

# 智能变电站二次系统通用测试平台方案

陈德辉<sup>1</sup>, 王丰<sup>2</sup>, 杨志宏<sup>1</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 华北电力科学研究院有限公司, 北京 100045)

**摘要:** 提出了一种结构灵活、功能可配的智能变电站二次系统通用测试平台方案。通过双向接口整合动态模拟、数字仿真等系统资源, 建立不同电压等级变电站一次系统模型、设备运行环境。通过配置文件、物理设备构建智能变电站系统级通用平台, 可以在智能变电站系统环境下对继电保护、时钟同步系统、网络架构、高级应用等对象的闭环测试。建设的通用测试平台在事故反演与分析、工程调试, 尤其是在国家电网公司二次设备入网检测工作中发挥了重要作用, 具有较好的创新性与较强的实用性。

**关键词:** 智能电网; 智能变电站; 二次系统; IEC 61850; 测试平台

## Unified test platform for smart substation secondary system

CHEN Dehui<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, YANG Zhihong<sup>1</sup>

(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

**Abstract:** A unified test platform scheme with flexible structure and configurable function is presented. The primary system model and environment of which equipment runs with different voltage levels are constructed by integrating physical and digital simulation system, etc. through bi-directional interface. The unified system-level test platform for smart substation is also launched by employing configured file and physical device, by which the requirements for closed-loop test can be achieved for relay protection, time synchronization system, network architecture and advanced applications, etc. The platform plays a key role in fault replay and analysis, project debugging, especially in the verification test of secondary device for State Grid Corporation of China. The result shows the better innovation and strong practical.

**Key words:** smart grid; smart substation; secondary system; IEC 61850; test platform

中图分类号: TM764

文章编号: 1674-3415(2016)01-0139-05

## 0 引言

智能变电站是随着智能电网的发展而出现的新模式。在专业上, 由早期的继电保护、自动化等单一专业向多专业相互融合的方向发展, 并不断融入信息通信、时钟同步等新的专业<sup>[1-3]</sup>。在功能上, 由早期各自装置孤立实现向基于站域信息的功能重组与分配的方向发展, 并不断出现站域控制、智能告警等新的功能。在模式变化的同时, 对智能变电站系统的测试项目较常规有了较大的变化, 现有的测试手段已无法满足实际需求, 亟需从系统角度整合各专业需求并构建与之相适应的平台, 以满足对智能变电站二次设备单体, 系统级的功能、性能的闭环测试<sup>[4-5]</sup>。

**基金项目:** 华北电网公司“智能变电站二次设备仿真测试系统”科技项目

## 1 系统总体架构

测试平台正常工作除自身的有机组成外, 离不开外围系统的配合, 主要包括: 数字仿真、动态模拟、规约测试、信息安全、调度自动化、配电网等系统。图1给出了各系统之间的关系。

其中, 数字仿真系统主要由RTDS组成, 承担不同一次系统的数字建模, 通过功率放大设备、开入开出模拟接口与测试平台连接。动态模拟系统作为对数字仿真的有效补充, 尤其在数字仿真缺乏有效模型支撑的时候, 与数字仿真系统通过双向功率设备相连。规约测试系统主要完成电力系统不同协议仿真体的实现, 如: MMS、IEC 60870-103等, 以满足对协议一致性测试、互操作测试等业务的需求。

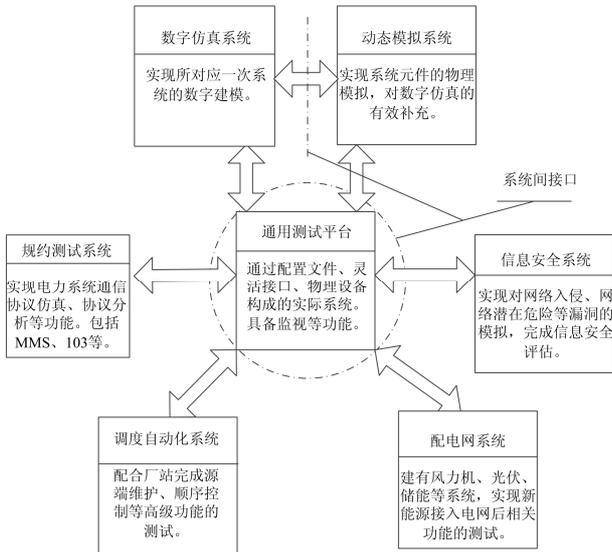


图 1 各系统间关系图

Fig. 1 Relationship between different systems

调度自动化系统主要是承担对调度系统的模拟和仿真，通过通信网与测试平台的远动工作站相连接。信息安全系统主要是模拟各种网络攻击事件，以便掌握不同网络安全事件下智能变电站系统的运行情况，及时发现系统存在的安全隐患。与配网自动化系统的配合主要是为了适应当前大量新能源接入对继电保护、无功补偿等设备测试的需要。

