

基于 OS2 的变电站一体化监控模拟仿真系统的设计与实现

许家焰¹, 陈浩敏², 习伟², 陈波²

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 在基于南方电网一体化运行智能系统的变电站一体化监控系统平台上, 设计和实现了一套完整的变电站二次模拟仿真系统。对系统方案进行了详细设计, 阐述了仿真系统主要技术特点, 同时介绍了系统实现和应用的情况。仿真系统能模拟仿真多个变电站, 不需要继电保护等二次设备即可灵活高效地执行各种静态试验、动态试验和雪崩试验等多种仿真试验。仿真系统与变电站数据完全耦合, 可应用于培训、调试及事故重演和主站测评, 实现成本低。

关键词: 一体化电网运行智能系统; 一体化监控系统; 变电站二次模拟仿真系统; 仿真系统; 继电保护

Design and realization of integrated supervision and control simulation system based on OS2 in substation

XU Jiayan¹, CHEN Haomin², XI Wei², CHEN Bo²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. CSG Scientific Research Institute, Guangzhou 510080, China)

Abstract: On the platform of substation integrated supervision and control system based on operation smart system of China Southern Power Grid, a complete substation secondary simulation system is designed and realized. The scheme of system is designed in detail, and the main technique characteristics of simulation system are elaborated, and the realization and application of system is introduced. The simulation system can simulate a lot of substations, and can execute many simulation tests flexibly and efficiently including all kinds of static tests, dynamic test and avalanche test, etc., without relay protection. The simulation system's data is fully coupled with substation. It can be applied for training, debugging and repeated accidents and master assessment with low implementation cost.

Key words: operation smart system; integrated supervision and control system; substation secondary simulation system; simulation system; relay protection

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)15-0111-07

0 引言

南方电网一体化电网运行智能系统(operation smart system, OS2)^[1-2]遵循 SOA 标准体系, 满足南方电网各级调度主站和 10 kV 以上所有厂站运行业务需求及各方面管理需求, 是新一代电网运行技术支持系统。OS2 建设遵循一体化、模块化和智能化的总体原则, 由各级主站和厂站系统共同组成, 覆盖了电网运行和管理的全过程, 为智能电网安全稳定运行提供了可靠的保障。

OS2 对厂站端二次系统进行融合, 设计了二次系统新的体系架构, 实现了厂站端系统的高度集成。变电站一体化监控系统将变电站传统的后台监控、

远动、保信子站等系统通过智能模块集成到系统中实现一体化, 做到变电站的全景数据统一采集共享, 模块之间通过运行服务总线(operation service bus, OSB)进行信息交换。

变电站二次模拟仿真系统已有的研究主要集中在针对继电保护等二次设备 IED 的模拟仿真设计和实现^[3-10]。这些研究能有效地辅助变电站二次系统调试和验收, 但它们仅是模拟二次设备行为的独立系统, 并不是完整的变电站二次模拟仿真系统。搭建完整的变电站二次模拟仿真系统, 除了不存在测控装置、保护装置、安自装置、智能终端和合并单元等间隔层和过程层的硬件设备外, 应具备变电站所有的二次系统功能。

变电站一体化监控系统因其高度的系统集成可衍生出一种实现整套二次模拟仿真系统的解决方案，方案在一体化监控平台上通过信息的模拟仿真实现二次模拟仿真系统，充分利用了现有技术来扩展新的应用技术。变电站一体化监控模拟仿真系统(简称系统)实现了与变电站数据完全耦合，系统功能齐全，能很好实现模拟仿真的目的，同时不需要多套系统及设备配合使用，显著降低了整套二次模拟仿真系统的成本。

1 设计目标

1.1 培训

系统可用于培训变电站运维人员熟练变电站一体化监控系统的操作流程以及变电站检修规范。还可用于南方电网公司组织变电站二次系统考核竞赛以及院校电力系统相关专业教学实践等。

1.2 调试及事故重演

系统可辅助变电站一体化监控中的后台监控、远动和保信等子系统的调试和验收。还可在变电站事故后进行事故重演，辅助故障分析。

1.3 主站测评

系统可测试评估 EMS 和保信等主站的功能和性能。系统作为主站的数据源，能快速搭建复杂真实的主站系统入网检测环境，解决搭建测试环境的难度，满足实际检测要求，做到评估真实可靠。

