

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191040

电力系统通用服务协议一致性测试技术

彭志强¹, 徐春雷², 张琦兵², 顾俊捷³, 郑明忠¹, 夏杰¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 3. 南京五采智电电力科技有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:为解决基于电力系统通用服务协议(GSP)的变电站自动化远程运维互操作测试问题,提出电力系统通用服务协议一致性测试技术。搭建了由GSP一致性测试工具、远程运维主站、变电站自动化远程运维对象、保护测控仿真系统等设备构成的GSP一致性测试系统平台。设计了面向远程运维服务的相关肯定性及否定性测试用例,并提供面向服务的函数接口以供自定义测试用例调用。GSP一致性测试系统平台可自动执行远程运维服务的测试用例,自动分析被测对象的响应报文,输出测试结果,实现试验过程中的全闭环,提高测试的效率和质量,支撑电力系统通用服务协议实用化应用。

关键词:通用服务协议; 远程运维; 一致性测试; 变电站自动化设备; 测试用例

Conformance testing technology of general service protocol for electric power system

PENG Zhiqiang¹, XU Chunlei², ZHANG Qibing², GU Junjie³, ZHENG Mingzhong¹, XIA Jie¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing 210024, China;
3. Five-C Smart Power Grid Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to solve the problem of remote operation and maintenance interoperability test of substation automation based on General Service Protocol (GSP), a conformance test technology of GSP is proposed. A GSP conformance testing system platform is built, which consists of GSP conformance testing tools, remote operation and maintenance master station, remote operation and maintenance objects, protection measurement and control simulation system and other equipment. The affirmative and negative test cases for remote operation and maintenance services are designed, and the service-oriented function interface is provided for custom test case invocation. The conformance testing system can automatically execute the test cases of remote operation and maintenance service, automatically analyze the response messages of the tested objects and output the test results. Conformance testing system realizes full closed-loop in the process of testing, improves the efficiency and quality of testing, and supports the practical application of general service protocol in power system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SG2020037) "Research and Application of Substation Station-level Localization Communication Protocol".

Key words: general service protocol; remote operation and maintenance; conformance test; substation automation equipment; test case

0 引言

随着泛在电力物联网的建设,泛在感知要求万物互联,互联的基础是物联模型和通信协议。目前,

变电站的通信协议主要采用了IEC61850、IEC60870-5-104等规约,缺乏可控自主的通信协议,安全性、可控性无法得到保障^[1]。变电站作为泛在物联网的感知层,需要进行安全、灵活接入,其通信安全影响着泛在电力物联网的建设。电力系统通用服务协议(General Service Protocol, GSP)采用面向服务的体系架构(Service-Oriented Architecture, SOA),通过

基金项目:国家电网有限公司科技项目资助(SG2020037)“变电站站控层国产化通信协议研究与应用”

一系列的接口服务实现服务消费者和服务提供者间的信息交换^[2]。GSP 具有自描述和动态维护特性, 采用面向对象的 M 编码方式^[3], 吸收高效实时数据通信的技术特点, 支持面向对象的高效实时数据通信服务。GSP 将通信服务及其报文结构直接映射到 TCP/IP 协议栈上, 吸收并扩展 DL/T634.5104 和 DL/T476 等协议实时性强的特性, 建立基于面向对象的实时数据传输机制, 在确保电网实时监视和控制数据的实时性和可靠性的同时, 借鉴 IEC61850 自描述特性, 增加自定义通信服务和自定义报文结构的功能, 采用二进制协议结构、数据单元、服务机制及服务原语, 实现各级电网调度主站、变电站及发电厂相互间数据交换。目前国内已经着手开展将 IEC 61850 中定义的抽象通信服务接口映射到 GSP, 以替代 IEC 61850-8-1 映射至 MMS, 研发具有完全自主知识产权的通信协议软件包及其调试工具, 并开展互操作一致性测试。

为适应电网快速发展生产运行的需要, 针对当前变电站自动化运维模式落后、技术手段单一及效率低下的现状, 江苏电网建设了变电站自动化远程运维系统, 采用基于 GSP 的变电站自动化远程运维体系架构, 构建了覆盖感知层、网络层、平台层、应用层的远程运维体系^[4-5]。变电站自动化远程运维是为了适应无人值守变电站模式, 强化互联网思维的技术创新。传统的主子站通信协议(DL/T634.5104、DL476 等)是基于数据点号进行传输的, 需要对其进行一些复杂的协议扩展才能支持相应需求^[6-9]。远程运维交互信息采用结构化数据, 根据运维业务的需求远程运维服务需支持动态扩展。为满足变电站自动化远程运维应用需要, 根据 GSP 具备丰富的通信接口且具有较强的扩展性, 完全满足远程运维信息交互的需要^[10-12]。采用 GSP 协议提高变电站自动化信息交互接入能力, 打通专业数据壁垒, 整合调控运行数据及检修数据资源, 支撑高效巡检。

