

DOI: 10.7667/PSPC161095

基于 IEC 61850 第二版非侵入式自动测试系统的研制

周成^{1,2}, 吴海^{1,2}, 胡国^{1,2}, 何昭辉^{1,2}, 李嘉^{1,2}, 郑洁^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 为了解决智能变电站二次回路测试效率低和安全性不足的问题, 引入了“非侵入式”的概念。基于 IEC 61850 第二版标准和自动测试技术, 研制了非侵入式自动测试系统。首先分析了二次回路测试原理及目的, 其次阐述了“非侵入式”系统的关键技术点。最后结合现场实际运行, 提出引入了“非侵入式”概念后的安全实施方案和测试流程。通过“非侵入式”自动测试系统对智能变电站二次回路进行测试, 实现了工程现场不改变站内装置配置和物理链路, 即完成二次回路的测试工作, 显著提高了工程测试工作的效率及智能变电站运行的安全性。

关键词: 智能变电站; 非侵入式测试; IEC 61850; 自动测试; 二次回路

Non-intruding development of automatic test system based on IEC 61850 edition2.0

ZHOU Cheng^{1,2}, WU Hai^{1,2}, HU Guo^{1,2}, HE Zhaohui^{1,2}, LI Jia^{1,2}, ZHENG Jie^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to solve the problems of low testing efficiency and safety of the two circuits of the intelligent substation, "non-intrusive" concept test is introduced. Based on IEC 61850 second edition standard and automatic test technology, non-invasive automatic test system is developed. Firstly, this paper analyzes the secondary circuit testing principle and objective, then describes the key technology of "non-intrusive" system. Finally, combined with the actual operation, it proposes the introduction of a "non-intrusive" concept of security scheme and testing process. Through non-intrusive type automatic test system of intelligent substation secondary circuit testing, the realization of the project site does not change the station device configuration and physical link, namely, the completion of the testing work of secondary circuit significantly improves the engineering test work efficiency and intelligent substation operation safety.

Key words: smart substation; non-intrusive testing; IEC 61850; automatic test; secondary circuit

0 引言

近年来, 随着智能变电站不断推广, 基于 IEC 61850 第二版标准的智能变电站技术取得了快速发展。智能变电站内二次设备通过 IED 描述, 二次系统以 SCD 形式展开^[1-2]。信息的网络共享化是智能变电站的重要特征, 数字化通信的产生使得设备间使用少量光纤便可替代传统变电站中的大量电缆, 站内设备便可从复杂的硬件回路中解脱。但是在数字化信息网络产生便利的同时, 由于传统硬件回路的消失, 智能变电站在调试和检修时工作量增大, 测试耗时长且效率低, 这些问题与智能变电站中二

次回路数字化、虚拟化, 回路关系复杂有密切的关系^[3-4]。目前在对已投运变电站检修时, 由于智能变电站二次回路上没有传统意义上明显的断开点, 出于安全性的考虑, 通常采取拆除光纤回路, 孤立被测装置和回路的方式, 但这种方式存在以下问题: 1) 智能变电站站内检修时, 拆除的光纤回路在检修完毕恢复后并没有被检测, 检修后光纤回路信号不良的问题屡有发生; 2) 频繁的插拔光纤, 对光纤接头可能造成损坏, 容易缩短设备寿命, 带来设备隐患; 3) 二次回路数量众多, 人工检修的效率低, 工作时间长, 增加了系统恢复的时间^[5]。

针对智能变电站调试和检修时存在的问题, 本文对 IEC 61850 第二版标准进行深入研究, 引入“非侵入”式测试概念, 并根据自动测试技术研制非侵入自动测试系统^[6-7]。非侵入式自动测试技术基于

基金项目: 国家电网公司科技项目“继电保护运行状态远方监测及故障诊断技术研究和示范应用”

IEC 61850 第二版标准，即在不插拔光纤回路，不改变站内装置配置和物理链路的前提下，在计算机软件和智能变电站内装置共同配合的情况下完成自动控制测试。非侵入式自动测试技术能够切合智能变电站继电保护二次回路的数字化和虚拟化的特点，提供了新的检测、调试、试验手段。特别针对变电站改扩建工程，检测影响小、覆盖率高，可以提高检测、调试的效率和质量，保障运行设备的安全，对于支撑大检修在智能变电站的深入开展具有重要意义。

