智能变电站二次设备协同自动检验技术研究

魏颖莉[1]，杨晶鑫[1]，刘　喆[1]，汪　岩[1]，唐　凡[1]，唐　强[2]

（1. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司，河北 保定 071600；
2. 武汉凯默电气有限公司，湖北 武汉 430223）

摘要：为提高智能变电站二次设备检验的效率及正确性，提出一种基于标准化作业指导书的多装置协同自动检验技术。首先基于智能变电站相关规范，建立智能变电站二次设备的基础信息模型库；然后依据专家知识建立二次设备检验任务通用模组，利用通用模组组态生成二次设备的标准化作业指导书；再根据 SCD 中 IED 之间的关联关系，实例化标准作业指导书；最后将多台继电保护装置分布式配置，通过移动终端同步下发测试指令，实现多装置的协同自动检验。实例验证结果表明，基于标准化作业指导书的多装置协同自动检验技术可有效提高智能变电站二次设备检验任务的效率，保证检验任务的正确性。

关键词：智能变电站；二次设备；协同自动检验；标准化作业指导书

Research on technologies of secondary equipment collaborative automatic test in smart substation

WEI Yingli[1], YANG Jingxin[1], LIU Zhe[1], WANG Yan[1], TANG Fan[1], TANG Qiang[2]

(1. Xiong'an New District Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071600, China; 2. Wuhan Kemov Electric Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and correctness of secondary equipment test in smart substation, a multi-device collaborative automatic test technology based on standardized operation instructions is proposed. Firstly, based on the relevant specifications of smart substation, establish the basic information model of smart substation secondary equipment. Secondly, according to the expert knowledge, establish the general module of secondary equipment test , and the general module configuration generates the standardized operation instruction of secondary equipment. Then, instantiate standardized operation instructions based on associations between IEDs in SCD. At last, multiple relay protection devices are distributed and test instructions are issued synchronously by mobile terminals to realize collaborative automatic test. The result of example verification shows that the technology of multi-device collaborative automatic test based on standardized operation instructions can effectively improve the efficiency and ensure the correctness of the secondary equipment test in smart substation.

Key words: smart substation; secondary equipment; collaborative automatic test; standardized operation instructions

0　引言

电网的安全稳定运行依赖站内二次设备的正确运行，二次设备的正确运行依赖运维人员定期检验。随着变电站规模增大、复杂度提高，电网安

全稳定运行的要求与检验压力的矛盾日益突出[1-3]。在日常检验工作中，继电保护测试仪已成为电力工作者必不可少的工具，基于继电保护测试仪的二次设备检验技术越来越多。

文献[4]提出一种继电保护测试仪通用测试软件，按保护功能原理分项测试设计，根据不同二次设备类型加载不同测试任务，无须检验人员参与和控制；但是受保护类型限制，需要预先编辑不同的检验模板满足不同地区、不同电压等级和不同设备厂家的检验任务需求。文献[5]提出一种以二次设备作业指导书为基础，按间隔进行检验的方法，该方法模拟装置的运行工况，实现整间隔多装置的传动检验。但是，间隔内装置多、距离远，需要检验人员控制测试仪分功能、分项目进行多次检验，工作效率因人而异。文献[6]提出一种继电保护测试仪分布式测试方法，能实现间隔内多装置的同步测试，但各测试子机需要加载不同测试任务，通过接入变电站站内网络获取测试结果，无法保证网络的安全性。智能变电站二次设备的检验技术研究还有很大的进步空间。

本文提出一种基于标准化作业指导书的多装置协同自动检验技术，通过构建二次设备的基础信息模型，结合二次设备检验任务内容，以专家知识组建检验任务通用模组，通用模组与基础信息模型自由组态生成二次设备的标准化作业指导书；将多台继电保护测试仪分布式配置在检验二次设备侧，移动终端经无线网络控制多台继电保护测试仪同步输出，通过子站服务器获取检验设备的反馈信号，实现多装置的协同自动检验，提高了智能变电站二次设备的检验效率，大大减少了现场作业时间。