为保证电力系统通用服务协议在变电站自动化远程运维的可靠应用, 提升远程运维系统各设备间互操作能力, 亟需开展 GSP 一致性测试技术研究。虽 GSP 在国内主流监控厂商已开展多次互操作测试, 但都是以互连互通为目的^[13], 未考虑一致性测试及现场应用的需求, 特别对于否定性测试, 未经有效验证。本文提出 GSP 一致性测试技术, 研制了 GSP 一致性测试系统平台, 建立面向远程运维应用的 GSP 测试用例库, 涵盖肯定性测试与否定性测试, 并支持测试用例的灵活编辑, 满足后续新技术的应用需求。

1 GSP 一致性测试需求分析

变电站自动化远程运维是在远程运维主站集中对变电站自动化系统及设备进行远程运行监视、组态配置、设备管理、维护操作及在线分析等。为检验电力系统通用服务协议在变电站自动化远程运维各类应用的适用性, 开展远程运维实用化互操作实验, 搭建的测试环境如图 1 所示。实验设备包括 GSP 一致性测试工具、基于 GSP 的报文分析诊断工具、调控主站前置仿真系统及保护测控信息仿真系统。其中 GSP 一致性测试工具包括 GSP 客户端测试功能模块与 GSP 服务端测试功能模块, 下面重点阐述面向变电站自动化远程运维的 GSP 一致性测试工具需求。

1) GSP 一致性测试工具集成电力系统通用服务协议规范的所有接口, 支持参数单元编码、对象单元编码、流数据单元编码、类描述单元编码及数据集扩展单元编码等五种编码方式。

2) 支持肯定性测试与否定性测试, 肯定性测试时传递正确的标准参数, 否定性测试时传递预设的错误参数。

3) 遵循 GSP 编码规则, 支持对服务码(SC)、及公共类标识(CI)进行动态扩展, 支持远程运维服务的测试。

4) 支持 GSP 报文解析, 便于测试问题分析;

5) 支持自动出具测试报告的功能, 根据服务响应行为自行出具测试报告。

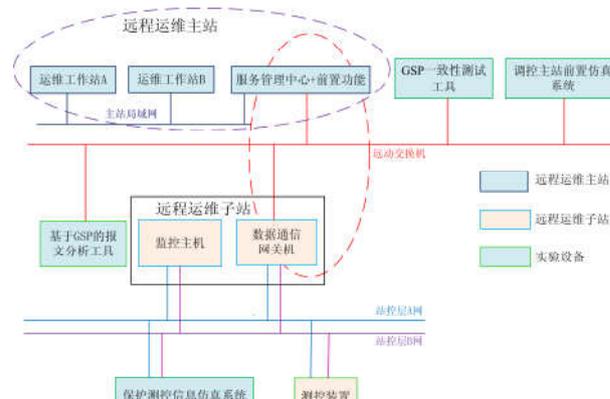


图 1 远程运维互操作实验系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interoperability experiment system for remote operation and maintenance

远程运维基于 GSP 协议的可扩展性, 扩展了相应了服务原语, 针对不同服务采用了 GSP 内参数单元或对象单元的编码定义方式描述了输入输出。面向远程运维服务的 GSP 一致性测试主要包括管理

服务和应用服务两大方面。

管理服务：关联服务、注册服务、申请服务、监视服务。

应用服务：远程复位服务、历史信息调阅服务、转发表查询服务、应急管理、设备参数管理服务。

面向远程运维应用的 GSP 一致性测试主要检测变电站数据通信网关机的远程运维服务通信接口与 GSP 协议服务原语的一致性。服务测试采用用例测试的方法，包括肯定性测试和否定性测试。测试用例涵盖通信接口及数据单元。

以转发表查询服务为例，设计了对应的测试集，其中肯定测试用例内，RemoteTransTable1 测试转发表通道查询功能；RemoteTransTable2、RemoteTransTable3 及 RemoteTransTable4 分别测试转发表通道遥信、遥测、遥控查询功能。