1 非侵入自动测试概述

1.1 非侵入自动测试对象

非侵入测试对象为继电保护二次回路，根据回路两端装置类型，可将继电保护二次回路类型划分为表 1 所示。

表 1 继电保护二次回路类型

Table 1 Type of relay secondary circuit

序号	信号类型	发送端装置	接收端装置	回路承载方式
1	SV	合并单元	保护装置	点对点光纤
2	GOOSE	智能终端	保护装置	点对点光纤
3	GOOSE	保护装置	智能终端	点对点光纤
4	GOOSE	保护装置	保护装置	组网光纤

表 1 内容反映出二次回路包含两层结构。第一层结构是装置与装置之间的物理连接。物理连接由回路发送端装置板件上的 GOOSE 或 SV 发送端口，回路接收端装置板件上的 GOOSE 或 SV 接收端口和两个端口之间的光纤链路承载方式组成^[8]。光纤链路的承载方式，根据回路两端装置的类型而有不同。保护装置间通过 GOOSE 网络进行通信，而保护装置与其他装置则通过点对点光纤连接进行通信。第二层结构是 GOOSE 或 SV 的虚端子连接^[9]。虚端子连接首先通过集成配置工具将发送端装置发送虚端子与接收端装置接收虚端子进行虚端子连线，然后分别导出两台装置的配置文件并下装到装置中实现，装置间的物理连接的正确性和有效性是验证虚端子连接正确的必要条件。

1.2 非侵入自动测试目的

非侵入测试主要验证二次回路装置间物理连接的正确性和有效性，即与光纤连接的装置板件端口正确，光纤链路能够正常的传送 GOOSE 信号，也要验证虚端子连线的正确性，即装置内的虚端子连接配置与工程集成配置一致。故测试内容应包含：1) 发送端装置的 GOOSE 板件发送端口与光纤连接

正确性；2) 接收端装置的 GOOSE 板件接收端口与光纤连接正确性；3) 发送端装置的 GOOSE 发送虚端子能够发送正确的 GOOSE 信号；4) 接收端装置的 GOOSE 接收虚端子能够接收正确的发送虚端子所发送的 GOOSE 信号。

1.3 非侵入自动测试原理

非侵入测试通过加入测试激励后获取测试响应来获得测试结果。由于测试过程中可以利用物理连接，但不能改变物理连接，所以测试激励只能施加在二次回路的发送端装置，测试响应也只能从二次回路的接收端装置获取。通过测试激励控制的发送端装置通过正确的板件端口发送符合测试需要的 GOOSE 信号，接收端装置能够直接或间接地获取测试响应，则可通过比较测试激励与测试响应之间的关系，实现非侵入测试。通过人工方式或报文传送方式均可对发送端装置施加测试激励，但智能变电站内继电保护二次回路的数量多，因此采用自动施加激励的方式更为合理。

由于保护装置同时接入 GOOSE 网络和 MMS 网络，而与保护装置有二次回路关系的过程层设备也通过 GOOSE 网络与间隔层装置进行信息交互，因此可将测试激励以 GOOSE 报文的形式注入 GOOSE 网络，并且报文的地址是指定的发送端装置，则可以对指定的发送端装置施加测试激励，如图 1 所示。

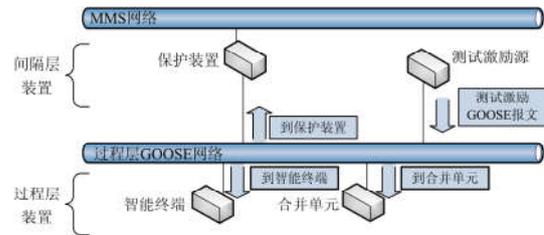


图 1 激励测试网络结构图

Fig. 1 Structure of stimulus testing

为与二次回路的两层结构相对应，测试激励也包含两个部分：第一部分是确定被测试的物理连接的发送端口，即装置、装置的板件、板件上的发送端口；第二部分是确定被测试的二次回路的发送虚端子及其发送数据。通过物理链接关系，装置在收到测试激励后，便可按照要求从指定的发送端口发送指定的 GOOSE 信号。

2 系统构架

2.1 非侵入测试系统构架

非侵入式自动测试系统由装置分系统与测试

控制软件分系统组成。装置分系统由智能变电站内过程层和间隔层装置组成；测试控制软件分系统由运行自动测试控制软件的计算机组成。测试控制软件负责测试流程管控，根据实际需求对 GOOSE 网络施加测试激励，通过 MMS 网络或 GOOSE 网络获取激励响应。间隔层和过程层装置根据测试激励改变发送的 GOOSE 信号以达到测试目的。非侵入式系统结构如图 2 所示。