1 协同自动检验系统架构

协同自动检验系统架构如图1所示，系统由网络安全装置子站服务器、移动终端和继电保护测试仪组成。网络安全装置起网络隔离作用，保证子站服务器、移动终端和继电保护测试仪接入站内网络后不会影响站内网络安全，不做其他处理。子站服务器既作为站端服务器使用，监控站内二次设备运行状态，实时推送二次设备信息；也作为后台服务器使用，保存二次设备基础模型库、标准化作业指导书等。移动终端作为控制设备，轻便、灵活，不受距离限制，通过无线网络从子站服务器获取配置文件、标准化作业指导书和控制测试仪输出，实时监控检验状态。继电保护测试仪主要输出信号，回采二次设备的反馈信号，进行故障计算、评估检验结果。

子站服务器包括无线通信模块、信息建模模块、任务组态模块和数据存储模块。无线通信模

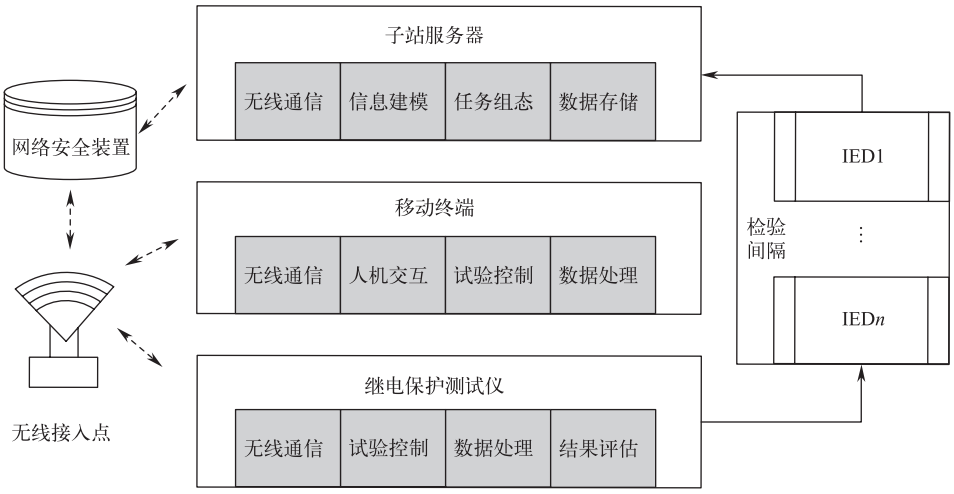

图 1 智能变电站二次设备协同自动检验系统架构

Fig. 1 System architecture of smart substation secondary equipment collaborative automatic test

块通过WiFi实现，通过连接同一WiFi热点实现与继电保护测试仪、子站服务器的数据交互。信息建模模块用于建立基础模型库。任务组态模块用于搭建检验任务，生成标准化作业指导书。数据存储模块用于储存SCD文件、基础模型库、标准化作业指导书、检验报告单和检验进度表等。

移动终端包括无线通信模块、人机交互模块、试验控制模块和数据处理模块。无线通信模块通过WiFi实现，连接同一WiFi热点实现与继电保护测试仪、子站服务器的数据交互；其中，移动终端从子站服务器上获取标准化作业指导书和SCD文件，访问历史检验报告单等；同时将检验报告单、检验进度表等上传子站服务器；移动终端根据界面操作向继电保护测试仪下发试验控制命令、检验任务，同时获取继电保护测试仪的实时测试结果。人机交互模块用于响应界面操作，并展示测试结果。试验控制模块用于下发试验控制命令，控制继电保护测试仪输出。数据处理模块用于分类处理接收的测试结果，并将测试结果与对应测试项目匹配。

继电保护测试仪包括无线通信模块、试验控制模块、数据处理模块和结果评估模块。无线通信模块通过WiFi实现，通过连接同一WiFi热点实现与移动终端、子站服务器的数据交互。试验控制模块用于响应移动终端的控制命令，控制自身任务切换、测试结果上送以及从子站服务器获取反馈信号等。数据处理模块用于实例化标准化作业指导书，还用于测试任务中的故障计算，输出相应激励到检验的二次设备。结果评估模块用于计算反馈信号和评估逻辑，并上送评估结果。

2 建立标准化作业指导书

2.1 构建二次设备基础模型库

二次设备检验本质上是对电力系统设备的功能、控制点进行调试，调试人员对全部电气单元调试通过后，电力信号可以按照预期方向正常传递[7]；由于不同设备的电力信号不同，无法通过配置电力信号来实现多装置的批量测试。