RemoteTransTable5 与 RemoteTransTable6 测试转发表遥信、遥测数据刷新功能。否定测试用例内，主要检查服务的测试用例输入错误参数情况下的响应结果是否符合预期。由此，通过测试用例可全面检测出转发表查询服务与 GSP 协议的服务原语规定是否一致。

2 GSP 一致性测试技术

GSP 一致性测试需求面向变电站自动化远程运维功能，在 GSP 协议函数接口设计、测试用例设计、报告输出等方面充分考虑 GSP 协议及扩展的远程运维服务原语的规定。设计 GSP 协议服务接口及测试集，建立测试用例库，调用每个测试用例自动控制每个测试步骤下测试报文的接收、发送和解析，减少人为因素的干扰。根据实际需求在测试用例中加入人机界面输出信息，在测试过程中，将每个步骤的测试情况在人机界面进行实时展示，包括各步骤的测试参数、测试结果、测试耗时等。测试结束后，系统能将测试用例、测试参数、测试步骤、预期结果、测试结果、测试问题、测试耗时等信息自动形成测试报告。

针对 GSP 协议面向服务的交互特点，GSP 一致性测试包括服务端或客户端两种模式，被测对象作为服务端时包括服务关联、释放、异常终止、服务监视、设备远程复位、历史信息调阅、转发表查询、应急管理、自动化设备参数管理等服务内容，作为客户端时包括服务注册、服务申请上线等服务内容。由此设计了两种 GSP 一致性测试闭环方式，包括软件闭环方式和软硬件闭环方式。

软硬件闭环方式：设备远程复位、历史信息

调阅、自动化设备参数管理等涉及通过保护测控仿真系统进行数据仿真和处理的服务，可采用 GSP 一致性测试工具及保护测控仿真系统相结合的方式实现软硬件闭环测试。

软件闭环方式：关联服务、服务注册、服务申请上线、服务监视、转发表查询、应急管理不涉及硬件操作的测试，仅采用 GSP 一致性测试工具即可实现软件闭环测试。

2.1 服务端硬件闭环测试

被测对象作为服务端时的测试，以设备远程复位服务的一致性测试为例，设备远程复位服务的目的是实现远程运维主站对变电站端设备及应用的复位管理，包括设备查询、设备复位、应用复位等功能。

搭建的一致性闭环测试系统架构如图 2 所示，由 GSP 一致性测试工具、被测对象、保护测控仿真系统等共同组成。被测对象通过设置 GSP 代理，实现与原有数据的交互；一致性测试工具与被测对象之间通过 GSP 进行信息交互，负责 GSP 请求报文的生成发送及响应报文的接收解析，同时通过内部总线与保护测控仿真系统进行通信，接收保护测控仿真系统反馈的实际复位信息，对测试结果进行判定，也可通过内部总线向保护测控仿真系统发送远程运维其他服务所需的仿真信息命令。保护测控仿真系统平台与被测设备之间通过 IEC61850 进行信息交互，完成被测设备下发的设备复位请求及数据召唤等命令^[14-15]，保护测控仿真系统平台针对被测设备仿真发送远程运维其他服务所需的必要信息，由此完成对被测对象远程运维服务端的闭环测试。

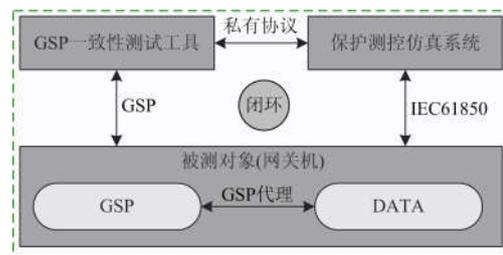


图 2 软硬件一致性闭环测试系统框图

Fig. 2 Block diagram of hardware and software consistency closed loop test system

具体被测设备作为服务端运行时，设备远程复位服务的闭环测试过程如下：

- 1) 一致性测试工具与被测对象进行 GSP 通信，请求站内自动化设备列表，对指定自动化设备下发复位命令；

2) 被测对象与保护测控仿真系统进行 IEC61850 通信, 对指定自动化设备传递复位命令;

3) 保护测控仿真系统内指定的自动化设备响应复位命令, 并将实际复位情况通过内部总线告知一致性测试工具;

4) 一致性测试工具依据测试用例内的规则对测试过程中被测设备 GSP 响应报文及保护测控仿真系统内部总线反馈报文的解析结果进行实时判断, 最终输出一致性闭环测试结果。