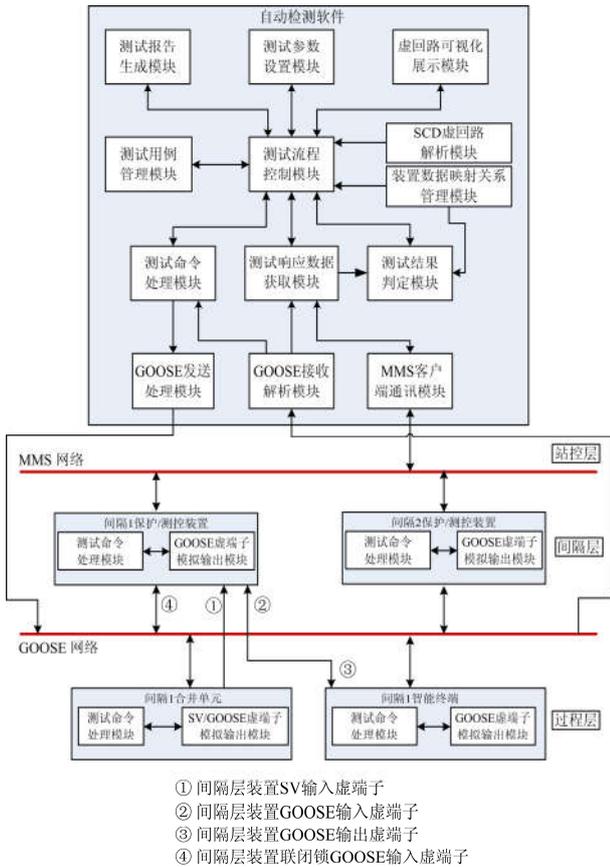


图 2 非侵入式系统结构图

Fig. 2 System structure of non-intruding test

2.2 测试系统软件分系统

测试系统软件采用了基于 RCP 的模块化集成架构技术，具有可扩充性、可管理性、可维护性、高集成度、标准化和模块化的特性。测试系统软件主要包含两方面的内容：一方面实现与装置进行非侵入式测试的交互功能，如自动生成和施加测试激励，自动获取测试响应等；另一方面实现在系统中嵌入非侵入测试相关的操作命令交互接口和相关内容的显示。因此非侵入式自动测试控制软件的软件架构由两层组成，一层由与测试人员交互的相关模块组成，另一层由负责测试处理的模块组成，两层的的关系及其模块如图 3 所示。

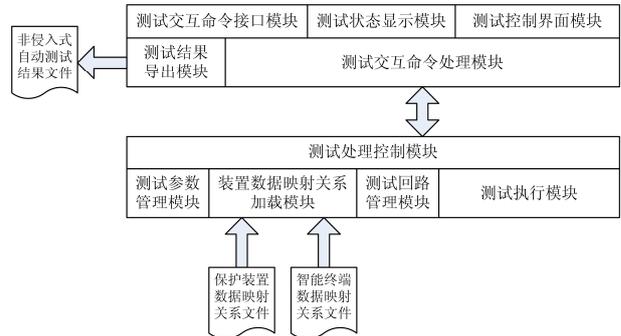


图 3 测试系统软件模块关系

Fig. 3 Relationship of testing system module

3 技术实现

3.1 测试命令和物理端口建模

非侵入自动测试的命令以 GOOSE 报文的形式由自动测试控制软件发出，为了独立于站内的组播 GOOSE 报文，命令报文采用单播方式发送。为区别于站内非控制命令 GOOSE 报文，将通信链路层 APPID 数据域和通信应用层 ConfRev 数据域作为测试命令识别数据域。命令报文中携带的控制参数位于 APDU 中，命令参数与对应数据集中 dsCmd 元素内容存在映射关系，通过对 dsCmd 数据集中属性进行判别，可对测试命令进行控制，以完成相应测试项目。

二次回路发送端装置的发送端口与接收端装置的接收端口的连接关系在 IEC 61850 第一版规范中并没有涵盖。随着 IEC 61850 第二版规范的推出，这一部分的欠缺得到了弥补。在 IEC 61850-6 对 SCL 语法元素中 PhysConn 元素增加了对端口编号和连接光纤的规定^[10]。通过对 PhysConn 元素内 Port 和 Cable 属性进行定义，可对装置的端口进行建模，即可在一个 PhysConn 元素中绑定端口编号与所连接的光纤链路。