文献[8]对二次设备电力信号做出规范，即电力信号包括通用面向变电站事件对象（Generic Object Oriented Substation Events，GOOSE）和实现保护逻辑制造报文规范（Manufacturing Message Specification，MMS）。根据规范定义，可以在不同类型的二次设备下建立该类设备的GOOSE、MMS基础模型库，分别用GOOSE模型信息和MMS模型信息标识。在实例化后，根据二次设备信息将模型信息与电力信号的描述、参引等信息关联，实现对所有二次设备的兼容。

二次设备基础模型库按照三个层级建立，如图2所示。第一级为设备级，按照二次设备类型建立IED模型，例如线路保护、线路合并单元和母线保护等；第二级为模型级，按照电力信号类型建立GOOSE信息模型和MMS信息模型，对MMS信息模型按类型分为dsSetting、dsRelayEna、dsRealyDin、dsRelayAin、dsParameter和dsTripInfo，每一类下均可建立多条模型信息；第三级为端子级，每一条信息模型下均包含多条端子信息，端子信息与实际工程中获取的GOOSE信号、MMS信号的参引地址一致，是标准化作业指导书根据SCD文件实例化的基础。

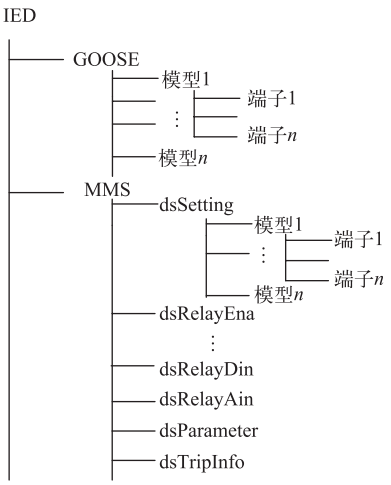

图 2 IED 基础模型层级结构

Fig. 2 Hierarchical structure of IED base model

每一层级的模型信息所包含的信息不同，IED模型信息包括设备名称、设备类型和间隔属性。设备名称用于标识当前IED信息的描述；设

备类型用于标识当前IED信息的类型，如保护、合并单元和智能终端等；间隔属性用于标识当前IED信息所属的间隔，如线路间隔、母线间隔等。GOOSE模型信息包括通道描述、通道地址。通道描述用于描述当前GOOSE信息，做区分和展示用；通道地址用于标识当前GOOSE信息在SCD中实际的参引地址。MMS模型信息包括信号类型、信号描述和信号地址。信号类型用于MMS信息分类；信号描述用于描述MMS信息，做区分和展示用；信号地址用于标识当前MMS信息在SCD中实际的参引地址。具体见表1。

表 1　二次设备模型信息

Tab. 1 Secondary equipment model information table

模型类型	模型信息
IED	设备名称
	设备类型
	间隔属性
GOOSE	通道描述
	通道地址
MMS	信号类型
	信号描述
	信号地址

GOOSE模型信息与MMS模型信息下均建立了端子模型库，每一个端子模型库包含多条端子模型信息；端子模型信息包括端子型号、端子描述和端子地址，具体端子模型信息见表2。端子型号用于标识端子的设备信息，例如NR-PCS931A，其中“NR”为设备厂家标识，即南瑞继保，“PCS931A”为设备型号；端子描述标识端子在SCD中的描述；端子地址为端子在SCD中的参引地址。

表 2　二次设备端子模型信息

Tab. 2 Secondary equipment terminal library model information table

项目	模型信息
GOOSE	端子型号
	端子描述
	端子参引
MMS	端子型号
	端子描述
	端子地址

2.2　组建通用模组

随着自动化发展的不断深入，智能变电站二次设备智能化水平不断提升，尤其是二次设备状态监测系统已经基本实现了全自动、全周期监测；不同二次设备间的检验内容和检验手段越来越具有共通性[9]，为标准化作业指导书的出现提供了基础。通过分析典型间隔检验任务书，建立通用模组，实现对二次设备检验任务的兼容。