2.2 客户端软件闭环测试

被测对象作为客户端时的测试, 以被测对象运维服务注册的一致性测试为例, 远程运维服务注册的目的是被测对象将相关远程运维应用类服务信息告知远程运维主站。

搭建的一致性闭环测试框图如图 3 所示, 由一致性测试工具、被测对象等设备组成^[16-17]。被测对象通过设置 GSP 代理, 实现与原有数据的交互; 一致性测试工具与被测对象之间通过 GSP 进行交互, 负责监听被测对象的 GSP 请求报文并接收解析, 同时生成响应报文发送至被测对象。由此完成对被测设备远程运维客户端的闭环测试。

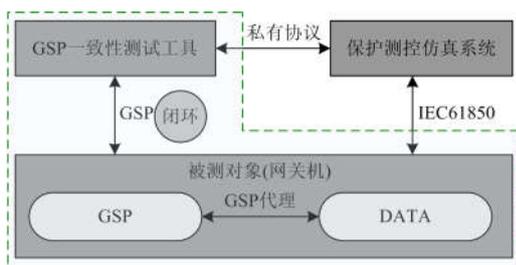


图 3 软件一致性闭环测试系统框图

Fig. 3 Block diagram of pure software consistency closed loop test system

具体被测设备作为客户端运行时, 注册服务的闭环测试过程如下:

1) 一致性测试工具与被测对象进行 GSP 通信, 监听被测对象的远程运维应用服务的注册请求并响应;

2) 一致性测试工具向被测对象发送远程运维应用服务的监视命令, 查询被测远程运维设备的服务上线状态;

3) 一致性测试工具依据测试用例内的规则对测试过程中被测对象的 GSP 请求报文及响应报文的解析结果进行实时判断, 最终输出一致性闭环测试结果。

3 GSP 一致性测试工具

3.1 软件整体架构设计

GSP 一致性测试工具软件平台支持跨操作系统, 以 Qt 环境为容器, 搭建友好的人机界面, 实现测试用例库的编辑和执行; 采用 Python 语言实现测试用例库的描述, 并能对远程运维服务函数接口、保护测控仿真函数接口的进行调用; 采用动态库 DLL 技术实现 GSP 协议远程运维服务的函数接口定义, 实现对 GSP 报文的生成和解析; 采用动态库 DLL 技术实现与保护测控仿真系统交互的内部总线通信库^[18-19]。由此, 可建立对被测对象远程运维服务的黑盒测试, 同时支持用户自行搭建测试逻辑和测试方法, 整体架构如图 4 所示。

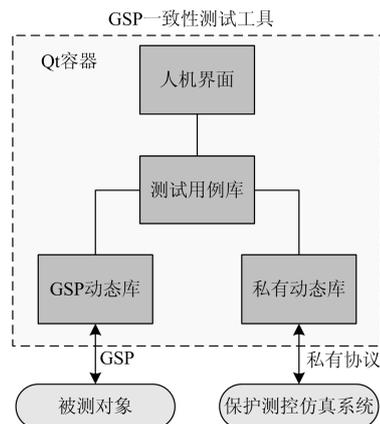


图 4 一致性测试工具软件架构图

Fig. 4 Software architecture diagram of conformance test tool

GSP 一致性测试工具软件平台的主要交互功能如下:

1) 与远程运维被测对象的交互。软件平台可模拟 GSP 客户端向被测设备发送各种远程运维应用服务类的请求报文, 也可作为 GSP 服务端监听被测设备的注册上线等管理服务类的请求报文。测试过程中, 可根据要求选择并执行部分或全部测试用例, 软件自动记录和处理被测对象的反馈信息, 实时输出各测试步骤的测试信息, 最终根据测试用例内的预定逻辑给出相应测试结果分析并自动生成测试报告。

2) 与保护测控仿真系统的交互。通过内部总线完成与保护测控仿真系统的信息交互, 可控制保护测控仿真系统进行远程运维应用服务所需信息的仿真; 同时, 支持接收保护测控仿真系统在测试过程中的实际响应结果。

3.2 GSP 通信动态库设计

GSP 通信动态库按对象单元、参数单元、流数据单元、类描述单元、数据集扩展单元等不同的编

码方式, 针对 GSP 协议内的各类基本服务进行编解码和接口函数的定义, 并面向远程运维所扩展的管理服务及应用服务进行接口函数的扩展。GSP 通信动态库结构如图 5 所示, GSP 通信动态库由主控模块、数据发送模块、数据接收模块构成, 主控模块负责与外部调用 GSP 动态库的测试用例库及内部数据收发模块进行信息交互, 包括协议解析、分包、组包等数据处理; 数据收发模块负责与外部被测对象进行物理层接口的数据收发。

