

一种新型的智能高压开关调试设备

孙银山, 钟建英, 尹军华, 张 锦, 毛志宽, 寇新民

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 智能开关调试目前都是依赖智能组件的特定调试后台和常规开关测试仪, 缺乏统一且通用的调试设备。文中基于信息流提出了一种新型智能高压开关调试设备, 可代替常规开关测试仪和智能组件特定调试后台, 作为智能高压开关的统一及通用调试平台, 可满足智能高压开关用智能化元件进厂验收和智能高压开关出厂调试需求, 有效缩短智能高压开关调试周期, 加快智能电网的建设步伐。

关键词: 智能高压开关; 智能组件; 高压开关调试; 信息流

中图分类号: TM934

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)03-0011-08

Novel Debugging Equipment of Smart High Voltage Switch

SUN Yinshan, ZHONG Jianying, YIN Junhua, ZHANG Jin, MAO Zhikuan, KOU Xinmin

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: At present, smart switch debugging is based on the specific debugging background of the smart components or on the conventional switch tester, lack of unified and universal debugging platform. A novel debugging equipment of smart high voltage switch is put forward based on information flow, which can replace the conventional switch testing instrument and smart component specific debugging background as the unified and universal debugging platform of the smart high voltage switch, which not only can meet the requirement of smart components factory acceptance and smart high voltage switch factory commissioning, also can effectively shorten the debugging cycle, even the pace of the construction of smart grid may be speeded up.

Key words: smart high voltage switch; smart component; high voltage switch debug; information flow

0 引言

国家电网公司于 2009 年 5 月提出了建设智能电网^[1-5]的发展规划, 智能电网建设随即被纳入国家“十二五”规划纲要。智能变电站^[6-7]是智能电网建设的重要环节之一, 而智能高压开关是智能变电站系统的关键设备, 对输变电路的安全运行至为重要。智能高压开关在研发及生产过程中, 需要进行传感器和智能组件功能测试以及智能开关整体调试。目前, 智能高压开关用传感器及智能组件缺乏统一的功能及性能参数测试设备和方法, 智能开关整体联调也是依赖智能组件的特定调试后台, 这些设备缺乏通用性, 只能用于调试特定厂家的智能组

件。智能开关调试缺乏统一且通用调试设备, 调试进程严重依赖于传感器及智能组件厂家, 调试过程缺乏信息监控, 出现问题时不易快速查找原因, 容易出现互相推诿现象, 致使智能开关整体联调进程缓慢, 周期漫长^[8-10]。

笔者通过分析智能高压开关信息流和调试需求, 提出了一种新型智能高压开关调试设备, 阐述了新型智能高压开关调试设备的功能设计及技术方案, 并在 252 kV 智能 GIS 上通过功能测试。

1 智能高压开关信息流分析

目前智能变电站以三层两网为组网结构^[11-13], 其中与高压开关有关的间隔层智能组件包括保护装置、测控装置和监测主 IED, 过程层智能组件包括

收稿日期: 2013-11-21; 修回日期: 2013-12-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A121)。

Project Supported by National High-tech R & D Program (863 Program) (2011AA05A121).

测量 IED、局部放电监测 IED、机械状态监测 IED、开关设备控制器和合并单元。智能高压开关信息流就是对这些智能组件间的信息交互服务方式和交互信息内容的详细描述,见图 1。

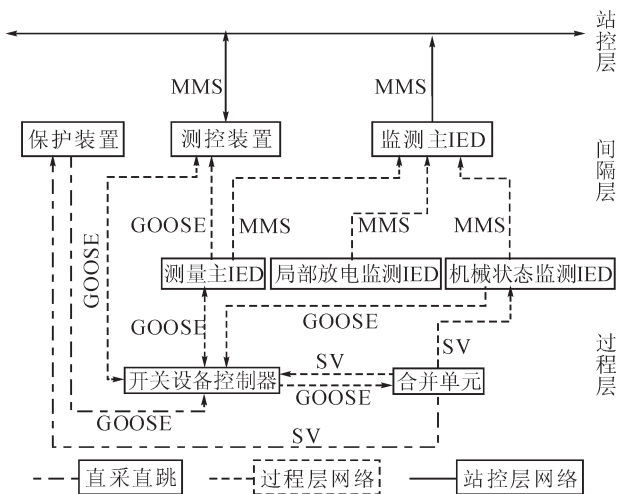


图 1 智能高压开关信息流

Fig. 1 Information flow of intelligent high voltage switch

智能高压开关信息流包括测量信息流、监测信息流和控制信息流^[14-15],以下是对智能高压开关信息流进行分类逐一阐述。

1.1 智能高压开关测量信息流

智能高压开关测量信息是对气室气体密度的连续监测,包括气室压力、温度。必要时,可包括气室水分。测量信息的采集、处理由测量 IED^[16-17]完成。测量 IED 同时接收开关设备控制器采集的各类报警信息,以作为测量信息的旁证。智能高压开关的测量信息流参见表 1。