## 2 通用平台设计

### 2.1 平台系统架构

通用平台的体系架构依据智能变电站系统，遵循 IEC 61850 标准建议的三层结构模式，包括：站控层、间隔层、设备层。图 2 给出了通用平台的系统架构图。站控层主要包括监控系统、时钟同步系统、远动工作站系统以及智能网关机，主要完成对系统运行信息的采集、分析以及与主站、站间的互动。间隔层主要包括继电保护、综合测控等，作为过程层与站控层之间的转发层，一方面完成信息的收集与转发，另一方面完成继电保护与控制功能。过程层主要包括电子式互感器、合并单元、智能终端等与一次设备相关的设备，与仿真系统的接口相连，形成信号的闭环。

### 2.2 系统接口

系统接口主要包括逻辑接口和物理接口两部分，前者是测试平台与系统仿真、调度自动化等系统之间在功能上的接口，如：采样值接口、保护跳合闸接口、与主站的远动接口等；后者是测试平台与外围连接时所采用的光纤、电缆的物理接口，涉及到实际电信号和光信号转接、互联等。在考虑到

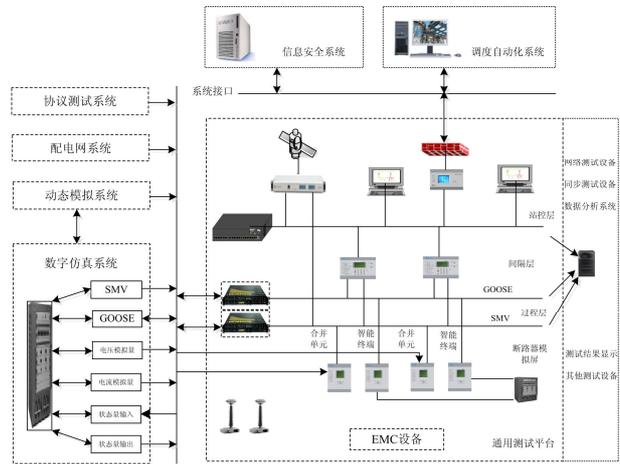


图 2 通用平台的系统架构图

Fig. 2 System architecture of unified platform

光纤和电缆连接方便的基础上，将不同电信号和光信号进行整理，以达到信号分类，整体连接，满足通用平台根据不同测试需求在物理结构上灵活、方便的要求。

借鉴模拟屏的经验采用相应的配线箱，每个模块定义好相应的功能信息。测试时避免了将系统之间的连接线重复连接的工作。图 3 是系统实际接口图。



图 3 系统接口

Fig. 3 System interfaces

### 2.3 辅助系统

辅助系统为测试平台的正常工作提供必要的工作电源、监视分析设备，对设备的运行状况提供必要的状态监视、设备监控和接地。主要包括三个方面的内容：电源系统、安全控制系统、记录分析显示系统。图 4 为辅助系统组成。图 5 为测试系统监控中心。

(1) 电源系统：包括市电系统、直流系统，为系统的正常运行提供必要的电源。

(2) 安全、控制系统：包括环境监控系统、设备监控、设备运行状态监视、安防、空调等。

(3) 记录分析显示系统：包括测试数据记录、分析，网络性能记录、分析，测试结果显示系统等。

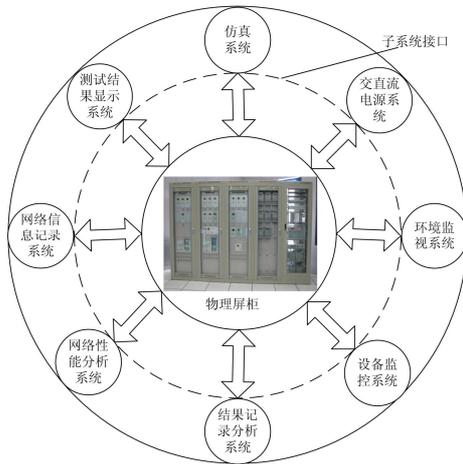


图 4 辅助系统图  
Fig. 4 Auxiliary system



图 5 测试系统监控中心  
Fig. 5 Monitor centre of test system

### 3 运行控制策略

测试平台的运行与实际系统有很大的区别。前者要求系统架构灵活多变，能够适应多种系统测试的需求，而后者一经建成可以固定不变。因此，需要考虑测试平台对实际需求的满足程度，也就是采用何种系统控制策略，本平台主要从一次系统、二次系统以及系统配置三个方面考虑。

