZHANG Tiefeng, et al. Scheme of communication network and network management system for new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 148-154.
- [7] 许家焰,宋福海,陆榛. 智能站二次检修安措可视化及一键式操作系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 136-144.  
XU Jiayan, SONG Fuhai, LU Zhen. Design and realization of the secondary maintenance safety measures visualization and one-touch operation system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 136-144.
- [8] 胡绍谦,李力,朱晓彤,等. 基于检修态切换的智能变电站保护设备检修辅助安全措施[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 242-247.  
HU Shaoqian, LI Li, ZHU Xiaotong, et al. Auxiliary safety measures of protection relay in smart substation based on switching of maintenance states[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 242-247.
- [9] WU J, LIU M, ZHENG Y, et al. Research on automatic generation technology for secondary equipment of security measures of smart substation[C] // 2018 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), May 29-June 1, 2018, Kajang, Malaysia: 223-227.
- [10] 罗智恺. 智能变电站二次专业安全措施研究[J]. 电工技术, 2019(15): 144-146.  
LUO Zhikai. Study on secondary safety measures of smart substation[J]. Electric Engineering, 2019(15): 144-146.
- [11] 黄文英,郭炎福,宋福海. 图论在智能变电站二次安全措施中的应用探索[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 291-300.  
HUANG Wenyong, GUO Yanfu, SONG Fuhai. Application of graph theory in safety measures of secondary system in smart substation[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 291-300.
- [12] 车兵,许家焰,徐晓春,等. 智能变电站二次检修安措防误技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 150-156.  
CHE Bing, XU Jiayan, XU Xiaochun, et al. Research of secondary maintenance safety measures error proofing technology in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 150-156.
- [13] ZHANG H, ZHENG Y, DU Q, et al. Summary of research on error prevention technology of secondary safety measures in smart substations[C] // 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), May 29-31, 2020, Chengdu, China: 684-690.
- [14] 罗凌璐,彭奇,王德辉,等. 智能变电站过程层网络监控方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 151-156.  
LUO Linglu, PENG Qi, WANG Dehui, et al. Monitoring method of process level network in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 151-156.
- [15] 池招荣,覃显南,樊云鹏,等. 智能变电站二次回路在线监测与故障诊断技术研究与应用[J]. 电工技术, 2022(14): 164-166.

- CHI Zhaorong, QIN Xiannan, FAN Yunpeng, et al. Research and application of on-line monitoring and fault diagnosis technology of secondary circuit in intelligent substation[J]. Electric Engineering, 2022(14): 164-166.
- [16] 周红阳, 黄佳胤, 张弛, 等. 基于 Petri 网的智能变电站 GOOSE 回路故障诊断[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 49-56.
- ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, ZHANG Chi, et al. Petri net based fault diagnosis for GOOSE circuits of smart substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 49-56.
- [17] 董怀普, 王位杰, 刘文彪, 等. 基于深度搜索的二次虚实回路融合故障诊断技术[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 219-223.
- DONG Huaipu, WANG Weijie, LIU Wenbiao, et al. Fault diagnosis technology of secondary virtual loop and physical fiber loop fusion based on depth first search[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 219-223.
- [18] 王同文, 刘宏君, 邵庆祝, 等. 智能变电站二次回路智能预警及故障诊断技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 59-63, 98.
- WANG Tongwen, LIU Hongjun, SHAO Qingzhu, et al. Research on intelligent early warning and fault diagnosis technology for the secondary loop of smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 59-63, 98.
- [19] 孙宇嫣, 蔡泽祥, 郭采珊, 等. 基于深度学习的智能变电站通信网络故障诊断与定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4306-4314.
- SUN Yuyan, CAI Zexiang, GUO Caishan, et al. Fault diagnosis and positioning for communication network in intelligent substation based on deep learning[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4306-4314.
- [20] 张宸滔, 郑永康, 卢继平, 等. 基于图神经网络的智能变电站二次回路故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 81-90.
- ZHANG Chentao, ZHENG Yongkang, LU Jiping, et al. Fault location of secondary circuits in a smart substation based on a graph neural network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 81-90.
- [21] 董中和, 宋晓航, 唐昱恒, 等. 智能变电站跳合闸监测系统研究与应用[J]. 电气技术, 2021, 22(1): 39-46.
- DONG Zhonghe, SONG Xiaohang, TANG Yuheng, et al. Research and application of the on-line monitoring system for tripping and closing circuit in intelligent substation[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(1): 39-46.
- [22] 谭佳明, 陈玲玲, 蒋佳成, 等. 交流中压真空断路器机械特性在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 69-76.
- TAN Jiaming, CHEN Lingling, JIANG Jiacheng, et al. Development of on-line monitoring device for mechanical characteristics of AC medium voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 69-76.
- [23] 刘东超, 陈志刚, 崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 60-67.
- LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei. Online monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 60-67.

收稿日期: 2022-11-05; 修回日期: 2023-01-26

作者简介:

黄国平(1972—), 男, 学士, 高级工程师(教授级), 主要研究方向为继电保护自动化和电力系统智能技术; E-mail: huangguoping1972@163.com

许家焰(1976—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为变电站自动化和二次智能运维技术; E-mail: xujiayan@sf-auto.com

陈锦荣(1975—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为调度自动化和继电保护自动化。E-mail: 13702563456@163.com

(编辑 姜新丽)