3.2 SCL 模型一致性验证

由于 SCD 中新增加了端口连接关系，因此需要在 SCD 校验工具中增加相关的校验功能。例如通过点对点链接的端口，必须只存在唯一一个与其装置端口 cable 值相同的装置。虽然现有的 SCL Schema 文件以 xsd 为扩展名，且能够表达信息要素的所属关系和一些简单的约束关系，比如唯一性约束，存在性约束等，但在表达 IEC 61850 模型信息语义和信息间的相互约束关系时并不充分^[11]。因此，引入 Schematron 模式语言，对 SCD 文件中的信息语义进行更强大的约束检查。通过在 XSD 文件中的根元素 xs:schema，顶层的 xs:annotation 和相关类型定义的 xs:annotation 中添加 Schematron 的命名空间。命名

空间 ns 元素和表示验证规则的 pattern, 就可以将 Schematron 嵌入到 XSD 文件中, 与 Schema 规则成为一体, 实现对 SCL 模型文件的一致性验证。

3.3 测试流程

测试控制软件通过集成配置获取测试所需配置信息后, 根据回路的特征划分为若干回路组, 同一个回路组中的被测试回路共享部分配置信息, 再对每个回路组中的每个被测试回路选择适当的测试用例, 根据测试用例中的过程描述, 通过与保护装置和其他相关装置的交互, 实现非侵入式自动测试。

基于测试用例对回路进行测试需测试控制软件将测例中的描述进行转化, 并与装置进行一系列交互从而最终得到回路测试结果的过程。测试控制软件发往回路发送端装置的测试命令中包含与被测试虚端子有关的命令参数被封装于 GOOSE 报文中, 装置在收到命令后根据参数生成测试用的 GOOSE 报文, 并且停止发送正常的报文, 改为发送测试用的报文。

在回路接收端装置收到测试用报文之后, 测试控制软件根据被测试回路的接收虚端子与其他数据的对应关系, 从回路接收端装置获取测试响应, 再根据前后两次获取到的测试响应是否与相应的测试激励参数相对应, 从而得出测试结果。

在测试结束之后, 测试控制软件还需发送命令通知回路发送端装置的非侵入测试已结束, 装置随即停止发送测试用报文, 恢复到发送正常报文的状况。

测试控制软件与被测试回路的发送端和接收端装置的交互过程如图 4 所示。

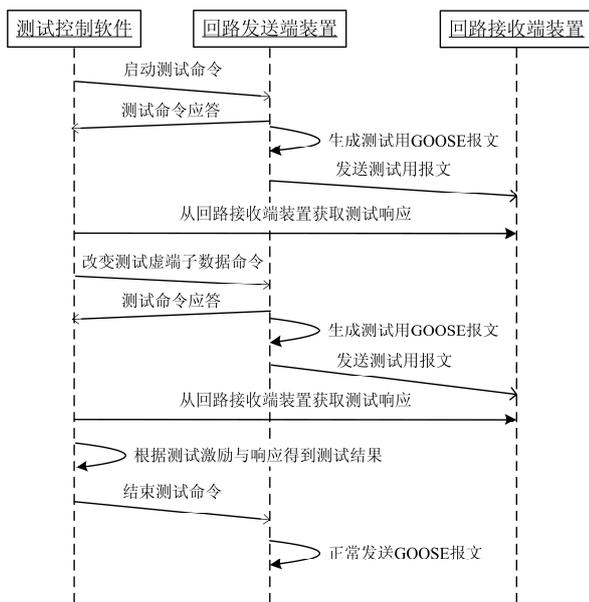


图 4 发送端与接收端交互过程

Fig. 4 Sending and receiving interactive process

4 安全措施与测试

4.1 安全措施

由于进行测试时需要能够控制是否带出口继电器进行测试, 借鉴 IEC 61850 中装置模型定义中 Beh 和 Mod 属性的概念, 可以利用测试闭锁状态进行非出口继电器的测试, 利用测试状态进行出口继电器的测试。因此智能终端装置接收来自保护装置的 GOOSE 信号时, 由测试控制软件发送命令报文, 指定智能终端转换到测试状态或测试闭锁状态。Mod 属性如表 2 所示。

表 2 Mod 属性状态

Table 2 State of the Mod property		
MOD	值	状态说明
工作	1	正常状态
闭锁	2	被动监视过程
测试	3	功能可操作但结果说明作为测试结果
测试/闭锁	4	功能在测试模式下运行但对过程无影响
关闭	5	功能不运行但可显示其配置能力

当智能终端处于测试闭锁状态时, 可以正常接收 GOOSE 报文, 并且根据 GOOSE 报文的处理规则, 在报文中 TEST 标志位与装置自身检修状态一致的情况下, 正常处理接收的报文, 但不动作出口继电器; 而在处于测试状态时, 则不但能够处理 TEST 标志位匹配的报文, 也能够动作出口继电器。

