

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210285

# 智能变电站改扩建镜像调试技术研究及应用

周柯<sup>1</sup>, 王晓明<sup>1</sup>, 巫聪云<sup>2</sup>, 李肖博<sup>3</sup>

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 广西电网有限责任公司, 广西 南宁 530023;  
3. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510670)

**摘要:** 针对智能变电站改扩建现场调试工作量大、一次设备配合停电次数及时间明显增加的问题, 提出一种智能变电站改扩建镜像调试技术。基于改扩建域划分及改扩建前后子CRC(循环冗余校验码)的一致性比对, 自动识别改扩建的测试边界。通过测试边界自动识别和虚回路镜像模拟传动验证了各设备之间虚回路连接的正确性, 基于制造报文规范MMS报文模型实现技改、扩建设备更换时智能变电站继电保护闭环自动测试。并基于改扩建前后心跳报文比对, 确保运行间隔改扩建前后报文模型参数正确。设计了智能变电站检修改扩建镜像调试系统, 以某220 kV变电站改扩建测试为例验证所提技术的有效性。

**关键词:** 镜像调试; 子CRC一致性比对; 镜像模拟传动; 闭环测试; 心跳报文比对; 配置下装校验

## Research and application of mirroring debugging technology in reconstruction and expansion of an intelligent substation

ZHOU Ke<sup>1</sup>, WANG Xiaoming<sup>1</sup>, WU Congyun<sup>2</sup>, LI Xiaobo<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 3. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

**Abstract:** There is a large workload involved in on-site commissioning of reconstruction and expansion of a smart substation. The numbers of pieces of primary and secondary equipment have increased significantly, as has the time involved. This paper proposes a mirroring debugging technology for smart substation reconstruction and expansion, based on the division of reconstruction and expansion domains and the consistency of sub-CRCs before and after reconstruction. It can automatically identify the test boundary of the reconstruction and expansion based on the division of the reconstruction domain and a consistency comparison of the sub-CRC before and after the reconstruction. It verifies the correctness of the virtual circuit connection between devices through automatic identification of test boundaries and virtual circuit mirroring simulation transmission. Based on an MMS model, the relay protection equipment of an intelligent substation realizes closed-loop automatic test during technical transformation and replacement of reconstruction equipment. It guarantees the correctness of the message model parameters before and after the reconstruction and expansion of the operating interval by comparing the heartbeat messages before and after the reconstruction. This paper also designs a mirroring debugging system for the inspection, modification and expansion of smart substations, and takes a 220 kV substation reconstruction and expansion test as an example to verify the effectiveness of the proposed technology.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation (No. GXKJXM20190610).

**Key words:** mirror debugging; sub-CRC consistency comparison; mirror simulation drive; closed loop test; heartbeat message comparison; configuration download verification

## 0 引言

2011年我国智能变电站进入全面建设阶段, 截

止目前我国新建及改造在运智能变电站6 000多座。前期投运的变电站经过一段时间的运行, 容量不足、设备缺陷等问题逐渐暴露出来, 因此变电站检修改扩建工作逐渐增多<sup>[1-3]</sup>。智能变电站中大部分二次回路由电缆物理回路变成光纤虚回路, 检修、改扩建

基金项目: 中国南方电网公司科技项目(GXKJXM20190610)

涉及配置变更或新增间隔时,直接或间接关联到母线保护、其他运行间隔设备等,需要对智能变电站系统配置文件 SCD 反复论证和校验<sup>[4-5]</sup>,需要确定现场停电传动调试范围,单纯的人工或软件校验局限于模型及通信参数校核,改扩建、检修是否影响运行间隔,配置下装是否正确一致,关联运行间隔是否需要停电传动等,缺乏有效的技术验证和支撑系统,目前大多采用多间隔陪停或轮停,作业时间长,现场效率低,不利于电网安全稳定运行。

为解决智能变电站改扩建相关技术问题,文献[6]分析了智能变电站不停电扩建的关键技术;文献[7-8]提出在改扩建工程中对 SCD 解耦设计,保证改扩建与投运设备的物理隔离;文献[9]以智能变电站 SCD 文件管控为坐标,基于物联网和移动互联网技术提升智能变电站管控力度和运检作业穿透力;文献[10-13]研究了智能变电站二次设备实验室调试技术。针对智能变电站改扩建全过程调试缺乏系统研究。

针对以上问题,本文提出一种智能变电站改扩建镜像调试方法,介绍了智能变电站检修、改扩建镜像调试的关键技术,设计开发了智能变电站检修、改扩建镜像调试系统,并介绍了系统的实际应用效果。

## 1 智能变电站改扩建镜像调试方法

在智能变电站改扩建调试过程中,不仅需要验证改扩建设备相关二次回路正确、功能正常,还需要验证改扩建配置变更是否影响运行设备,即在运设备相关二次回路在改扩建配置变更过程中是否变动,需要对在运设备协同开展二次回路及通信参数调试验证,如母线保护需要与新增间隔、在运间隔分别进行二次回路联动试验,确认母差保护、线路保护、线路智能终端在电网故障下能正确动作。

本文搭建虚拟设备和物理设备混合的改扩建工程调试验证环境,基于与现场一致的 SCD 文件,将改扩建关联的在运设备相关二次回路、网络环境镜像至验证环境,实现与变电站二次回路一致、网络环境一致的调试场景,基于上述场景对待测智能电子设备 IED 进行全面调试,包括基于子 CRC 一致性比对、镜像模拟传动、基于 MMS 模型的闭环测试、改扩建前后心跳报文比对、配置下装校验等关键技术实现智能变电站改扩建镜像调试,简化现场调试工作,缩短现场调试时间,提升调试质量和效率,促进改扩建工程调试流程标准化。