选取典型间隔的检验任务书，逐一列举任务书中的检验任务，以检验任务的检验内容为基础，结合现场实际测试经验，将有共同测试特性的任务抽象为通用测试项目，将通用测试项目与基础信息库结合组建通用模组。

选取线路间隔、母线间隔和主变压器间隔等典型间隔的作业指导书，具体检验任务列举见表3。

表 3　典型间隔检验任务

Tab. 3 Typical interval test task list

间隔类型	线路间隔	母线间隔	主变压器间隔
检验任务	设备状态检验	设备状态检验	设备状态检验
	链路检查	链路检查	链路检查
	人工提示	人工提示	人工提示
	检修状态判断	检修状态判断	检修态判断
	遥信判断	遥信判断	遥信判断
	动作判断	动作判断	动作判断
	压板投退	压板投退	压板投退
	控制字投退	控制字投退	控制字投退
	距离保护	差动试验	复压闭锁
	零序保护	失灵保护	开入检查
	开入检查	开入检查	零飘准确度
	零飘准确度	零飘准确度	设备状态检验

分析线路间隔、母线间隔和主变压器间隔任务，按照检验任务的信号输出、信号采集、检验内容、检验方式和结果评估方式等，将检验任务分为四类通用模组，包括提示检查、逻辑判断、压板投退和逻辑校验，各检验任务对应的通用模组类型见表4。

1）提示检查类。此类检验任务不需要继电保护测试仪对检验设备施加外部信号激励，也无

法通过继电保护测试仪获取反馈信号，需要检验人员根据任务提示，人工核查检验内容的正确性。

表 4　通用模组与检验任务映射

Tab. 4 General module and test task mapping table

通用模组类型	检验任务
提示检查	设备状态检验
	链路检查
	人工提示
逻辑判断	检修态判断
	遥信判断
	动作判断
压板投退	压板投退
	控制字投退
逻辑校验	复压闭锁
	开入检查
	零飘准确度
	距离保护
	零序保护
	差动试验
	失灵保护

2）逻辑判断类。此类检验任务不需要继电保护测试仪对检验设备施加外部信号激励，可以通过继电保护测试仪获取反馈信号，根据检验内容和检验逻辑完成检验任务的自动评估。

3）压板投退类。此类检验任务需要继电保护测试仪通过维护管理服务访问检验设备的站控层网络，实现检验任务中预设的控制字、压板状态变更，并自动读取检验设备状态，完成检验任务的自动评估。

4）逻辑校验类。此类检验任务需要继电保护测试仪根据校验逻辑计算故障输出，通过电缆施加外部信号激励，同时通过继电保护测试仪获取反馈信号，最终实现检验任务的自动评估。

2.3　构建标准化作业指导书

变电站二次设备检验通常以间隔为单位进行，一个间隔内包含多台不同的二次设备，而电网出于安全考虑，间隔内设备通常双套化配置，且两套设备必须为不同厂家设备。这就导致一次检验任务涉及多个厂家的多个型号的装置，使得检验人员根据装置使用说明书编写针对各厂家的作业指导书，增加了调试人员的工作量。

如图3所示，构建标准化作业指导书流程为：在已有基础模型库和通用模组的前提下，以IED为单位，根据IED的现场作业内容，逐一将检验任务与通用模组中对应类型关联，并建立任务；再根据检验任务要求，将基础模型库中当前IED的GOOSE信息模型和MMS信息模型组合为正则表达式，作为检验任务的评估逻辑，建立当前IED的作业指导书。