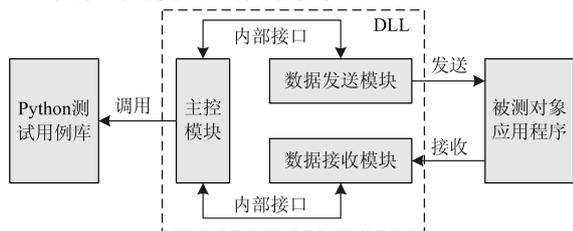


图 5 通信动态库结构图

Fig. 5 Structural diagram of communication dynamic library

面向远程运维相关服务, GSP 通信动态库内定义的动态库接口函数涵盖了关联、注册、申请、监视、远程复位、历史信息调阅、转发表查询、应急管理、参数管理等远程运维相关管理服务及应用服务类别。同时, 在测试用例库内可按测试需求对接口函数进行进一步的封装并调用。

以数据通道信息查询为例对 GSP 动态库函数的定义及调用进行简要介绍, 通道信息查询命令是远程运维转发表查询过程中的一个前置步骤, 获取通道信息后, 可指定相关通道后再进行遥信、遥测等数据的具体查询。

GSP 动态库内通道信息查询的接口函数定义为: RemoteTransTable(TableCmd), 扩展的服务码为 208, TableCmd 内包含了所需传输的相关参数信息, 如表 1 所示。

通过接口的返回值来判断通道查询是否成功, 若失败则退出测试, 返回失败原因。若成功则按测试需求继续调用其他接口函数进一步测试。

表 1 通道信息查询接口

Table 1 RemoteTransTable interface function

接口函数	RemoteTransTable (TableCmd)	
服务码	208	
TableCmd 传递参数	cmd	命令类型, 0 为获取通道信息; 1 为查询转发表; 2 为查询一组指定遥信 idx 的遥信值; 3 为查询一组指定遥测 idx 的遥测值, 其中 idx 为转发表中遥信或遥测的唯一标识
	tabName	转发表名称
	count	查询指定 idx 个数
	buf	遥信或遥测 idx 数组

3.3 测试用例设计

测试脚本是具有正则语法的数据和指令的集合, 测试用例脚本化是实现自动化测试的关键^[20-24]。根据测试用例, 利用脚本语言编写成脚本测试程序, 通过脚本引擎可一次性执行单个或多个测试用例, 很好地实现了测试的自动化。

面向远程运维的管理服务及应用服务的测试集, 设计对应的测试用例库, 包括肯定性测试用例及否定性测试用例, 其中复位服务、历史信息调阅服务、参数管理服务可同时借助保护测控仿真系统进行仿真闭环测试, 其他服务均可直接由一致性测试工具与被测设备进行直接通信完成。肯定性测试时传递正确的标准参数, 否定性测试时传递预设的错误参数, 每个测试用例以最大化的方式覆盖应用所需的各个步骤, 对动态库函数接口进行调用及顺序组合, 并在测试结束后自动出具相应测试报告。

以远程调阅历史 SOE 信息正向肯定性测试用例为例, 测试用例详细流程如图 6 所示。

测试内容: 测试通过远程运维设备调阅变电站间隔设备的历史 SOE 信息, 通过一致性测试工具向保护测控仿真系统下发间隔设备信号动作仿真命令, 一致性测试工具查询远程运维设备间隔信息, 对指定间隔进行历史 SOE 信息召唤, 结果与 SOE 仿真指令进行比对。根据测试内容, 编写测试步骤和预期结果。

测试准备步骤:

- (1) 配置相关连接参数及服务所必须参数, 包括 IP 地址、端口地址、查询间隔、查询时间等内容;
- (2) 配置仿真信息并下发保护测控仿真系统。

测试用例步骤:

- 1) 与被测远程运维设备进行 PING 连接测试;
- 2) 关联被测远程运维设备历史信息 SOE 调阅服务;
- 3) 查询被测远程运维设备间隔列表信息;
- 4) 查询选定间隔的历史信息 SOE 记录;
- 5) 查询结果与仿真信息进行比对并输出测试结果。

预期结果:

- 1) PING 连接测试肯定响应;
- 2) 关联历史信息 SOE 调阅服务肯定响应;
- 3) 查询间隔列表信息肯定响应, 并返回间隔列表信息;
- 4) 查询指定间隔历史信息 SOE 记录肯定响应, 并返回相应 SOE 记录;
- 5) 查询结果与仿真信息比对一致, 输出相应测试报告。