智能变电站改扩建镜像调试方法如图 1 所示,包含以下步骤:

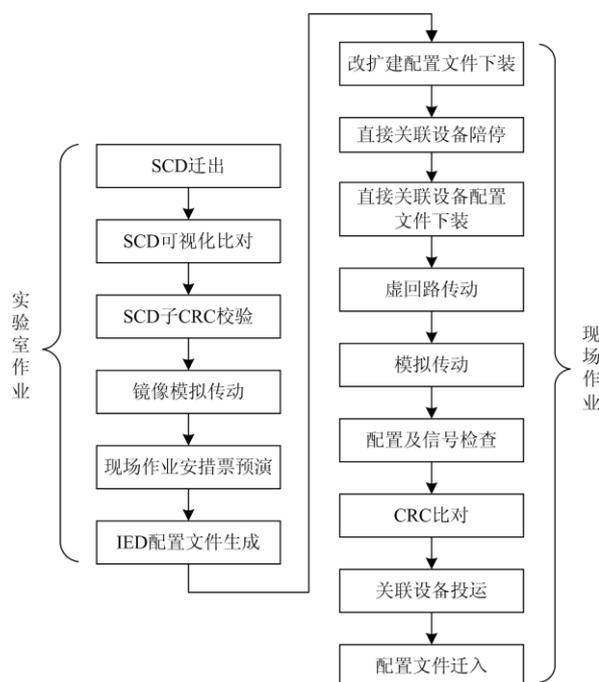


图 1 智能变电站改扩建镜像调试方法

Fig. 1 Mirroring debugging method for intelligent substation reconstruction and expansion

### (1) 实验室作业

1) 改扩建工作准备阶段,从智能变电站配置文件运行管控系统签出与变电站运行一致的 SCD 文件及通过专业检测的改扩建设备智能电子设备能力描述 ICD 文件。

2) 可视化比对改扩建前后 SCD 文件差异,确定修改后 SCD 文件的变动范围。

3) 对检修改扩建直接关联 IED 所包含每一 IED 的计算其子 CRC,比对改扩建前后两个 SCD 文件的 IED 的子 CRC,确认直接关联设备与间接关联设备之间的虚回路是否发生变化。

4) 采用镜像调试系统的两台虚拟机,导入改扩建前后两个 SCD 文件,模拟改扩建设备、直接关联设备、间接关联设备进行传动,验证各设备之间虚回路连接的正确性。

5) 对即将开展的现场作业安全措施在镜像调试系统上进行离线预演,确保改扩建直接关联设备在改扩建过程中被安全隔离。

6) 对于九统一保护改扩建,从 SCD 文件中生成继电保护和安全自动装置需要下装的回路实例文件 CCD、智能电子设备实例化配置文件 CID,并确认 CCD 的 CRC 与 SCD 中 CRC 的一致性。对于非九统一保护改扩建,从 SCD 文件中生成继电保护和安全自动装置需要下装的厂家私有格式配置文件及

CID 文件。通过文本查看方式，人工比对私有格式配置文件与 SCD 中虚回路的一致性。

(2) 现场作业

1) 对于九统一保护改扩建，下装改扩建设备配置文件，比对改扩建设备 SCD 文件 CRC 与 CCD 文件 CRC 的一致性，开展改扩建设备功能测试及虚回路传动；对于非九统一保护改扩建，下装改扩建设备配置文件，并将过程层私有格式配置文件导出，通过文本比对确保下装前后文件的一致性，开展改扩建设备功能测试及虚回路传动。

2) 退出直接关联设备，或停运直接关联设备对应的一次设备。

3) 对于九统一保护改扩建，下装直接关联设备的配置文件，比对直接关联设备 SCD 文件 CRC 与 CCD 文件 CRC 的一致性；对于非九统一保护改扩建，下装直接关联设备的配置文件，并将过程层私有格式配置文件导出，利用厂家私有格式配置文件比对工具比较改扩建前后的私有格式配置文件，确认直接关联设备与间接关联设备之间的虚回路未发生变化。

4) 开展改扩建设备与直接关联设备之间的虚回路传动。

5) 利用虚拟移动终端或光数字继电保护测试仪模拟间接关联设备，与直接关联设备进行模拟传动。

6) 检查直接关联设备、间接关联设备无系统配置错误或其他告警信号。

7) 比对间接关联设备过程层 CRC 与 SCD 文件对应间隔的 CRC 是否一致。

8) 投入直接关联设备或投运直接关联设备对应的一次设备。

9) 改扩建后 SCD 文件及配置文件一致性保证书签字确认，并签入智能变电站配置文件运行管控系统。

## 2 智能变电站改扩建镜像调试关键技术

根据改扩建装置虚回路变动情况及影响范围，将改扩建工程相关二次设备分为改扩建设备、直接关联设备、间接关联设备三类。其中改扩建设备为智能变电站改扩建工程中，改造间隔或扩建间隔的继电保护、安全自动装置、测控等二次 IED；直接关联设备为与改扩建设备有直接虚回路连接关系、虚回路有变化且需重新下装配置文件的继电保护和安安全自动装置、测控等二次 IED；间接关联设备为与直接关联设备有虚回路连接关系、无需重新下装配置文件的继电保护和安安全自动装置、测控等二

次 IED。基于设备类型划分确定测试边界开展镜像调试。

### 2.1 子 CRC 一致性比对

智能变电站 SCD 文件中包含了全站 IED 的实例配置和通信参数、虚回路配置信息，改扩建工作需要修改相关配置文件<sup>[14-15]</sup>，通过对更改配置的 IED 及相关运行的虚回路进行验证，可以确定改扩建测试边界，减少二次设备的投退操作<sup>[16-18]</sup>。当前多通过 SCD 可视化校验工具比对改扩建前后的 SCD 文件的虚回路的差异性，但无法确定改变是否对运行装置产生影响，无法确定改扩建测试范围，若对所有虚回路信息发生改变的 IED 进行测试，往往会扩大二次设备调试范围。