2 系统方案

2.1 OS2 厂站扩展

OS2 厂站扩展后系统模块化设计如图 1 所示。

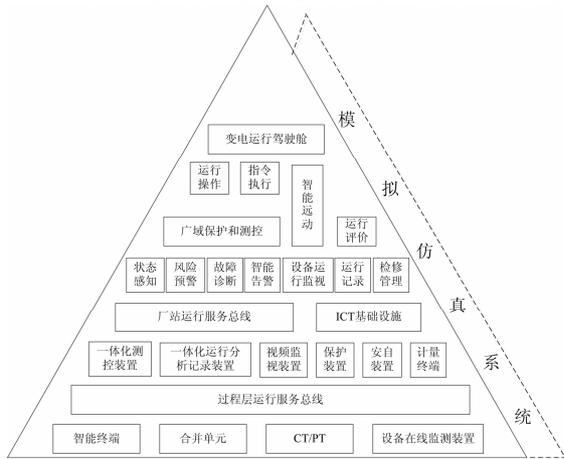


图 1 厂站系统模块化设计

Fig. 1 Modular design of system in substation/power plant

从文献[2]中可知，OS2 厂站系统有十大逻辑划分，共 25 个大模块。根据 OS2 模块化设计原则，

增加二次设备模拟仿真模块(简称仿真模块)可扩展厂站系统功能，从而新增模拟仿真系统为厂站系统的一个逻辑划分。模拟仿真系统是厂站系统的完整拷贝，由仿真模块代替厂站系统的二次设备，模拟仿真二次设备的所有行为，实现厂站系统所有功能。仿真模块经 OSB 标准接口接入厂站系统，与系统其他模块进行信息交互。

2.2 系统架构

变电站一体化监控系统根据 OS2 厂站系统架构进行设计，遵循 OS2 的总体原则，对传统的变电站二次系统进行了继承、集成和发展，让 OS2 在变电站得到很好的实施应用。在变电站一体化监控系统上增加仿真模块，即可实现变电站一体化监控模拟仿真系统。系统架构如图 2 所示。

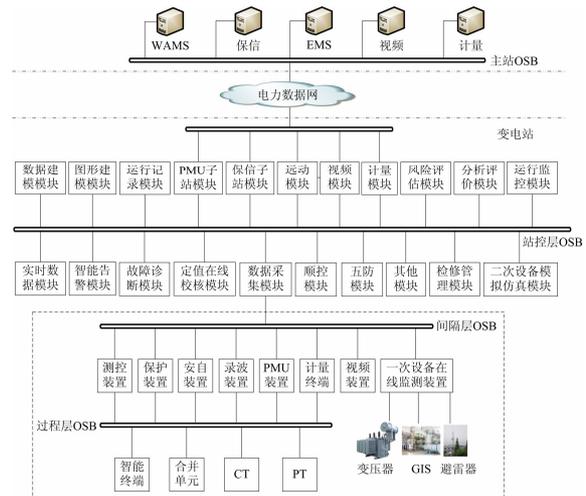


图 2 系统架构

Fig. 2 Architecture of system

系统所有模块通过 OSB 总线经其标准接口进行信息交互，硬件部署灵活。模块可分布式部署在不同的计算机上运行，也可集中式部署在一台计算机上运行。同时，系统运行模块可根据实际需要灵活裁剪，实现“即插即用”。

变电站一体化监控系统通过各智能远动模块对上与各主站系统通信，对内各模块之间通信，对下由数据采集模块与间隔层的二次设备通信，再往下间隔层设备与过程层设备通信，从而实现电网监控、设备监测和运行管理功能。为了简单快速地搭建完整的变电站一体化监控模拟仿真系统，配置数量众多的间隔层和过程层设备显然不现实，从而突出了仿真模块在系统中的关键地位。