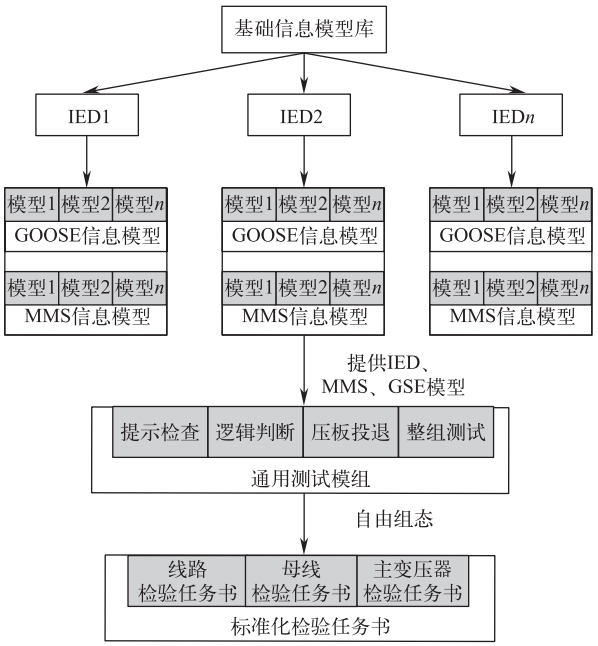

图 3　构建标准化作业指导书

Fig. 3 Construct standardized operation instructions

评估逻辑的正则表达式为：模型信息+逻辑表达式+逻辑右值；其中模型信息包括GOOSE模型信息和MMS模型信息；逻辑表达式包括大于（>）、小于（<）、等于（=）、不等于（!=）、逻辑与（&&）、逻辑或（||）、逻辑非（!）和括号（（））；逻辑右值由基本数字单元组合生成，基本数字单元包括0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、小数点（.）；评估逻辑可由一个或多个正则表达式组成，如（（（a=1）&&（b<1））||（c>2）），其中“a=1”“b<1”用“（）”包裹以区分逻辑优先级，即上述评估逻辑先判断“a=1”，再和“b<1”取逻辑“与”，最后“c>2”取逻辑“或”，最终值为评估结果。

3 协同自动检验流程

3.1 模型实例化

标准化作业指导书基于基础信息库和通用模组生成，每个检验任务中使用的电力信号均是基础信息库中的信息模型，无法与实际检验二次设备的具体电力信号关联。在实际测试时，继电保护测试仪无法识别需要发送的信号，也无法解析从检验设备中回采的反馈信号。因此，需要将标准作业指导书实例化，将标准作业指导书中使用的基础模型信息与实际检验二次设备的接收、发送信号关联。

全站系统配置文件（Substation Configuration Description，SCD）集成了变电站中所有二次设备的过程层、站控层信息，继电保护测试仪导入标准化作业指导书后，通过子站服务器获取SCD文件，解析SCD文件获取全站二次设备的过程层数据集、站控层数据集以及模型信息，根据IED模型信息中的设备名称、设备类型自动关联SCD中的二次设备；根据IED下GOOSE信息模型的通道描述、通道地址、端子型号、端子参引与SCD中关联IED的GOOSE发送数据集、GOOSE接收数据集中的GOOSE通道关联；根据IED下MMS信息模型的信号类型、信号描述、信号地址、端子型号、端子参引与SCD中关联IED的站控层对应数据集下MMS条目关联。

3.2 自动检验流程

协同自动检验流程如图4所示。基础信息模型库是本技术的基础，首先需要在子站服务器上建立基础信息模型库，具体地，按照设备类型对待检验的二次设备分类，以二次设备类型为基础信息，建立各类型IED的信息模型；选取IED，在每个IED下建立GOOSE信息模型，每个GOOSE信息模型下建立端子信息库；在每个IED下按照定值、控制字、压板、遥信、遥测、遥控、装置参数和动作信号分类建立MMS信息模型，在每个MMS信息模型下建立各自端子信息库。