本文将循环冗余校验应用到智能配电站改扩建测试边界确定，对智能变电站改扩建前后的 SCD 文件，根据 IED 节点下过程层访问点 G 计算该 IED 的 GOOSE 接收子 CRC 码 GRCRC<sub>i</sub> 与 GOOSE 发送子 CRC 码 GTCRC<sub>i</sub>，根据访问点 M 计算该 IED 的 SV 接收子 CRC 码 SRCRC<sub>i</sub> 与 SV 发送子 CRC 码 STCRC<sub>i</sub>，结合子 CRC 码一致性校验，自动识别改扩建测试边界。

如图 2 所示，左侧 IED<sub>1</sub>~IED<sub>m</sub> 改扩建新增 IED，中间 IED 为直接关联 IED，右侧 IED<sub>m+1</sub>~IED<sub>n</sub> 为间隔关联 IED。

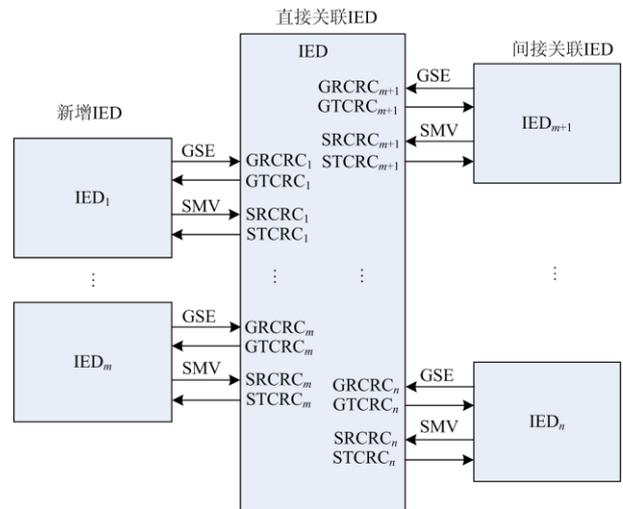


图 2 子 CRC 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sub CRC

计算改扩建前后 SCD 文件中直接关联 IED 与间接关联 IED 之间的 GOOSE 发送、GOOSE 接收、SV 发送、SV 接收的子 CRC 码，依据改扩建前后子 CRC 的变化情况确定改扩建测试边界。

比较改扩建前后 SCD 文件中直接关联 IED 与间接关联 IED 之间的子 CRC 之和:  $\sum_{i=m+1}^n (\text{GRCRC}_i + \text{GTCRC}_i + \text{SRCRC}_i + \text{STCRC}_i)$  的计算值是否一致, 如果一致测试边界为:  $\text{GRCRC}_{1-m}$  and  $\text{GTCRC}_{1-m}$  and  $\text{SRCRC}_{1-m}$  and  $\text{STCRC}_{1-m}$  所代表的虚回路。

如果不一致, 分别比对改扩建前后 SCD 文件中子 CRC 码  $\text{GRCRC}_{m+1} \sim \text{GRCRC}_n$ 、 $\text{GTCRC}_{m+1} \sim \text{GTCRC}_n$ 、 $\text{SRCRC}_{m+1} \sim \text{SRCRC}_n$ 、 $\text{STCRC}_{m+1} \sim \text{STCRC}_n$ 。子 CRC 不一致的虚回路成为测试边界, 测试边界为: ( $\text{GRCRC}_{1-m}$  and  $\text{GTCRC}_{1-m}$  and  $\text{SRCRC}_{1-m}$  and  $\text{STCRC}_{1-m}$ ) 所代表的虚回路, 以及改扩建前后不一致的子 CRC ( $\text{GRCRC}_j$  or  $\text{GTCRC}_j$  or  $\text{SRCRC}_j$  or  $\text{STCRC}_j$ ) 所代表的虚回路。

## 2.2 镜像模拟传动

采用镜像虚拟机模拟改扩建设备、直接关联设备、间接关联设备进行传动测试, 验证各设备之间虚回路的正确性, 校验内容如表 1 所示。

表 1 校验内容

Table 1 Verification content

校验项目	子项	提示类别
虚连接关系	一发多收	预警
	多发一收	错误
	错连	错误
	漏连	错误
通信参数	设备数据集	错误
	通道数目	错误
	收发报文类型	错误
	APPID	错误

改扩建设备与直接关联设备传动测试示意图如图 3 所示。虚拟机 A 虚拟改扩建设备, 虚拟机 B 虚拟改扩建直接关联设备, 虚拟机 A、虚拟机 B 均导入改扩建后 SCD 文件, 进行虚回路模拟传动, 验证改扩建设备与直接关联设备之间虚回路的正确性。

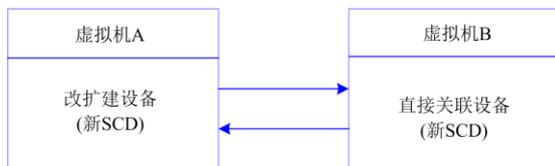


图 3 改扩建设备与直接关联设备传动测试示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transmission test of rebuilt and expanded equipment and directly associated equipment

直接关联设备与间接关联设备传动测试示意图如图 4 所示。图 4(a)中虚拟机 A 虚拟直接关联设备、虚拟机虚拟间接关联设备, 虚拟机 A、虚拟机 B 均

导入改扩建后 SCD 文件, 进行虚回路模拟传动; 图 4(b)中虚拟机 A 虚拟直接关联设备、虚拟机虚拟间接关联设备, 虚拟机 A 导入改扩建后 SCD 文件, 虚拟机 B 导入改扩建前的 SCD 文件, 进行虚回路模拟传动。对比两种测试模式下的测试结果验证改扩建后运行间隔二次回路是否变更和正确。