表 1 智能高压开关测量信息流

Tab. 1 Measure information flow of intelligent high voltage switch

发送	接收	网络	服务	信息描述
开关设备控制器	测量 IED	过程层	GOOSE	气体继电器接点报警信息
测量 IED	监测主 IED	过程层	MMS	气体绝缘介质温度、压力等信息
测量 IED	测控装置	过程层	GOOSE	气体绝缘介质温度、压力等信息

1.2 智能高压开关监测信息流

智能高压开关监测信息包括局部放电和机械状态等,分别由局部放电监测 IED 和机械状态监测 IED^[18]承担。监测信息的聚合由监测主 IED^[19]承担,根据聚合信息,对高压开关设备运行、控制和可靠性状态进行综合分析,同时将结果信息及格式化信息通过站控层网络报送至相关站控层设备。智能高压开关的监测信息流架构见表 2。

表 2 智能高压开关监测信息流

Tab. 2 Monitor information flow of intelligent high voltage switch

发送	接收	网络	服务	信息描述
测量 IED	监测主 IED	过程层	MMS	气体绝缘介质压力、温度等信息
合并单元	机械状态监测 IED	过程层	SV	系统电流采样值
局部放电监测 IED	监测主 IED	过程层	MMS	局部放电信息
机械状态监测 IED	监测主 IED	过程层	MMS	机械状态信息
监测主 IED	站控层设备	站控层	MMS	结果信息

1.3 智能高压开关控制信息流

智能高压开关的控制对象是一个开关设备间隔,包括断路器、隔离开关、接地开关等。控制信息包含控制指令、控制反馈及控制部件可靠性状态信息。为了实现智能控制,开关设备控制器需接收测量 IED 信息,有选相合闸要求时,同时要采集合并单元(MU)的信息。智能高压开关的控制信息流架构见表 3。

表 3 智能高压开关控制信息流

Tab. 3 Control information flow of intelligent high voltage switch

发送	接收	网络	服务	信息描述
测控装置	开关设备控制器	过程层	GOOSE	控制指令/联锁信息
非电量保护装置	开关设备控制器	直跳/过程层	GOOSE	保护跳闸指令
测量 IED	开关设备控制器	过程层	GOOSE	气体绝缘介质压力、温度等信息
合并单元	开关设备控制器	过程层	SV	系统电压和电流采样值
机械状态监测 IED	开关设备控制器	过程层	GOOSE	分合闸线圈电压、机构箱温度
开关设备控制器	测控装置	过程层	GOOSE	分合位置、报警、联闭锁等信息

2 新型智能高压开关调试设备的功能设计

智能高压开关调试主要包括传感器和智能组件的功能测试以及智能开关的系统联调,具体调试涉及智能化元件通信、性能参数检验、智能开关状态监测功能测试、智能开关控制功能测试等内容。

根据智能高压开关信息流和调试需求,新型智能高压开关调试设备需要具备表 4 所示的功能及调试能力。

表 4 新型智能高压开关调试设备功能

Tab. 4 The functions for the novel debugging equipment of intelligent high voltage switch

调试平台 3 大功能	可提供的调试能力
传感器信号检测	采集并分析传感器信号,校验传感器功能、通信协议等;模拟传感器信号输出给状态监测 IED,测试 IED 接收传感器信号及数据处理功能。
智能组件功能测试	智能组件通用功能测试(61850 通信、1588 对时、数据自保持等);开关设备控制器分合闸延时测试;在缺少某些 IED 情况下,通过 IEC 61850 报文模拟测试已有 IED 的互操作功能;高可视化 SCD 信息模型正确性和完整性校;验控制功能调试(GOOSE/MMS 实现开关各种操作,开关控制及状态采集回路正确性校验);状态监测功能调试(状态监测 IED 通信及数据处理功能检验)。
智能开关系统调试	开关机械特性测试 (与机械状态监测 IED 同步测试,支持与常规开关测试仪及机械状态监测 IED 的结果比较);开关机械寿命试验(通过分、合组合作自动实现);开关联锁逻辑检验(验证测控装置存储的开关联锁逻辑是否正确);调试过程监控(IED 交互报文记录分析、事件告警、控制指令执行结果及状态一致性检验、IED 通信状态监控、网络流量监控等,便于发现问题和解决问题)。