一次系统部分：以典型间隔单元为最小单位，在实际测试时，可根据需要对一次系统进行自定义，通过与系统仿真实验室的协同工作可以将电压等级定义为 750 kV、500 kV、330 kV、220 kV 以及 110 kV 等。一次接线可以定义为 3/2、双母线、单母分段等方式，可以满足实际中的需求。

二次系统部分：继电保护的配置依据最大化的原则。测控等设备的配置依据功能满足的原则。通过系统的 CID 配置完成装置功能的裁剪，满足不同元件对继电保护功能配置的需求。监控系统通过调用预设的 SCD 等系统文件来满足实际测试的需求。在实际测试中可以通过对不同 SCD 的调用来满足测试需求。

系统配置描述：本部分主要完成不同智能设备

之间的虚连接，尤其是 GOOSE、SV 的连接。充分利用 IEC 61850 标准应用带来的互操作性，实现 ICD 文件与实际设备的解耦。实际测试中以装置对外接口为界面，设备的更换只需通过接口屏出线缆的更改，避免每次测试带来整体的改接线等繁琐工作。

### 4 测试平台的应用

测试平台可应用于智能变电站二次系统的静态测试和动态测试。静态测试主要是依据预先生成的数据文件或现场故障录波文件，通过平台将其行为反演出来，方便问题分析。动态测试主要是通过仿真系统进行建模，实现仿真系统与被测系统之间信息的实时交互，更直观体现系统的行为<sup>[5]</sup>。

#### 4.1 继电保护事故分析

某 500 kV 变电站—500 kV 线路距离保护因单相接地跳闸，但是重合失败。采用保护动作时装置的录波数据，将此基于 Comtrade 格式的数据在 Matlab7.0 环境下进行处理，封装成符合 IEC 61850-9-2 格式的数据帧并下装至相应合并单元，装置 CID 文件与现场一致。测试架构如图 6 所示。

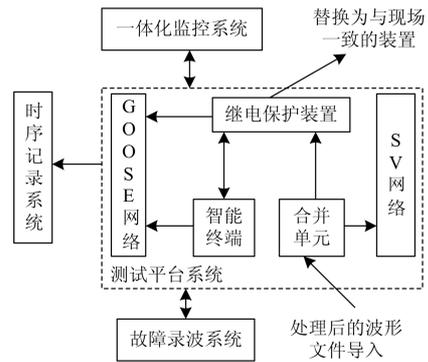
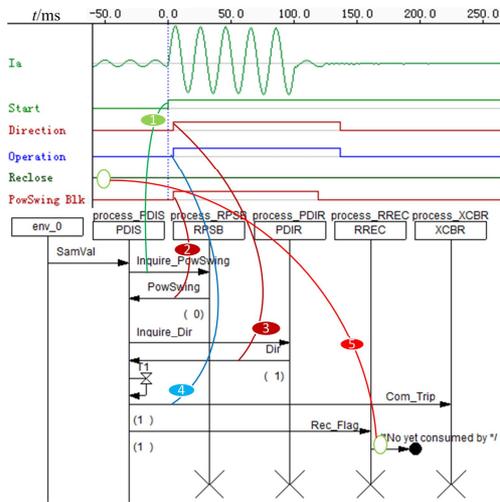


图 6 保护测试系统架构图  
Fig. 6 Architecture of protection test system

图 7 为保护动作波形与相应的元件动作时序对照图。

从图 7 波形可以看出，线路 0 ms 左右系统发生单相接地，约 120 ms 后切除故障，重合失败。保护启动时，振荡闭锁开放标志同样瞬时变位，虽然系统没有发生振荡，但是此时此标志还是即时开放了 100 ms 左右，此时序列图中振荡判别元件返回为“0”，直观反映了系统当时无振荡的状态。距离元件向智能终端发送跳闸命令，断路器成功跳闸。随后，向重合闸元件成功发送重合命令，但没有被重合闸元件接收到，导致重合失败。此时，很直观反映出保护正确动作，基本确定问题存在于智能终端或者重合虚端子连线，经检查为 GOOSE 连线配置错误，改正后系统验证正确。