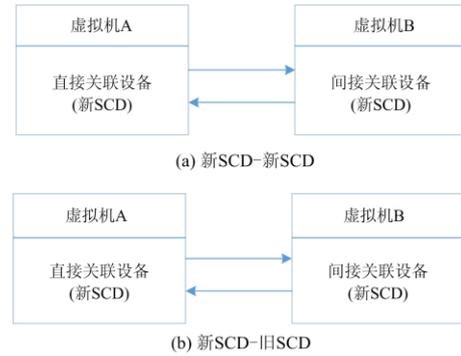


图 4 直接关联设备与间接关联设备传动测试示意图  
Fig. 4 Transmission test of directly associated equipment and indirect associated equipment

## 2.3 基于 MMS 模型的闭环测试

变电站定检时, 同类型继电保护检测内容基本一致, 按照保护类型, 基于继电保护定检单建立了不同类型继电保护的测试用例<sup>[19-22]</sup>。测试用例中每个测试项目包括故障施加量和对应的预期结果, 故障施加量包括测试参数和故障参数, 测试参数包括装置定值、压板状态和控制字信息; 故障参数包括测试时需要给待测装置加载的故障量及持续时间等; 预期结果包括保护出口信息、出口信息时间要求、保护动作报告以及遥信变位信息。基于测试用例模板化技术<sup>[22]</sup>, 可以定义测试流程、测试方法, 实现自动测试。

为实现智能变电站继电保护一键式闭环测试, 需将保护装置的定值、控制字、压板、MMS 信号映射到系统相应信号条目, 以实现测试时的信号交互<sup>[23]</sup>。采用人工依据设备信息描述文本配置方式, 效率低正确性难以保证, 不符合变电站智能运维发展的需求, 利用人工智能技术实现继电保护测试的自动配置, 可提升测试效率, 实现真正意义上的一键式闭环测试。

目前, 不同厂家的 IED 数据输出端口描述文本不一致, 尽管有相关规范进行约束, 但无法保证信息描述统一与文本语义无歧义, 难以实现自动配置。通过分析主流保护设备厂家的各类型保护设备 ICD 文件, 建立一个中间模型文件, 文件建立测试系统内部信息条目与主流厂家保护设备数据端口描述文

本之间的对应关系，并建模信息条目的关键字，如图 5 所示，KrtMatchMMS 为根目录，根目录下包含 matSetVals(定值)、matCtrlWrds(控制字)、matEnas(压板)、matMMsPhres(MMS 信号)四个数据集，SetVal 为某一定值条目，KrtMatchItems (name, uFlag,text) 为该定值下一条对应关系，其包括 name(系统内部描述)、uFlag(标识)、text(厂家描述文本或该条目关键字)。uFlag 主要用于标识关键字，取“0”表示描述文本包含该关键字，取“1”表示描述文本不包含该关键字。

测试前系统解析待测 IED 所有数据输出端口的描述信息，基于中间模板文件分类匹配到系统内部条目，完成模型映射，对匹配不成功的条目，支持手动补充，并自动将映射关系写入中间模型文件，完善中间模型文件。

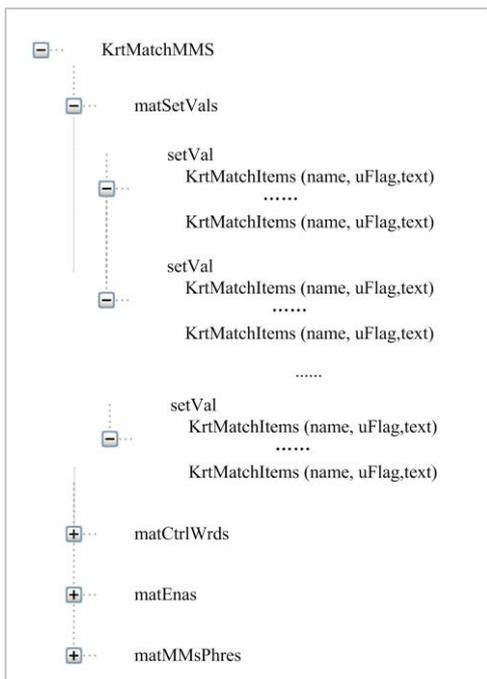


图 5 中间模板文件

Fig. 5 Intermediate template file

测试时自动根据测试人员提供的设备配置信息或型号，选定测试方案，与被测装置进行 MMS 信号交互，召唤并远程修改被测装置的压板、定值、控制字等信息，依据测试模板实现保护装置单体测试及跨间隔保护的整体测试。测试结果判断依据装置反馈信息和其他仪器返回信息，形成闭环性测试。

### 2.4 改扩建前后心跳报文比对

在改扩建直接关联设备配置下装前后，现场比对配置下装前后全部间隔心跳报文，进行模型参数校核，确保运行间隔改扩建后报文模型参数正确性。

在母线保护配置更新前，用虚拟移动终端抓取母线保护发出的 GOOSE 报文；更新母线保护配置后，再用虚拟移动终端抓取母线保护发出的 GOOSE 报文，用心跳报文检核模块比对分析报文。只有与时间相关的 GOOSE 报文信息、ST/SQ 值、指定变位的通道状态可能发生变化，保护通道数、通道类型、通信参数都不应发生变化。