3 新型智能高压开关调试设备的技术方案

3.1 系统组成及工作原理

新型智能高压开关调试设备见图 2, 主要由系统调试平台和传感器信号 IO 平台两大部分组成, 其他部件包括液晶显示器、网络交换机和移动机柜等。新型智能高压开关调试设备组成及工作原理见图 3, 图 3 中虚线表示光纤, 实线表示电缆或网线。系统调试平台通过千兆光纤连接到机柜内交换机, 传感器信号 IO 平台通过网线连接到机柜内交换机, 机柜内交换机与汇控柜内交换机通过百兆光纤直连。



图 2 新型智能高压开关调试设备

Fig. 2 The novel debugging equipment of intelligent high voltage switch

传感器信号 IO 平台通过采集并分析传感器信号,可验证传感器通信协议、精度等性能参数,还可代替开关测试仪 KoCoS 实现开关机械特性测试,测试结果可供系统调试平台调用。同时,传感器信号 IO 平台可将事先采集存储的传感器数据模拟输出给状态监测 IED。

系统调试平台通过网络交换机与智能组件进

行 IEC 61850 报文^[20-22]交互,比如可模拟站控层给测控发 MMS 报文、模拟测控给智能终端发 GOOSE 报文、模拟智能终端给测控发 GOOSE 报文等,同时可记录分析智能组件与上层设备交互的报文。

3.2 软硬件实现方案

出于软件通用性的考虑,选择满足运算能力及内存要求的通用型工控机。其中,传感器信号 IO 平台上集成的板卡分别具有电压、电流、脉冲信号、RS485 等信号的采集和输出功能,可实现常用传感器的信号检测及模拟输出。如:分合闸线圈电流传感器、储能电机电流传感器、油压传感器、触头位移传感器、气体状态传感器、机构箱温湿度传感器等。传感器信号 IO 平台软件架构见图 4。

系统调试平台配置具有 4 个千兆光口的 PCI-E 网卡,该卡采用高性能、高可靠性、低功耗 Intel82580 网络芯片,支持 IEEE1588 对时及硬件时标,可对接收到的数据包打精度为纳秒级的时标,并且为进一步保证信息处理的实时性,笔者还对操作系统内核进行了必要的优化。系统调试平台硬件可满足 14 天 GOOSE 连续记录存储和 24 h SMV 连续记录存储,就地数据存储速度达 100 Mbps,数据记录分辨率达 1 μ s,数据分析分辨率达 1 ms。系统调试平台软件架构见图 5,其中模拟控制类用于网络报文收集、分析及发布,负责具体功能模块实现;应用支持类负责数据的存储、处理以及对用户界面类的支持;软件中间件负责应用支持类及控制收集类的模块交互,从而使分布式模块形成整体。

4 新型智能高压开关调试设备的功能试验

该次试验以 252 kV 智能 GIS 为调试对象,见图 6。

4.1 252 kV 智能 GIS 的 SCL 信息模型校验

新型智能高压开关调试设备生成的 IED 逻辑连接图可清楚显示测控装置与智能终端 (双配 A、B 套)的报文交互类型和传送方向,见图 7。新型智能高压开关调试设备生成的 IED 模型结构图可清楚