根据测试步骤进行测试用例的设计和实现, 所涉及的动态库函数接口如下。

- 1) PING 连接测试:
ping_tester(ip_dev)
- 2) 关联历史信息 SOE 调阅服务
Associate("", serverRef, "", "")
- 3) 查询间隔列表信息
RemoteHis(byref(hisInfo_bay))
- 4) 查询指定间隔 SOE 信息
RemoteHis(byref(hisInfo_SOE))
- 5) 查询结果及仿真信息的比对
Compare(addr_distant, addr_local)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
232	0.792093	10.30.13.51	10.30.13.102	TCP	54	30015 > 4
233	0.797892	10.30.13.51	10.30.13.102	TCP	66	43406 > 4
234	0.798146	10.30.13.102	10.30.13.51	TCP	66	trc-netp
235	0.798230	10.30.13.51	10.30.13.102	TCP	54	43406 > 4
236	0.798427	10.30.13.102	10.30.13.51	TCP	74	48862 > 4
237	0.798554	10.30.13.51	10.30.13.102	TCP	54	30015 > 4
238	0.805922	10.30.13.102	10.30.13.51	TCP	74	48862 > 4
239	0.805100	10.30.13.51	10.30.13.102	TCP	54	30015 > 4
240	0.807349	10.30.13.51	10.30.13.102	TCP	136	43406 > 4
241	0.808029	10.30.13.102	10.30.13.51	TCP	60	trc-netp

图 7 wireshark 捕获的 GSP 报文

Fig. 7 GSP message captured by wireshark

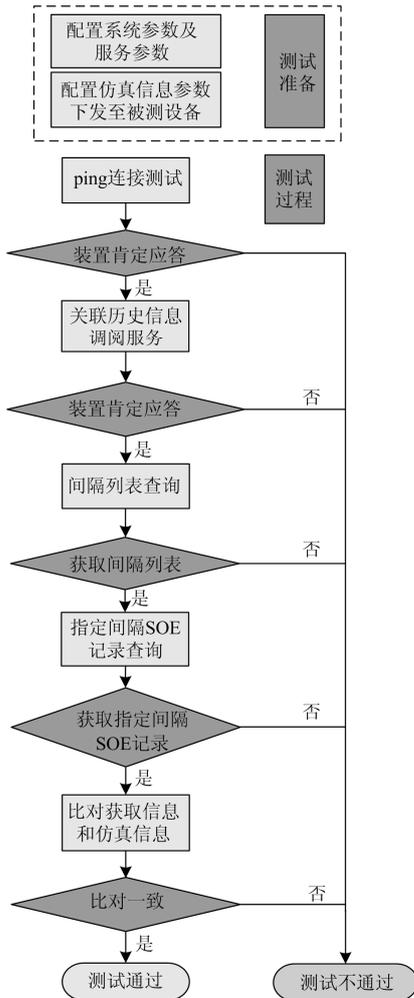


图 6 一致性测试用例详细流程图

Fig. 6 Conformance test case detailed flow chart

利用 wireshark 捕获一致性测试过程中的 GSP 报文如图 7 所示, 截图所示为服务关联报文。

通过以上测试步骤的分析, 即可采用 Python 语法较为简单的编写出相应的测试用例, 具体的测试逻辑判断可根据测试需要进行设计。

4 工程应用

面向变电站自动化远程运维功能的 GSP 一致性测试系统在实验室进行了实验验证, 搭建了图 1 的测试环境, 针对多个不同厂商远程运维子站数据通信网关机等自动化设备进行了一致性测试。通过设定测试参数, 选定单个或多个测试用例, 一键执行所选测试用例, 最终输出测试结果并形成测试报告, 展示给相关测试人员, 测试人员可依据测试报告, 对被测远程运维子站设备进行测试评估, 有效提升了基于 GSP 远程运维服务的一致性测试效率。GSP 一致性测试工具如图 8 所示。

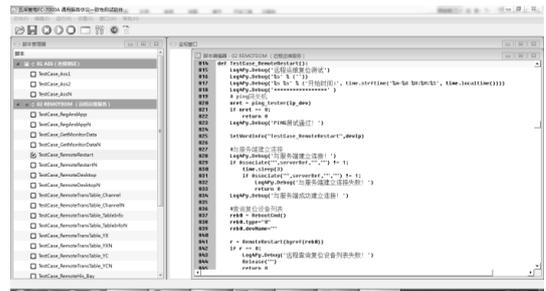


图 8 GSP 一致性测试工具图

Fig. 8 Conformance test tool for GSP

利用上述所搭建的测试环境及测试方法, 针对远程运维管理服务和应用服务分别进行了肯定性及否定性测试, 测试效率如表 2 所示。

动态库函数接口耗时: 描述了各服务主要接口与远程运维被测对象交互的效率, 转发表查询服务的耗时受到转发表内点位数量的影响, 但基本都在 15 s 以内, 除此之外, 其余接口耗时都小于 1 s, 能够满足运维服务实时性的要求。