2.3 仿真模块设计

仿真模块在系统中通过 OBS 总线与其他模块交互信息，与传统模拟仿真装置通过规约通信交互

信息相比, 由于减少了中间环节可显著提高系统效率。仿真模块通过各种策略模拟仿真设备的行为, 这些行为主要包括遥信、SOE、遥测、遥控、

遥脉、定值操作、故障量、录波等。

仿真模块流程示意如图 3 所示, 图中详细地描述了仿真模块的所有业务流程。

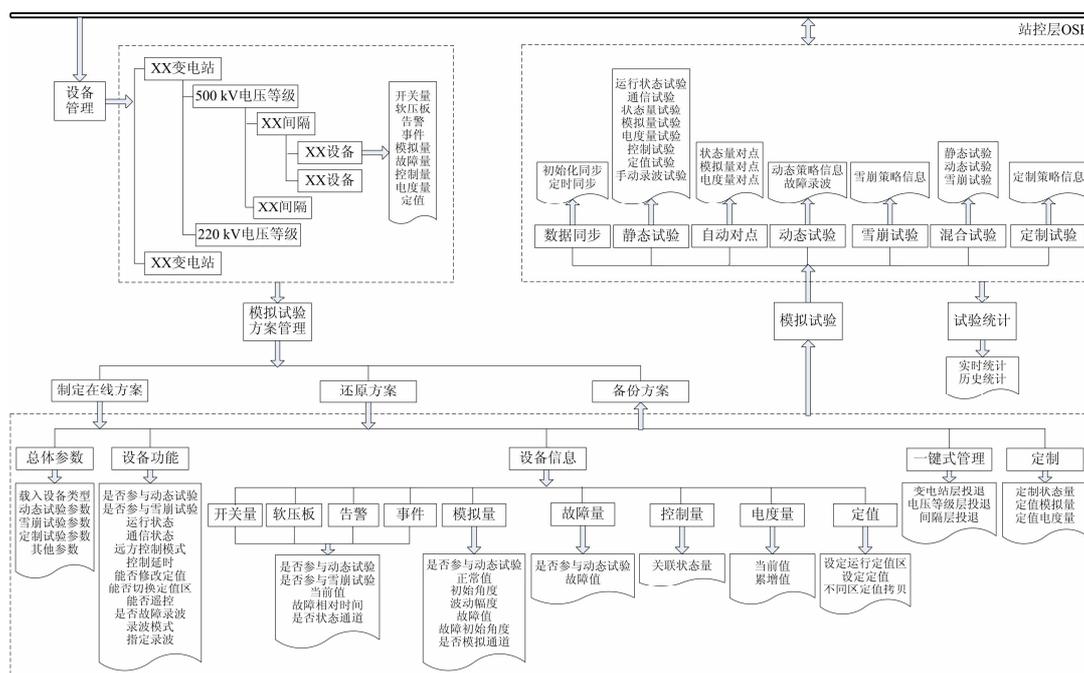


图 3 仿真模块流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the similar module flow

2.3.1 设备管理

仿真模块进行简单设备管理, 通过选择保护装置、测控装置等设备类型加载系统中相应设备参与模拟仿真。设备管理以变电站为单元进行分层管理, 变电站层再依次划分电压等级层、间隔层、设备层。变电站层、电压等级层和间隔层都可通过设备表管理所属的设备, 设备表展现设备的各项功能。设备层展现设备的基本信息和各类信息, 基本信息包含设备各项功能, 各类信息根据设备配置可分为开关量、软压板、告警、事件、模拟量、故障量、控制量、电度量、定值、模拟通道和状态通道等信息。

2.3.2 模拟试验方案管理

模拟试验方案为模拟试验提供数据依据, 方案管理为制定模拟设备的行为策略提供手段, 保障正常模拟仿真设备的一系列行为。

2.3.2.1 制定在线方案

制定在线方案是指仿真模块运行过程中随时制定修改的方案, 可即时生效使用, 增强了仿真的实时性。仿真模块运行的在线方案也可称为实时方案。

制定方案包括设置系统的总体参数, 通常采用默认值, 可根据试验需要重新设置; 在变电站层、电压等级层、间隔层的设备表和设备层的基本信息

均能对该层所属设备功能进行设置; 在设备的各类信息中设置开关量、软压板、事件和告警等状态量、模拟量、故障量、控制量、电度量、定值, 模拟通道和状态通道等设备基本元素信息; 根据不同的个性化需求, 定制不同的方案进行试验, 可用于现场事故重演和远动对点测试等; 变电站层、电压等级层和间隔层采用一键式管理, 通过运行键即可设置所属设备是否参与模拟试验。制定方案过程中充分考虑操作简单和灵活的原则, 强调用户体验。