此外，通过心跳报文校核可有效确保改扩建设备配置下装成功，间接关联设备的配置没有发生变化。

### 2.5 配置下装校验

针对改扩建设备及关联设备新的配置文件，提供两种方式校验改扩建设备下装后的配置的正确性。

方式一：读取改扩建及关联设备下装后的配置文件，与 SCD 文件进行模型、文本等一致性校验，校验通过，签署配置文件一致性保证书，并签入至智能变电站配置文件运行管控系统。

方式二：读取改扩建及关联设备下装后的配置文件，解析配置文件获取设备外部 SV、GOOSE 报文信息，基于获取的设备外部 SV、GOOSE 报文信息利用虚拟移动终端模拟运行间隔发送/接收 SV、GOOSE 信号对改扩建设备及关联设备进行信号、功能测试，现场校核配置文件及下装的正确性，校验通过，签署配置文件一致性保证书，并签入至智能变电站配置文件运行管控系统。

## 3 智能变电站检修改扩建镜像调试系统设计

智能变电站检修改扩建镜像调试系统架构如图 6 所示，以智能变电站镜像虚拟机为核心，同时与 SCD 管控系统、保护定值管理系统互联。镜像调试系统部署在安全 III 区或 IV 区，提供配置文件签入签出模块，可通过外网配置 IP 地址访问 SCD 管控系统，可以在线迁出与实际运行变电站一致的 SCD 文件、CID 文件、CCD 文件以及厂家私有下装 Txt、ini 文件，采用与变电站一致的配置文件在镜像调试系统中进行测试，实现配置文件的镜像；改扩建工作完成后，将改扩建修改后的 SCD 文件、配置文件一致性保证书签入 SCD 文件管控系统。镜像调试系统与保护定值管理系统互联，实现保护定值远程下载及保护装置的一键式初始化定值下装。

镜像调试系统由时间同步装置、虚拟移动终端、镜像虚拟机、SV/GOOSE 交换机、MMS 交换机、网络模拟测试装置组成。时间同步装置用于测试系统内所有装置对时；镜像虚拟机用于构建在线运行环境，模拟与改扩建间隔相关联设备的通信交互；SV/GOOSE 交换机、MMS 交换机实现组网通信及



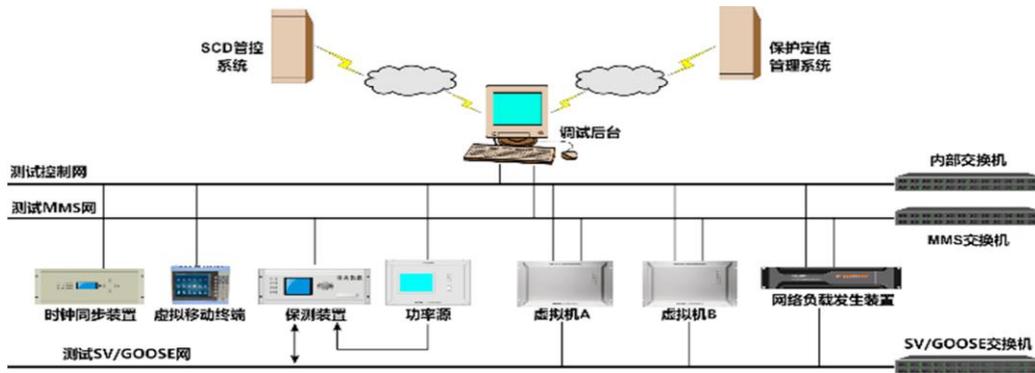


图6 智能变电站改扩建镜像调试系统架构

Fig. 6 Mirroring debugging system architecture for intelligent substation reconstruction and expansion

网络环境仿真；网络负载发生装置对待测装置进行网络压力测试，也支持对就地化保护环网和专网进行测试；虚拟移动终端用于装置心跳报文校核。

基于提出智能变电站改扩建镜像调试方法设计系统功能，如图7所示，主要包含SCD下载、SCD可视化/子CRC校核、二次系统虚拟测试、合并单元测试、智能终端测试、测控测试、故障回放、整组仿真、网络性能测试、CCD一致性校验、SCD上传功能模块。

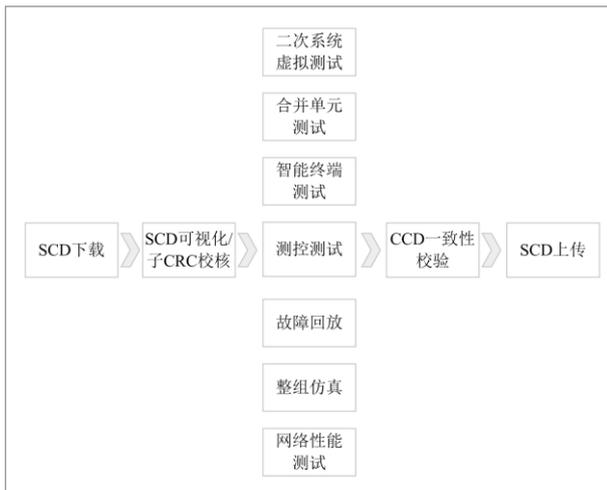


图7 智能变电站改扩建镜像调试系统功能设计

Fig. 7 Function design of mirroring debugging system for intelligent substation

SCD下载、SCD上传功能模块用于访问SCD管控系统实现配置文件迁入迁出；SCD可视化/子CRC校核模块实现SCD文件可视化、静态校验、一致性校验、可视化比对、IED子CRC一致性校核等功能；二次系统虚拟测试模块实现智能变电站二次系统测试中的各IED的虚拟及变电站真实环境的仿真、虚拟环境下继电保护装置一键式自动测试、安措离线预演等功能；合并单元测试功能模块实现