注：图中 PDIS、RPSB、PDIR、RREC、XCBR 分别代表距离保护、振荡判断、方向判别、重合闸以及断路器元件，模型均遵循 IEC 61850 标准。

图 7 动作波形与相应的元件时序图

Fig. 7 Operation wave and corresponding component sequence chart

#### 4.2 网络流量、传输延时测试

根据 IEC 61850 标准中要求 GOOSE 报文必须在 4 ms 内被传输的规范，评估某 500 kV 变电站 GOOSE 网流量以及传输时延情况<sup>[6]</sup>。在平台上搭建与其一致的真实二次系统，对过程层 GOOSE 网络流量以及传输延时进行测试。系统架构如图 8 所示。

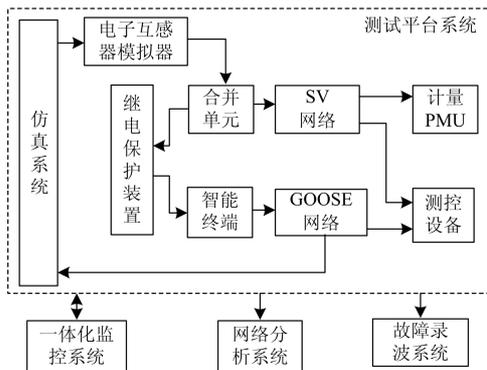


图 8 网络流量测试系统架构图

Fig. 8 System architecture of network flow test

通过网络分析系统可以直观地得出不同装置的不同网络接口的互联情况。图 9 是以 MAC 地址为对象的会话连接图，在此基础上对运行系统 GOOSE 网的流量等情况进行全面分析。

从图 9 可以看出装置之间的连接关系。表 1~表 3 是对 GOOSE 网在运行中流量、数据包分布以及按照协议类型的统计情况。

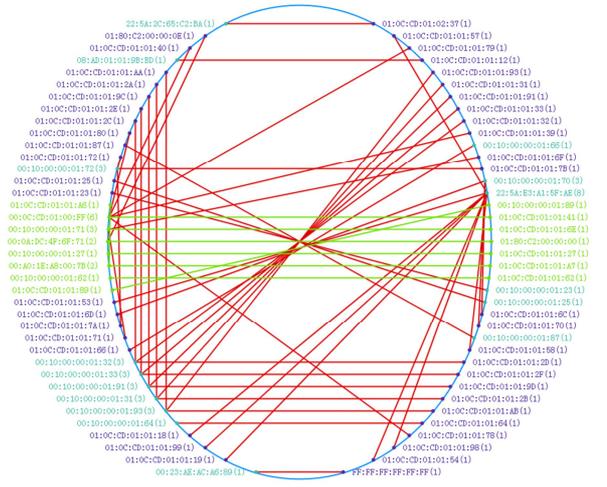


图 9 链路层会话分析

Fig. 9 Analysis of link layer session

图 10 给出了在全站智能终端开入量同时变位时 GOOSE 网流量情况，此时，网络流量突然增加，最高流量达到 90 M 左右。这是在网络风暴极端情况下，根据交换设备所给参数，相对于千兆的网络带宽，网络延时不受影响，完全可以满足在此种情况下的传输要求。

图 11 给出了 500 kV 线路一单相接地导致保护动作时 GOOSE 网流量情况，此种情况下数据流量最高达 20 M 左右，相对于千兆的带宽，对网络传输延时基本没有影响，完全可以满足实际需求。

表 1 GOOSE 网流量统计

Table 1 Flow statistics of GOOSE network

流量统计	字节数	包数	利用率/%	每秒位数
总流量	226.421 KB	586	0.001	1.304 Kbps
广播流量	254 B	1	0.000	0 bps
多播流量	226.173 KB	585	0.001	1.304 Kbps
平均包长	386.383 KB			

表 2 GOOSE 网数据包大小分布统计

Table 2 Package size distribution statistics in GOOSE network

大小分布/B	字节数/KB	包数	利用率/%	每秒位数
≤64	1.938	31	0.000	0 bps
65~127	0	0	0.000	0 bps
128~255	38.376	223	0.001	1.304 Kbps
256~511	38.732	115	0.000	0 bps
512~1 023	147.375	217	0.000	0 bps
1 024~1 517	0	0	0.000	0 bps
≥1 518	0	0	0.000	0 bps