2.3.2.2 方案备份及还原

方案制定完后应进行方案备份, 备份方案是按照定义的 XML 格式保存为方案文件。方案备份用于保存工作成果, 避免无效的重复劳动。

需要还原试验场景时, 可通过方案还原将方案文件解析为运行的在线方案。方案还原用于复现保存的方案, 提高工作效率。

2.3.3 模拟试验

模拟试验是模拟仿真设备的行为, 设备参与相应的模拟试验应满足设定的试验条件, 仿真模块能否模拟试验由模块的运行键进行总控制。

2.3.3.1 数据同步

数据同步是将模拟设备的状态量、模拟量和电

度量等数据同步到系统中保持一致。数据同步分为初始化同步和定时同步。初始化同步包括仿真模块投入运行后同步所有符合试验条件的设备数据，运行过程中通过变电站层、电压等级层、间隔层投入运行以及设备投入运行或通信恢复等让设备符合试验条件后同步设备数据。定时同步是运行过程中定时同步所有符合试验条件的设备数据。

2.3.3.2 试验

在模拟设备符合试验条件时，可通过静态试验项目测试设备通信状态、单点变化和定值操作等基本功能；对设备状态量、模拟量和电度量分别进行自动对点，可批量验证远动或保信系统配置设备信息的正确性；根据制定的动态试验和雪崩试验策略，可分别触发仿真模块总的动态试验和雪崩试验，也可分变电站层、电压等级层、间隔层以及设备层触发相应的动态试验和雪崩试验，试验在结束前可随时中断试验；根据制定的定制策略，可对定制的状态量、模拟量和电度量等信息进行自动对点、雪崩试验、事故重演等定制试验；为了测试主站系统的稳定性和可靠性，有时需要同时进行多种试验。比如，动态或雪崩试验过程中，执行静态试验；同时执行动态和雪崩试验，甚至再执行静态试验；多个变电站同时执行动态或雪崩试验等混合试验。

2.3.4 试验统计

试验统计提供试验信息记录、结果统计和试验信息查询管理等功能，用于检查比对被测系统的试验结果。试验统计包括实时统计和历史统计，分别由实时库和历史库实现。

3 技术特点

3.1 模型管理

系统数据建模和图形建模由系统集成的一体化工具实现，可对变电站全景数据进行统一管理。

数据建模可导入设备CID/ICD模型建立变电站全站SCD模型，也可直接导入SCD模型，并实行严格的SCD模型管控。同时可配置导出远动和保信子站所需的信息表，支持基于IEC 61970扩展模型进行模型转换，通过CIM模型实现变电站内外信息共享。图形建模可通过功能强大的图元库手动或自动绘制电力系统一次接线图等监控图形，也可导入或导出SVG文件实现变电站内外图形共享。

为了实现快速搭建多变电站测试环境，实现系统的集控技术，一体化工具不仅支持多变电站模型管理，而且支持变电站克隆技术。

3.2 集控技术

为了更多地挖掘系统的潜力，系统支持模拟多

个变电站同时运行，实现部分变电站集控技术。因此，系统除了支持对多变电站进行模型管理外，多变电站同时运行时的智能告警、实时数据库、历史数据库以及运行监控等一系列功能均以变电站为对象进行统一管理。

在测试主站系统时，系统模拟仿真多变电站同时运行能提供主站实际运行环境。硬件资源高配置时，同时模拟仿真的变电站数可达到255个，每个变电站接入二次设备数可达到255个。

3.3 智能远动

远动模块可通过IEC 101和IEC 104等远动协议与EMS进行通信，在模拟测试多变电站与调度主站通信或变电站与多调度主站通信时，因串口数量限制及通信效率等原因，可主流测试IEC 104。保信子站模块可采用南网继电保护故障信息系统通信与接口协议与主站通信，也可采用其他保信主子站协议或IEC 61850通信。除了IEC 61850，其他通信协议均支持通道报文解析和保存。

系统支持同时与多主站进行通信，硬件资源高配置时，远动或保信子站同时以太网通信的主站数量可达到255个。

3.4 虚拟IP技术

TCP通信时主站是客户端，厂站是服务器端，主站与系统中的不同变电站进行独立通信，应分配给变电站不同IP地址。主子站通信服务器端口号通常都固定，常用2404，而操作系统是禁止服务器端不同IP地址重复绑定同一端口进行侦听。解决问题的直接办法是给变电站分配不同IP地址和端口号，但与实际运行环境不符，而且增加了重新分配和设置变电站端口号的工作量。为了实现服务器端不同IP地址绑定同一端口，系统实现了虚拟IP技术。多变电站同时运行时，系统虚拟IP功能启用后通过获取配置的变电站IP地址，直接虚拟变电站IP并分别初始化2404端口用于主子站通信。