合并单元延时测试、对时/守时精度测试、电压电流精度测试、离散度测试、报文异常测试等；智能终端测试功能模块实现智能终端GOOSE转硬接点、硬接点转GOOSE的传输延时测试，同时也支持硬接点、GOOSE的SOE测试；测控测试功能模块实现测控装置遥控、遥测、硬接点/GOOSE转MMS分辨率测试；故障回放功能模块用于对继电保护事故进行分析和故障滤波数据回放；整组仿真功能模块基于变电站等效复合序网图计算模拟故障，测试多个保护对同一故障点的反应，也可对站域保护的各逻辑功能进行综合测试；网络性能测试功能模块实现网络负载模拟及网络压力测试。

#### 4 工程应用

某220kV智能变电站，主接线220kV侧双母双分接线，I、II母二次新增2207间隔、2208间隔线路保护、智能终端；III、IV母新增2209间隔线路保护、智能终端。利用本文设计的智能变电站改扩建镜像调试系统进行扩建工程调试。

改扩建前后SCD文件IED子CRC一致性比对结果如图8所示，改扩建设备直接关联设备PM2201A、PM2201B、PM2202A、PM2202B的原运行间隔的IED子CRC改扩建前后一致，直接关联设备与间接关联设备之间的虚回路没有发生变化，间接关联设备不需要停电进行模拟传动。改扩建的测试范围为：改扩建新增设备→直接关联设备。

虚拟机A、虚拟机B均导入改扩建后的SCD文件，虚拟机A模拟III母新增2209间隔PL2209A 220kV线路3保护装置A-2217、IL2209A 220kV线路3智能终端A-2217，虚拟机B模拟PM2202A 220kV乙母保护装置A进行镜像传动测试。虚拟机A发送支路9启动失灵信号、支路9刀闸位置信号，虚拟机B收到虚拟机A支路9启动失灵信号、支路

新增IED		直接关联域	原运行间隔CRC变化
1	PL2207A.220kV线路1保护装置A-2212	PM2201A 220kV甲母线保护装置A	无变化
2	IL2207A.220kV线路1智能终端A-2212		
3	PL2208A.220kV线路2保护装置A-2213		
4	IL2208A.220kV线路2智能终端A-2213	PM2201B 220kV甲母线保护装置B	无变化
5	PL2207B.220kV线路1保护装置B-2212		
6	IL2207B.220kV线路1智能终端B-2212		
7	PL2208B.220kV线路2保护装置B-2213	PM2202A 220kV乙母线保护装置A	无变化
8	IL2208B.220kV线路2智能终端B-2213		
9	PL2209A.220kV线路3保护装置A-2217		
10	IL2209A.220kV线路3智能终端A-2217	PM2202B 220kV乙母线保护装置B	无变化
11	PL2209B.220kV线路3保护装置B-2217		
12	IL2209B.220kV线路3智能终端B-2217		

IED	CRC	V1.0 SCD	V2.0 SCD	备注
1 PM2201A 220kV甲母线保护装置A	SGRCRC	d7211836	0e2b6fc3	不一致
	SGTCRC	02219538	be384c6f	不一致
	SMRCRC	eb57b1a1	eb57b1a1	一致
	SMTCRC	ec047cb1	ec047cb1	一致
1.11 IC2201A.220kV甲母线智能终端A	SGRCRC	03954a31	03954a31	一致
	SGTCRC	e77c6dc	e77c6dc	一致
	SMRCRC	c8b8895a	c8b8895a	一致
	SMTCRC	a34498c5	a34498c5	一致
1.12 PL2207A.220kV线路1保护装置A-2212	SGRCRC		94c9c455	新增
	SGTCRC		9e3781b8	新增
	SMRCRC		82474a3	新增
	SMTCRC		bc394dcf	新增
1.13 IL2207A.220kV线路1智能终端A-2212	SGRCRC		9dce1f9a	新增
	SGTCRC		04f372e4	新增
	SMRCRC		3004c844	新增
	SMTCRC		b8307e5	新增
1.14 PL2207A.220kV线路1保护装置A-2212	SGRCRC		95f9c6b4	新增
	SGTCRC		32c7d8a8	新增
	SMRCRC		86743a56	新增
	SMTCRC		ec73b582	新增
1.15 IL2207A.220kV线路1智能终端A-2212	SGRCRC		53c4b768	新增
	SGTCRC		eb45b1a3	新增
	SMRCRC		71a6c835	新增
	SMTCRC		e3d684c7	新增

图 8 改扩建前后子 CRC 一致性比对

Fig. 8 Sub-CRC consistency comparison before and after reconstruction

9 刀闸位置信号。虚拟机 B 发送支路 9 保护跳闸信号，虚拟机 A 收到虚拟机 B 支路 9 保护跳闸信号。新增 2209 间隔 PL 2209 A 220 kV 线路 3 保护装置 A-2217、IL 2209 A 220 kV 线路 3 智能终端 A-2217 与 PM 2202A 220 kV 乙母保护装置 A 之间虚回路