测试用例耗时: 描述了一个完整的肯定性或否定性测试用例运行开始到运行结束的效率, 整个测试用例的耗时主要受到测试用例设计步骤复杂度及

表 2 测试效率分析
Table 2 Test efficiency analysis

服务名称	动态库接口耗时	测试用例耗时
连接服务	407 ms	10 s
注册及申请上线服务	260 ms	20 s
监视服务	280 ms	5 s
复位服务	250 ms	5 s
历史信息调阅服务	297 ms	10 s
转发表查询服务	小于 15 s	20 s
应急管理服务	281 ms	3 s

测试过程中部分时间等待的影响,但相较于传统人工测试方式,明显地节省了大量测试时间,同时有效减少了人工测试的随机性及盲目性。

目前基于 GSP 的变电站自动化远程运维系统已成功应用于江苏电网南京与苏州地区,远程运维系统接入 200 多座变电站,GSP 一致性测试为远程运维系统的安全可靠运行提供了保障。

5 结语

针对目前电力系统通用服务协议在变电站自动化远程运维方向的应用缺乏一致性测试手段的现状,设计了 GSP 一致性测试系统,开发了面向远程运维服务的 GSP 一致性测试工具,设计了面向远程运维管理服务和应用服务的正反向测试用例,开展相应的肯定性测试与否定性测试,并自动输出测试结果,形成对应的测试报告。同时该一致性闭环测试系统支持针对实际需要,进行测设用例的自定义设计,满足自定义测试的需求。测试情况表明,软件平台性能稳定,能自动完成所需的闭环测试,显著减少测试中的人工干预,具有较高的执行效率、可靠性和严谨性,GSP 一致性测试技术将促进 GSP 实用化的推广。

参考文献

- [1] 辛耀中. 智能电网调度控制技术国际标准体系研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 1-10.
XIN Yaozhong. Research on international standard architecture for smart grid dispatching and control technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 1-10.
- [2] 电力系统通用服务协议: GB/T 33602—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General service protocol for electric power system: GB/T 33602—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [3] 电力系统简单服务接口规范: Q/GWD 622—2011[S]. 2011.
Simple service interface criterion for electric power system:

- Q/GWD 622—2011[S]. 2011.
- [4] 彭志强, 张琦兵, 苏大威, 等. 基于 GSP 的变电站监控系统远程运维技术[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 210-216.
PENG Zhiqiang, ZHANG Qibing, SU Dawei, et al. Remote operation and maintenance technology of substation supervisory control system based on GPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 210-216.
- [5] 万书鹏, 苏大威, 张凯, 等. 支撑变电站自动化系统广域运维的服务管理中心设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 149-154.
WAN Shupeng, SU Dawei, ZHANG Kai, et al. Design and implementation of service management center for substation automation system wide operation and maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 149-154.
- [6] 章立宗, 肖艳炜, 吕宏昌, 等. 基于电力系统通用服务协议的远方程序化操作功能实现方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 108-112.
ZHANG Lizong, XIAO Yanwei, LÜ Hongchang, et al. Research method for implementation of remote sequence control based on general service protocol for electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 108-112.
- [7] 胡绍谦, 李力, 朱晓彤, 等. 提高智能变电站自动化系统工程实施效率的思路与实践[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 173-180.
HU Shaoqian, LI Li, ZHU Xiaotong, et al. Scheme and practice for improving engineering implementation efficiency of smart substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 173-180.
- [8] 姚志强, 吴艳平, 徐歆, 等. 面向智能电网的主厂站一体化关键技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 179-185.
YAO Zhiqiang, WU Yanping, XU Xin, et al. Exploration of key technologies in integration of dispatching center and substation for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 179-185.
- [9] 李江林, 张道杰, 董江虹, 等. 主子站一体化分布式业务架构研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊 1): 43-50.
LI Jianglin, ZHANG Daojie, DONG Jianghong, et al. Research and application about the master-slave station integration of distributed business application architecture[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 43-50.
- [10] 梁旭东, 潘洪湘, 王海峰, 等. 基于电力系统通用服务协议的主子站程序化控制方法[J]. 电气应用, 2017, 36(23): 16-21.