虚拟IP通信连接如图4所示。

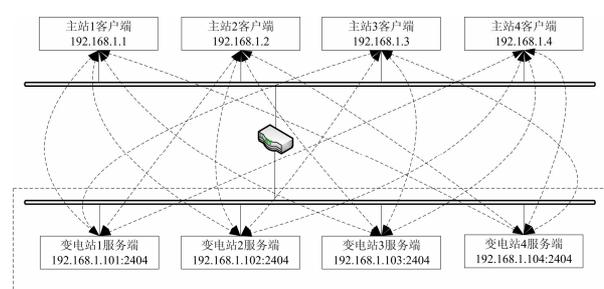


图4 虚拟IP通信连接

Fig. 4 Communication link of VIP

3.5 故障触发器

仿真模块的动态试验功能由故障触发器来实现, 故障触发器主要包括故障信号单元和故障录波单元。故障信号单元根据动态试验策略按照时序重新排列故障设备的故障信息, 并顺序发出故障信息消息。策略中制定了故障录波, 故障触发器在发送完所有故障信息后, 故障录波单元按照规则生成故障设备相应的故障录波文件并发出简报消息。

电力系统采样信号可表示为

$$x(t) = A(0)e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M A(n)\sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中: $A(0)$ 为直流分量; τ 为衰减时间常数; $A(n)$ 和 φ_n 为 n 次谐波的幅值和初相角; ω 为基波分量的角频率。为了简化录波, 可假设电力系统为理想系统, 不存在直流分量和谐波分量, 只有基波分量。进一步简化转换后, 采样计算公式可表示为

$$x(k) = A\sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \varphi\right) \quad (2)$$

式中: $N=f_s/f$ 为一周波采样点数(f_s 为采样频率, f 为信号频率); $A=\sqrt{2}U$ 或 $A=\sqrt{2}I$ (U 为电压有效值, I 为电流有效值); 以 $k=0, 1, 2, \dots$ 计算采样点值。

故障录波单元采用式(2)计算故障设备模拟量通道采样值, 并结合故障信息关联的状态量通道变化, 生成录波 COMTRADE 文件。式(2)计算所需故障前后的电压或电流有效值以及初始角度, 制定动态试验策略时可灵活设置。另外, 故障触发器提供典型故障的录波文件生成策略, 故障重演时可直接关联变电站实际的故障录波。

模拟配置四方公司的 CSC101D 和 CSC103D 两套保护 220 kV 线路出口处发生 A 相金属性接地永久故障, 故障触发器流程如图 5 所示。生成的故障录波如图 6 所示, 图中分别展示了 CSC101D 故障开始保护动作单跳的波形, CSC103D 重合闸后保护再次动作三跳的波形。



图 5 故障触发器流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the fault trigger flow