正确。

利用镜像调试系统对新增线路保护的采样精度、保护动作定值和动作时间进行闭环自动测试。系统基于中间模板实现模型自动映射，定值映射结果如图 9 所示。

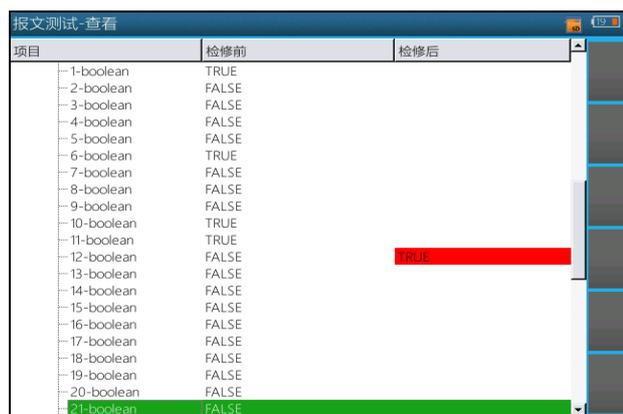
内部描述	模型描述	值	单位	引用
1 变化启动电流定值	变化启动电流定值	0.200	A	PROT/ALNO.DPFCStr
2 零序启动电流定值	零序启动电流定值	0.600	A	PROT/ALNO.RKCSStr
3 纵联差动电流定值	纵联差动电流定值	3.000	A	
4 纵联差动抗扰定值	纵联差动抗扰定值	5.000	A	
5 差动动作电流定值	差动动作电流定值	1.000	A	PROT/PDIS1.StrWdSG
6 线路正序阻抗定值	线路正序阻抗定值	6.000	ohm	PROT/PDIS.Z1
7 线路正序电抗角	线路正序电抗角	80.000	deg	PROT/PDIS2.LinAng
8 线路零序阻抗定值	线路零序阻抗定值	15.000	ohm	PROT/PDIS.Z0
9 线路零序电抗角	线路零序电抗角	78.000	deg	PROT/PDIS2.LinAng0
10 接地距离 I 段定值	接地距离 I 段定值	3.000	ohm	PROT/PDIS2.GndStr
11 接地距离 I 段时间	接地距离 I 段时间	0	ms	
12 接地距离 II 段定值	接地距离 II 段定值	5.000	ohm	PROT/PDIS3.GndStr
13 接地距离 II 段时间	接地距离 II 段时间	500	ms	PROT/PDIS3.GndTImms
14 接地距离 III 段定值	接地距离 III 段定值	7.000	ohm	PROT/PDIS4.GndStr
15 接地距离 III 段时间	接地距离 III 段时间	1000	ms	PROT/PDIS4.GndTImms
16 相间距离 I 段定值	相间距离 I 段定值	3.000	ohm	PROT/PDIS5.PhStr
17 相间距离 I 段时间	相间距离 I 段时间	0	ms	
18 相间距离 II 段定值	相间距离 II 段定值	5.000	ohm	PROT/PDIS6.PhStr
19 相间距离 II 段时间	相间距离 II 段时间	500	ms	PROT/PDIS6.PhTImms
20 相间距离 III 段定值	相间距离 III 段定值	7.000	ohm	PROT/PDIS7.PhStr
21 相间距离 III 段时间	相间距离 III 段时间	1000	ms	PROT/PDIS7.PhTImms
22 负序阻抗定值	负序阻抗定值	40.000	ohm	PROT/PDIS2.SdLoad
23 零序过流 I 段定值	零序过流 I 段定值	10.000	A	
24 零序过流 I 段时间	零序过流 I 段时间	0	ms	
25 零序过流 II 段定值	零序过流 II 段定值	5.000	A	PROT/PDIS1.StrWdSG
26 零序过流 II 段时间	零序过流 II 段时间	500	ms	PROT/PDIS1.CpDfTImms
27 零序过流 III 段定值	零序过流 III 段定值	3.000	A	PROT/PDIS2.StrWdSG

图 9 保护装置闭环测试

Fig. 9 Protection device closed loop test

在PM 2202 A 220 kV 乙母保护装置A配置更新前,用虚拟移动终端抓取其发出的GOOSE报文;更新后,再用虚拟移动终端抓取其发出的GOOSE报文,用心跳报文校验模块比对分析报文,不一致项标红表示(报文时间、SQ、ST不一致不会标红)。如图10所示,除通道12状态由“FALSE”变为“TRUE”,保护通道数、通道类型、通信参数均未发生变化,运行间隔改扩建后报文模型参数正确。

传统调试模式下,需220 kV I母、II母、III母、IV母陪停,在更新母差保护后,进行母差保护与所有220 kV线路间隔的传动试验,工程周期长,调试效率低下。应用智能变电站检修改扩建镜像调试系统进行镜像调试,镜像模拟变电站实际环境,实现智能变电站站端SCD文件签入签出、虚回路可视化比对、IED子CRC校验、虚回路模拟传动、安措预演、保护设备一键闭环测试等,在调试中心完成全站SCD文件、待测设备配置文件及有关试验等核心环节,简化现场调试工作,通过改扩建前后子CRC的一致性比对自动识别改扩建的测试边界,有效减少了一次设备陪停及二次设备投退操作,缩小了停电范围,缩短了停电周期。



项目	检修前	检修后
1-boolean	TRUE	
2-boolean	FALSE	
3-boolean	FALSE	
4-boolean	FALSE	
5-boolean	FALSE	
6-boolean	TRUE	
7-boolean	FALSE	
8-boolean	FALSE	
9-boolean	FALSE	
10-boolean	TRUE	
11-boolean	TRUE	
12-boolean	FALSE	TRUE
13-boolean	FALSE	
14-boolean	FALSE	
15-boolean	FALSE	
16-boolean	FALSE	
17-boolean	FALSE	
18-boolean	FALSE	
19-boolean	FALSE	
20-boolean	FALSE	
21-boolean	FALSE	

图10 心跳报文比对

Fig. 10 Heartbeat message comparison

## 5 结论

针对目前智能变电站改扩建困难、停电影响范围大的问题,研究一种智能变电站改扩建镜像调试技术,并开发了智能变电站检修改扩建镜像调试系统。镜像模拟变电站实际环境,实现二次设备联调验证测试、整间隔/单装置镜像调试,简化现场调试工作,减少现场停电时间。

此外,提供了一种包含SCD可视化比对、子CRC一致性校验、镜像模拟传动、心跳报文比对、下装配置文件回读及一致性校验等多种技术手段的现场冗余校验验证方法,多方式验证检修、改扩建