表 3 GOOSE 网协议类型分析

Table 3 Analysis of protocol type in GOOSE network

协议类型	占比/%	字节数	包数
Ethernet II	99.144	224.483 KB	555
Other	99.035	224.235 KB	554
IP	0.110	254 B	1
UDP	0.110	254 B	1
NetBIOS	0.110	254 B	1
Datagram Service	0.110	254 B	1
Ethernet 802.2	0.856	1.938 KB	31
STP	0.856	1.938 KB	31

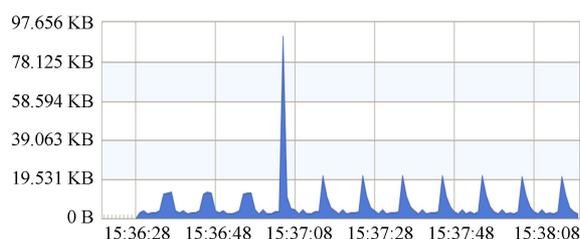


图 10 全站智能终端开变量全变位时 GOOSE 网络流量  
Fig. 10 GOOSE network flow when hard signal of smart terminal changed in the substation

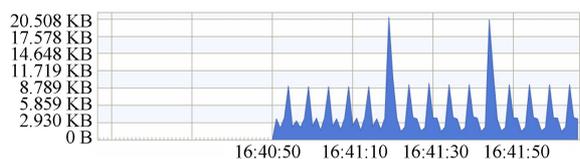


图 11 500 kV 线路一保护动作 GOOSE 网络流量  
Fig. 11 GOOSE network flow of 500 kV line1 operation

测试平台系统自 2012 年 2 月运行以来, 已成功应用于廊坊东沽港 220 kV、秦皇岛孟姜 220 kV、国家风光储示范工程中金阳 220 kV 智能变电站二次系统的调试、测试中。同时, 依托测试平台还承担了国家电网公司智能终端等设备的入网检测等工作。应用表明该测试平台结构灵活, 针对不同的需求有较强的适应性, 显著提高了调试、测试质量, 缩短了工期。

## 5 总结

本文介绍的测试平台成果通过了中国电机工程学会组织的专家鉴定, 一致认为该测试平台的建设突破了传统以设备单体为中心、单一功能为目标思路, 从系统角度设计了智能变电站二次系统综合测试框架。利用动态仿真系统, 针对不同智能变电站结构, 实现可以真实反映多种运行现场、多种运行工况、可灵活变换结构的二次系统闭环测试环境, 满足不同结构类型智能变电站的测试, 从多维度构建了智能变电站系统二次设备的测试体系。并通过

保护故障分析、系统网络测试等案例的分析表明本实验室系统结构灵活、结果可视化程度高, 可较好地适应目前的实际需求。

## 参考文献

- [1] 李先妹, 黄家栋, 唐宝锋. 数字化变电站继电保护测试技术的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 105-108.  
LI Xianmei, HUANG Jiadong, TANG Baofeng. Research on testing technology of relay protection for digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 105-108.
- [2] 纪陵, 李忠明, 蒋衍君, 等. 智能变电站二次系统仿真测试和集成调试新模式的探索和研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 119-123.  
JI Ling, LI Zhongming, JIANG Yanjun, et al. Exploration and research of smart substation secondary system simulation testing and integration testing new mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 119-123.
- [3] 王忠, 张晓莉, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 130-135.  
WANG Zhong, ZHANG Xiaoli, LI Zhongan, et al. Design of automatic test system for relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 130-135.
- [4] 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.
- [5] 张明亮, 许沛丰, 陈延昌, 等. 数字化变电站二次系统仿真测试方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 90-92.  
ZHANG Mingliang, XU Peifeng, CHEN Yanchang, et al. Simulation and test scheme for digital substation secondary system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 90-92.
- [6] IEC61850 communication networks and systems in substation, parts 1 to 10[S]. 2004.

收稿日期: 2015-02-11; 修回日期: 2015-03-20

作者简介:

陈德辉(1977-), 男, 通信作者, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化; E-mail: cndech@163.com

王丰(1971-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

杨志宏(1968-), 男, 工学硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化。

(编辑 魏小丽)