模型信息库是迭代更新的，检验设备越多，信息库的完整度越高，检验多个变电站后，模型信息库基本不用新建、录入，可以直接使用。

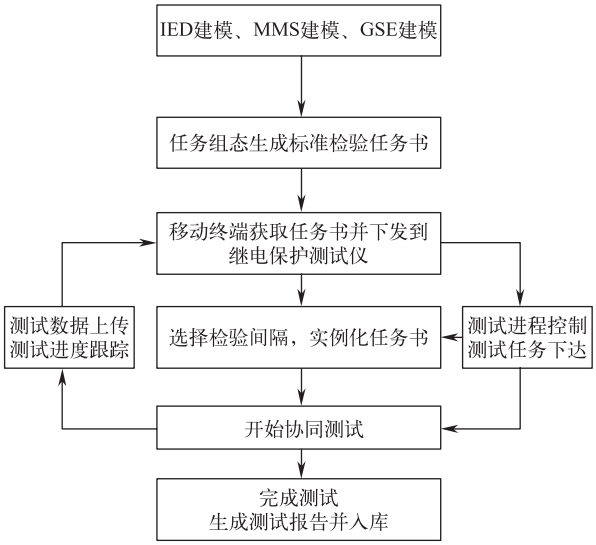

图 4 协同自动检验流程

Fig. 4 Collaborative automatic test process

然后，在子站服务器上建立通用模组；再根据IED类型，结合现场作业内容，以四类通用模组自由组态生成IED检验任务单。

以保护为中心，根据SCD中的关联关系，构建最小测试间隔，将间隔中各IED的检验任务单组态生成标准化作业指导书。

选择测试间隔，用多台继电保护测试仪与间隔中各IED通过电缆连接，再用移动终端通过无线网络与各继电保护测试仪相连，移动终端从子站服务器获取测试间隔的标准化作业指导书以及SCD文件，实例化标准化作业指导书，控制测试仪同时开始测试。

4 工程应用

选取某220 kV智能变电站，测试验证本技术方案的特点。图5为220 kV线路间隔检验站内接线示意图，继电保护测试仪、移动终端通过无线网络经网络安全装置与站内网络相连。3台继电保护测试仪就地配置在3个检验设备旁。其中，继电保护测试仪1通过电缆给线路保护施加激励，继电保护测试仪3通过电缆给线路合并单元施加激励，继电保护测试仪2通过电缆给线路智

能终端施加激励，3台继电保护测试仪通过WiFi与移动终端相连。检验过程中，通过监控后台查看站内网络报文。除了试验过程中新增间隔内装置产生的MMS报文和GOOSE报文外，未检测到外部报文。试验证明，本技术在检验过程中不会附加任何的网络负载到站内网络，保证了测试的安全性。

检验过程中，检验人员通过移动终端控制继电保护测试仪1/2/3同步开始。继电保护测试仪根据自身检验任务输出信号。

以模拟线路保护距离故障为例，试验开始一段时间后，继电保护测试仪2输出故障采样，模拟线路故障，线路保护接收到合并单元发出的故障采样，发出跳闸报文。跳闸报文经站内网络发送给子站服务器，子站服务器收到跳闸报文后，推送给继电保护测试仪1/2/3，继电保护测试仪2收到跳闸报文后，停止输出故障采样；继电保护测试仪3收到跳闸报文后，触发上送位置信号，并给出下一步激励；继电保护测试仪1收到线路跳闸报文后，根据跳闸报文及继电保护测试仪2/3的输出状态，按照检验逻辑自动给出评估结果。