工程中配置变更,确保改扩建工程配置、模型变更的正确性与确定性,提高改扩建调试确定性、可靠性。

## 参考文献

- [1] 宋璇坤, 韩柳, 鞠黄培, 等. 中国智能电网技术发展实践述[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 1-11.  
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A review on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.
- [2] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.  
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.
- [3] ZHOU Long, ZHANG Di, WU Weijie, et al. A comparative study on grid resource utilization rate between China Southern Power Grid and National Grid Plc of UK[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 277-284. DOI: 10.1186/s41601-018-0100-6.
- [4] 张曼, 陈典丽. 智能变电站扩建二次实施方法的探讨[J]. 湖北电力, 2016, 40(2): 43-47.  
ZHANG Man, CHEN Dianli. Research on methods of secondary circuit connections in intelligent substation expansion[J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(2): 43-47.
- [5] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [6] WANG Longchang, GAO Houlei, ZOU Guibin. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [7] 高磊, 刘鹏, 卜强生, 等. 基于SED文件的智能变电站改扩建二次系统配置文件自动重构技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 153-158.  
GAO Lei, LIU Peng, BU Qiangsheng, et al. Study on automatic reconfiguration technology of secondary system configuration file based on SED file for smart substation reconstruction and expansion[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 153-158.
- [8] 张海东, 黄树帮, 杨青, 等. 面向扩建场景的变电站配置描述模型间隔解耦技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 129-134.  
ZHANG Haidong, HUANG Shubang, YANG Qing, et al. Discussion on technology of substation configuration description model bay decoupling for expansion project of smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 129-134.
- [9] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.

WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of intelligent maintenance system based on internet of things and mobile internet technology[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.

[10] 朱维钧, 林治, 唐志军. 智能变电站不停电改扩建方案的研究[J]. 电力与电工, 2013, 33(1): 17-20.  
ZHU Weijun, LIN Ye, TANG Zhijun. Research on extension scheme for smart substation without power off[J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2013, 33(1): 17-20.

[11] 高磊, 卜强生, 袁宇波, 等. 基于二次回路比对的智能变电站调试及安全措施[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 130-134.  
GAO Lei, BU Qiangsheng, YUAN Yubo, et al. Smart substation commissioning and safety measures based on secondary circuit comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 130-134.

[12] 彭龙, 宁剑, 王毅, 等. 状态估计研究模式设计及应用[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 169-175.  
PENG Long, NING Jian, WANG Yi, et al. Design and application of state estimation research model[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 169-175.

[13] 申泉, 赵谦. 智能变电站全生命周期内 IED 即插即用技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 162-167, 172.  
SHEN Quan, ZHAO Qian. PNP technology of IEDs for whole life cycle of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 162-167, 172.

[14] 熊华强, 万用, 桂小智, 等. 智能变电站 SCD 文件可视化管理和分析决策系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 166-171.  
XIONG Huaqiang, WAN Yong, GUI Xiaozhi, et al. Design and implementation of visual management and analytical decision system for smart substation SCD files[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 166-171.

[15] 谢镜池, 付旌铭. 智能变电站模型自动化检测手段设计与实现[J]. 电工技术, 2020(5): 138-140.  
XIE Jingchi, FU Jingming. Design and implementation of automatic smart substation model detection[J]. Electrician Technology, 2020(5): 138-140.

[16] 叶远波, 陈晓东, 项忠华, 等. 基于间隔 CRC 校验码的智能变电站改扩建配置文件定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 173-179.  
YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Research on configuration file location of smart substation reconstruction and extension based on bay CRC code[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 173-179.

[17] 郝晓光, 赵宇皓, 尹项根, 等. 基于中间模型文件的智能变电站虚回路校验研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 132-137.  
HAO Xiaoguang, ZHAO Yuhao, YIN Xianggen, et al. Intelligent substation virtual circuit check based on the intermediate model file[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 132-137.

[18] 王瑞彪, 郑文斌. 智能变电站 SCD 文件版本的可视化管控研究[J]. 华电技术, 2019, 41(4): 14-18.  
WANG Ruibiao, ZHENG Wenbin. Research on visual control of smart substation SCD file version[J]. Huadian Technology, 2019, 41(4): 14-18.

[19] 刘大伟, 宋爽, 马泉. 基于云策略和 MMS 协议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, 2019, 47(12): 159-164.  
LIU Dawei, SONG Shuang, MA Quan. Automatic test system of intelligent substation relay protection equipment based on cloud policy and MMS protocol[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 159-164.

[20] 浮明军, 张玉中, 张文, 等. 智能变电站就地化保护自动测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 77-81.  
FU Mingjun, ZHANG Yuzhong, ZHANG Wen, et al. Research on auto-test technology for local protection in smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 77-81.

[21] 董磊超, 刘昊昱, 浮明军, 等. 智能变电站间隔层设备自动测试系统研制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 147-151.  
DONG Leichao, LIU Haoyu, FU Mingjun, et al. Development of automatic test system for bay level equipment of smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 147-151.

[22] 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.

[22] 李先彬, 胡宝, 于士谦, 等. 继电保护自动测试用例设计关键技术及解决方案[J]. 电工技术, 2019(5): 116-118, 121.  
LI Xianbin, HU Bao, YU Shiqian, et al. Key technology and solutions of design of automatic test case of relay protection devices[J]. Electric Engineering, 2019(5): 116-118, 121.

[23] 刘巍, 赵勇, 石光. 智能变电站继电保护装置一键式测试方法及系统[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 152-154.  
LIU Wei, ZHAO Yong, SHI Guang. One-key test system for relay protection equipment of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 152-154.

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-05-27

作者简介:

周柯(1979—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为柔性输配电、电力系统自动运维等。E-mail: 807156806@qq.com

(编辑 张爱琴)