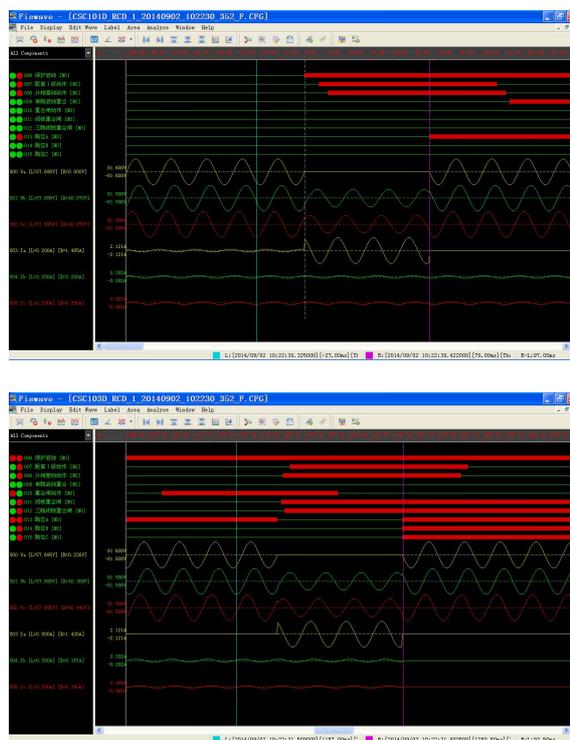


图 6 故障录波图

Fig. 6 Diagram of the fault recording file

4 系统实现

系统基于四方公司的一体化监控系统平台开发实现, 是南方电网科学研究院电网自动化实验室子站模拟系统科技项目的研究成果之一。

平台采用中间件技术, 能运行在多种操作系统和各种硬件平台上, 具有很好的可移植性; 平台采用面向对象设计, 以变电站为对象进行管理已具备一定的集控技术基础, 能满足多变电站模拟运行要求; 平台采用软件分布式设计, 能实现系统模块分布式或集中式硬件部署; 平台能实现变电站一体化监控的所有功能。因此, 在此平台上实现本系统, 主要工作是开发仿真模块以及实现多变电站运行模式下主子站通信时虚拟 IP 技术和一体化工具变电站克隆技术等满足本系统要求的一些适应性开发, 实现工作量并不太大。

仿真模块基于 QT 开发环境采用面向对象编程思想, 根据功能需求进行模块化分层设计, 实现模块的智能化, 易于扩展模块功能, 维护简单。仿真模块软件结构如图 7 所示。

仿真模块的 UI 设计采用友好简洁的人机界面, 操作简单, 试验策略制定灵活且大部分试验参数默认值满足通用要求, 能提供良好的用户体验。UI 设计如图 8 所示。

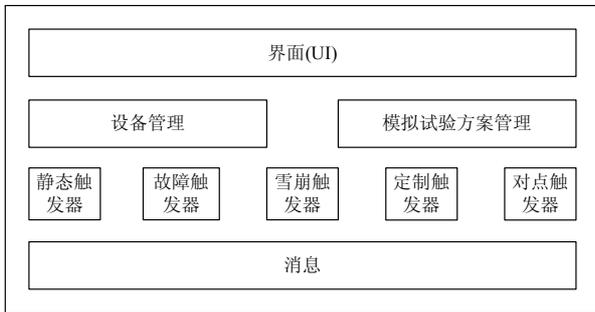


图 7 仿真模块软件结构

Fig. 7 Framework of the similar module software

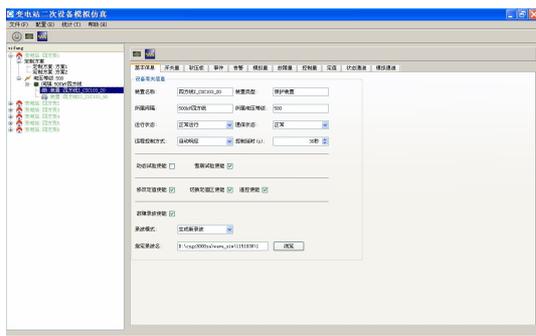


图 8 仿真模块 UI 设计

Fig. 8 UI design of the similar module

5 系统应用

为了满足系统性能且节约成本，系统主机硬件采用一台华为 RH2485 V2 服务器，硬件资源 CPU 为 4 路(6 核/路)，主频 2.2 GHz，内存 16 GB，显存 512 MB，硬盘 600 GB，网卡 4 块(2 口/块)且速率 100/1 000 M 自适应等，主机操作系统采用 LINUX 操作系统。系统模拟 50 个变电站运行，每个变电站总共包含 200 台左右的测控和保护。系统应用过程具体步骤如下。

1) 一体化工具配置

一体化工具通过直接导入一个 200 台左右设备的变电站 SCD 模型配置一个变电站，或新建一个变电站导入部分设备的 CID 模型后再克隆电压等级或间隔。然后导入、手动或自动绘制变电站一次主接线图和全站设备通信状态图等监控界面图形。再直接克隆 49 个变电站使得系统满足 50 个变电站运行要求。最后每个变电站远动导出 10 个 RTU 配置，保信子站导出 10 个主子站配置。

2) 模拟测试方案配置

仿真模块启动运行或重新选择加载相应类型的设备参与模拟试验，然后配置每个变电站的静态试验策略、动态试验策略、雪崩试验策略以及定制试

验策略等。方案配置完成后备份方案文件，以后就可直接导入方案文件还原试验场景。模拟试验过程中也可随时在线修改方案。

3) 模拟试验

仿真模块运行键启动后，开始模拟试验。首先，用监控模块逐一验证模拟试验的正确性，进行各个变电站的设备通信中断恢复、开关量变位、定值操作等静态试验，进行设备状态量和模拟量等自动对点试验，进行模块层、变电站层、电压等级层或设备层的动态试验或雪崩试验，进行定制试验以及混合试验等。然后，启动远动模块或保信子站模块进程以及通信服务器进程监听每个变电站 IP 的 2404 端口等待主站连接。主站连接三次握手建立通信后，根据测试大纲要求进行静态试验、动态试验、雪崩试验等一系列模拟试验验证主站功能和性能。