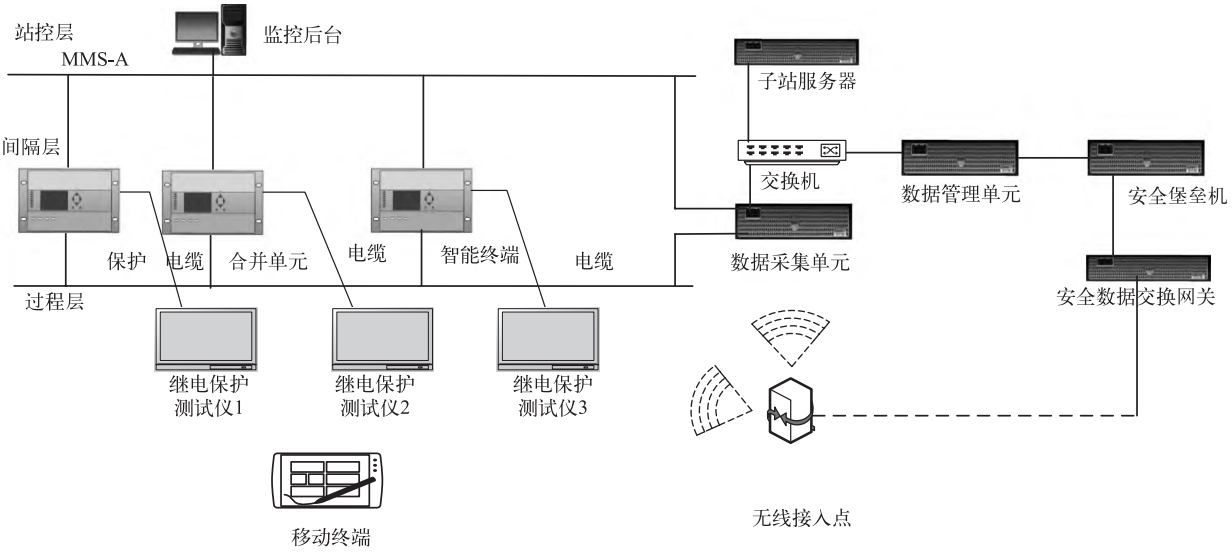

图 5　线路间隔协同自动检验接线示意图

Fig. 5 Line interval collaborative automatic test wiring diagram

选取4个线路间隔、2个母线间隔和2个主变压器间隔，分别采用传统检验方法和本检验技术完成间隔检验并记录检验耗时，统计结果见表5。

由表5可知，技术方案在检验效率上高于传统检验方法。技术方案以间隔为整体，分布式配置继电保护测试仪，同时完成3个设备的检验任务，实现了间隔内多装置间的协同自动检验，大大提高了检验效率。技术方案中，检验设备与继电保护测试仪之间接线少、距离近，且不受间隔内各检验设备的距离限制，减少了不必要的拆接线操作，提高了检验效率。

表 5　检验任务耗时统计

Tab. 5 Statistics table of test time

（单位：天）

测试间隔	传统检验平均耗时	本次检验耗时
线路间隔 1	3	1.5
线路间隔 2	3	1
线路间隔 3	3	1
线路间隔 4	3	1
母线间隔 1	2	1
母线间隔 2	2	1
主变压器间隔 1	4	2
主变压器间隔 2	4	1.5

5 结束语

针对现有二次设备检验技术存在通用性差、安全性低、检验周期长和需要大量人力等问题，本文提出一种基于标准化作业指导书的协同自动检验技术，以IED为单位建立基础模型库，经通用模组组态生成标准化作业指导书，兼容不同地区、不同电压等级和不同厂家设备，具有易维护、易扩展和高兼容性等优点。基于标准化作业指导书的协同自动检验技术，拓展了测试应用场景，实现了以间隔为单位的检验，保证了检验链路的完整性，使得检验结果更加真实、可靠，为智能变电站二次设备检验工作提供了一个通用性强、测试效率高的检验方案。

此外，继电保护在测试仪测试过程中，经网络安全装置从子站服务器获取站内报文，不与站内网络直接相连，大大降低了检验过程中对变电站站内网络的影响，提高了检验的安全性。

参考文献

[1] 朱旻路．智能变电站二次设备调试及维护探讨[J]．电子世界，2021(23)：67-68．
[2] 李晶，许静静．智能变电站二次设备调试及维护[J]．中国高新科技，2021(17)：91-92．
[3] 姚鑫，郭瑞，秦光辉．智能变电站二次设备调试及维护探讨[J]．中国设备工程，2021(8)：46-47．
[4] 高俊．智能变电站继电保护检测和调试技术研究[J]．冶金与材料，2021，41(6)：67-68，71．
[5] 马东巍，于文强．论智能变电站继电保护调试技术[J]．科技创新与应用，2021，11(17)：124-126．
[6] 张秉楠，雍明月，李林广，高等．智能变电站继电保护调试技术的研究[J]．应用能源技术，2020(10)：20-23．
[7] 袁渝蓉．220 kV智能变电站继电保护调试关键问题及对策分析[J]．中国高新技术企业，2015(36)：129-130．
[8] 黄海．电厂220 kV升压站及电网220 kV变电站继电保护系统的运行研究[J]．企业技术开发，2016(2)：69-70．
[9] 肖繁，王紫薇，张哲，等．基于状态监测的继电保护系统检修策略研究[J]．电力系统保护与控制，2018，46(6)：74-83．
[10] 张海东，陈爱林，倪益民，等．智能变电站智能电子设备在线评估及动态重构[J]．电力系统自动化，2014，38(5)：122-126．
[11] Communication networks and system in substation：IECTC57．IEC 61850[S]．
[12] 王德文．基于IEC 61850和MMS的网络化电力远动通信的研究[D]．保定：华北电力大学，2009．

作者简介

魏颖莉（1984—），女，高级工程师，主要研究方向为电力系统及其自动化。

（收稿日期：2022-12-16）