- LIANG Xudong, PAN Hongxiang, WANG Haifeng, et al. Master substation program control method based on general service protocol for electric power system[J]. *Electrical Application*, 2017, 36(23): 16-21.
- [11] 张磐, 郭凌旭, 陈建, 等. 面向一体化监控系统智能告警高级应用的注入测试系统的测试用例设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(22): 137-142.
- ZHANG Pan, GUO Lingxu, CHEN Jian, et al. Design of test case for injection test system oriented to advanced application of intelligent alarm in integrated monitoring system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(22): 137-142.
- [12] 陈国华, 陈纬楠. 变电站自动化设备远程集中运维系统技术方案研究[J]. *电工技术*, 2017(9): 121-122.
- CHEN Guohua, CHEN Weinan. Research on remote centralized operation and maintenance system technical scheme of substation automation equipment[J]. *Electric Engineering*, 2017(9): 121-122.
- [13] 杜鹏. 基于通用服务协议的分布式数据采集系统研究和实现[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2016.
- DU Peng. Research and implementation of distributed data acquisition system based on general service protocol[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2016.
- [14] 郑永康, 魏博渊, 舒鹏, 等. 面向 IEC 61850 服务器一致性闭环测试系统的设计和实现: (一)测试平台和 Ed 1.0 测试用例[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(23): 157-162.
- ZHENG Yongkang, WEI Boyuan, SHU Peng, et al. Design and implementation of closed-loop conformance testing system for IEC 61850 server part one testing platform and Ed 1.0 test cases[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(23): 157-162.
- [15] 吴栋其, 方芳, 李鹏, 等. 面向 IEC 61850 服务器一致性闭环测试系统的设计和实现: (二)Ed 2.0 和国内扩展应用[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(24): 157-163.
- WU Dongqi, FANG Fang, LI Peng, et al. Design and implementation of closed-loop conformance testing system for IEC 61850 server part two Ed 2.0 and extended application in China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(24): 157-163.
- [16] 左欢欢, 彭奇, 王德辉, 等. 基于 SCD 文件的智能变电站交换机自动配置实现[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(1): 91-96.
- ZUO Huanhuan, PENG Qi, WANG Dehui, et al. Implementation of switch automatic configuration of smart substation based on SCD files[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(1): 91-96.
- [17] 李鹏, 范伟, 王罡, 等. 智能变电站 VLAN 配置表自动生成技术的研究和应用[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(1): 122-129.
- LI Peng, FAN Wei, WANG Gang, et al. Research and application of VLAN configuration tables automatic generation technology in smart substation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(1): 122-129.
- [18] ZHOU Yuyong. The research, realization and application of IEC61850 control model for HVDC project[C] // *Proceedings of 2019 International Conference on Artificial Intelligence, Control and Automation Engineering (AICAE 2019)*, 2019: 179-186.
- [19] 周成, 吴海, 胡国, 等. 基于 IEC 61850 第二版非侵入式自动测试系统的研制[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(14): 143-147.
- ZHOU Cheng, WU Hai, HU Guo, et al. Non-intruding development of automatic test system based on IEC 61850 edition 2.0[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 143-147.
- [20] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 121-135. DOI: 10.1186/s41601-019-0123-7.
- [21] LEÓN H, MONTEZ C, VALLE O, et al. Real-time analysis of time-critical messages in IEC 61850 electrical substation communication systems[J]. *Energies*, 2019, 12(12): 2-5.
- [22] LI Zhenhua, LI Hongbin, ZHANG Zhi, et al. An online calibration method for electronic voltage transformers based on IEC 61850-9-2[J]. *MAPAN*, 2014, 29(2): 1-4.
- [23] SHORT M, ABUGCHEM F, DAWOOD M. Tunneling horizontal IEC 61850 traffic through audio video bridging streams for flexible microgrid control and protection[J]. *Energies*, 2016, 9(3): 1-3.
- [24] ALI N H, ALI B M, BASIR O, et al. Protection of smart substation based on WLAN complies with IEC 61850 using traveling wave analysis[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 140: 20-26.

收稿日期: 2019-08-27; 修回日期: 2019-12-03

作者简介:

彭志强(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为厂站自动化技术研究及应用; E-mail: peng_zhiqiang@163.com

徐春雷(1976—), 男, 双学士, 高级工程师, 研究方向为调度自动化专业管理;

张琦兵(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为厂站自动化专业管理。

(编辑 葛艳娜)