在基建调试站中进行非侵入测试时, 参与测试的二次设备的安全措施具体包括以下过程:

1) 测试开始前按照测试控制软件的提示, 为参测装置投检修压板, 只有此状态下装置可以接收并响应非侵入自动测试的命令报文。

2) 对于智能终端接收来自保护装置的 GOOSE 信号二次回路, 若不需要带出口继电器测试, 则测试控制软件控制智能终端装置转为测试闭锁状态, 若需要带出口继电器测试, 则测试控制软件控制智能终端装置转为测试状态。

3) 对于智能终端接收的来自保护装置的 GOOSE 信号二次回路, 在测试结束后测试控制软件控制智能终端装置转为工作状态。

4) 在测试结束后, 按照测试控制软件的提示, 对参与测试的装置退出检修压板, 装置不再响应非侵入自动测试的命令报文。

4.2 测试

为了验证测试控制软件能够与具备测试配合功能的装置进行正确交互以实现非侵入自动测试, 在智能电网保护和运行控制国家重点实验室搭建了仿真实验环境, 仿真环境模拟 500 kV 智能变电站系

统一部分,运行测试软件的计算机同时连接模拟系统的过程层交换机和站控层交换机,以输入测试激励并获取测试响应。仿真验证环境的网络拓扑结构如图5。



图5 仿真环境网络拓扑结构

Fig. 5 Network topology for simulation verification environment

非侵入式测试系统对全部369个继电保护二次回路中的339个进行了测试,测试覆盖率超过测试回路总数的91%。

5 结论

针对变电站运维过程中存在的问题,本文根据自动测试技术研制非侵入自动测试系统。通过对IEC 61850第二版标准的研究,设计测试命令并建立适用于非侵入系统的模型文件。通过装置分系统与测试控制软件分系统交互,依托实际工程,完成不插拔光纤回路,不改变站内装置配置和物理链路的条件下,进行全站二次回路测试。

通过非侵入式测试系统对站内二次回路进行测试,对智能变电站探索和研究更为可靠的调试和检修技术提供了新的技术方向。非侵入模式的运用消除了以往调试或检修时的不便利性,有效的提高了智能变电站调试和检修的工作效率和安全性。目前,本文提出的非侵入式系统已应用于冀北220 kV蒋兴屯智能变电站,运行稳定。

参考文献

- [1] 智能变电站技术导则: Q/GDW 383—2009[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.
- [2] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 45-48.
HUANG Yizhuang. Smart substation is the further objective of SAS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 45-48.
- [3] 李孟超, 王允平, 李献伟. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 50-56.
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei. Smart substation and technical characteristic analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 50-56.
- [4] 修黎明, 高湛军, 黄德斌, 等. 智能变电站二次系统设计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22):

124-125.

- XIU Liming, GAO Zhanjun, HUANG Debin, et al. Secondary system design method for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 124-125.
- [5] 高翔, 杨漪俊, 姜健宁, 等. 基于SCD的二次回路监测主要技术方案介绍与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 149-154.
GAO Xiang, YANG Yijun, JIANG Jianning, et al. Analysis of secondary circuit monitoring methods based on SCD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 149-154.
- [6] IEC 61850 工程继电保护应用模型: Q/GDW 1396—2013[S]. 北京: 国家电网公司, 2013.
- [7] 鲍伟, 高翔, 沈冰, 等. 智能变电站非侵入测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 125-129.
BAO Wei, GAO Xiang, SHEN Bing, et al. Research method of “non-intruding test” for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 125-129.
- [8] 胡道徐, 沃建栋. 基于IEC61850的智能变电站虚回路体系[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 78-82.
HU Daoxu, WO Jiandong. Virtual circuit system of smart substation based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 78-82.
- [9] 张巧霞, 贾伟华, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123-128.
ZHANG Qiaoxia, JIA Weihua, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123-128.
- [10] IEC 61850-6 communication networks and systems for power utility automation: part 6 configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. 2008.
- [11] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC 61850模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 131-136.
MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 131-136.

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2016-08-18

作者简介:

周成(1987—),男,通信作者,硕士,工程师,从事变电站综合自动化及嵌入式软件在电力系统中的应用等相关研究与开发工作; E-mail: zhoucheng@sgepri.sgcc.com.cn

吴海(1978—),男,硕士,高级工程师,从事变电站综合自动化及嵌入式软件在电力系统中的应用等相关研究与管理工作;

胡国(1978—),男,硕士,高级工程师,从事变电站综合自动化及嵌入式软件在电力系统中的应用等相关研究与开发工作。

(编辑 周金梅)