项目实施后期，电网自动化实验室组织四方公司等多家保信主站系统进行测试。系统充分发挥出自己的优势，快速搭建上述模拟测试环境，详细测试了各家主站系统的各项功能和性能。静态试验检测主站的基本功能，动态试验检测主站故障报告整理及分析等高级应用功能，海量数据的雪崩试验检测主站数据处理能力，混合试验检测主站可靠性和稳定性。整个测试过程比以往提供了更充分更真实的测试环境，测试周期明显缩短、效率显著提高。测试取得了满意的结果，不同程度检测出被测主站功能和性能方面的缺陷。

6 结语

系统基于 OS2 的变电站一体化监控系统现有技术基础设计和实现，大幅度缩减了开发成本，还保证了系统功能的完备性和扩展性。通过系统应用表明，系统能快速搭建完整高效的变电站二次模拟仿真系统，实现了既定的设计目标，具有良好的经济效益和社会效益。

参考文献

[1] 汪际峰. 一体化电网运行智能系统的概念及特征[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 1-6.
WANG Jifeng. Concept and features of integrated grid operation smart system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 1-6.

[2] 汪际峰. 南方电网一体化电网运行智能系统建设初探[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 1-5.
WANG Jifeng. A preliminary investigation on development of operation smart system for China Southern Power Grid[J]. Southern Power System

- Technology, 2012, 6(2): 1-5.
- [3] 黄曙, 梁晓兵, 高新华, 等. 变电站自动化系统实时仿真装置的设计与实现[J]. 继电器, 2007, 35(4): 49-52.
HUANG Shu, LIANG Xiaobing, GAO Xinhua, et al. Design and realization of real time simulator for substation automation system[J]. Relay, 2007, 35(4): 49-52.
- [4] 唐喜, 任雁铭, 孟岩. 基于 IEC 61850 的数字化变电站服务器端模拟系统及实现[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 46-49.
TANG Xi, REN Yanming, MENG Yan. Digital substation server simulation system based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 46-49.
- [5] 刘焕志, 胡剑锋, 李枫, 等. 变电站自动化仿真测试系统的设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 109-112.
LIU Huanzhi, HU Jianfeng, LI Feng, et al. Design and implementation of simulation test system for substation automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 109-112.
- [6] 黄树帮, 窦仁晖, 梅德东, 等. 基于 IEC61850 标准的通用 IED 仿真系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 153-158.
HUANG Shubang, DOU Renhui, MEI Dedong, et al. Design and implementation of general IED simulation system based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 153-158.
- [7] 邸凯, 常鲜戎, 刘寒. 圈定保护起动范围的变电站继电保护仿真模型的开发[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 134-138.
DI Kai, CHANG Xianrong, LIU Han. Substation protective realy simulation model improved by identifying area of relay pickup[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 134-138.
- [8] 周鹏鹏, 李书琰, 李志勇, 等. 基于 IEC61850 的数字化新型仿真试验平台的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 120-124.
ZHOU Pengpeng, LI Shuyan, LI Zhiyong, et al. Research on digital new simulation test platform based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 120-124.
- [9] 李亚萍, 李志勇, 周鹏鹏, 等. 新型实时数字仿真继电保护测试系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 90-95.
LI Yaping, LI Zhiyong, ZHOU Pengpeng, et al. Research of realy protection testing system based on new type real-time digital simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 90-95.
- [10] 徐得超, 刘巍, 朱旭凯, 等. 含大量继保和安自装置的连锁故障并行仿真软件研发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 132-138.
XU Dechao, LIU Wei, ZHU Xukai, et al. Research and development of cascading failure simulation software containing many relaying protections and automatic safety devices[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 132-138.

收稿日期: 2014-10-30; 修回日期: 2015-03-25

作者简介:

许家焰(1976-), 男, 硕士研究生, 研究方向为变电站自动化技术; E-mail: xujiayan@sf-auto.com

陈浩敏(1977-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电网自动化技术;

习伟(1980-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为变电站继电保护和自动化技术。

(编辑 葛艳娜)