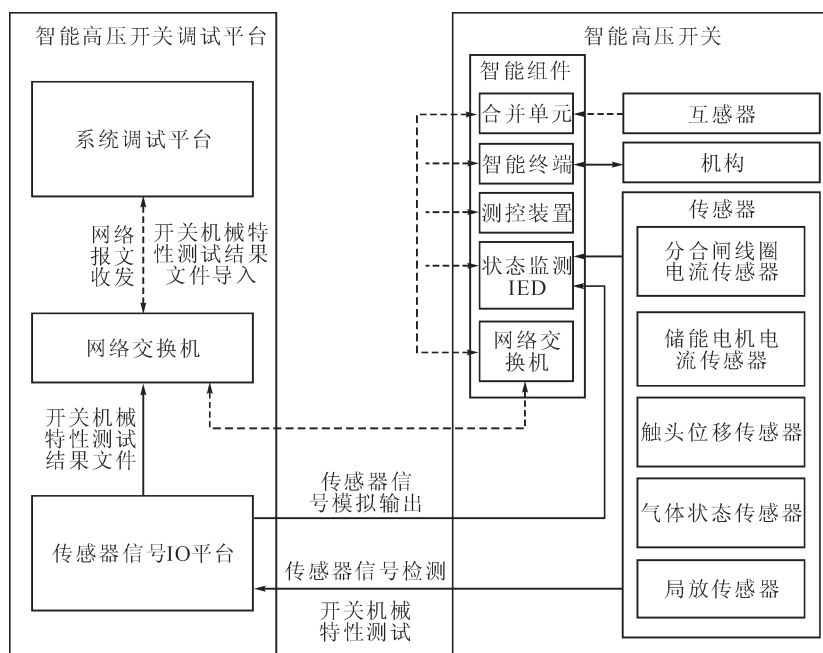


图3 新型智能高压开关调试设备组成及工作原理

Fig. 3 Composition and working principle for the novel debugging equipment of intelligent high voltage switch

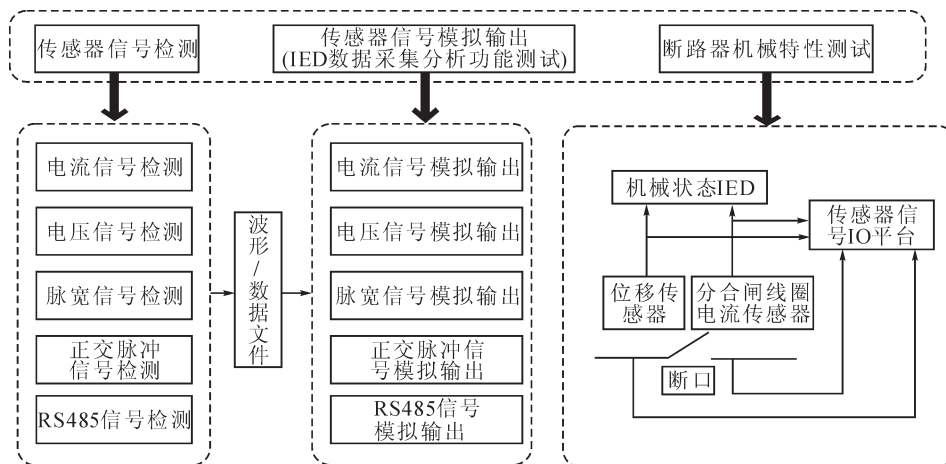


图4 传感器信号IO平台软件架构

Fig. 4 The software architecture of sensor signal IO platform

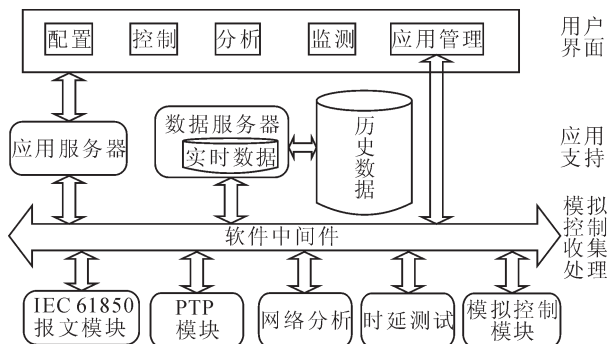


图5 系统调试平台软件架构

Fig. 5 The software architecture of system debugging platform

显示测控装置与智能终端 (双配 A、B 套) 的逻辑设

备/逻辑节点/数据对象/数据对象属性(LD/LN/DO/DA)之间的信息交互细节。

4.2 252 kV 智能 GIS 控制功能调试

新型智能高压开关调试设备可通过开关一次主接线直接下发 GOOSE 报文给智能终端,实现开关分合操作及开关分合状态监测(QSF1、QFA、QFB 和 QFC 处于合位,QEF、QS3 和 QE2 处于分位,灰色 QE1、QSF2 和 WEB2 表示未配置或不存在),见图 8。同时,系统能自动进行操作指令逻辑判断,对于不符合操作逻辑的指令拒绝发送(如拒绝给分位状态刀闸发送分闸指令)。此外,通过模拟测控发送 GOOSE 报文给智能终端,还可实现 252 kV 智能 GIS 的组合动作,如重合闸和机械寿

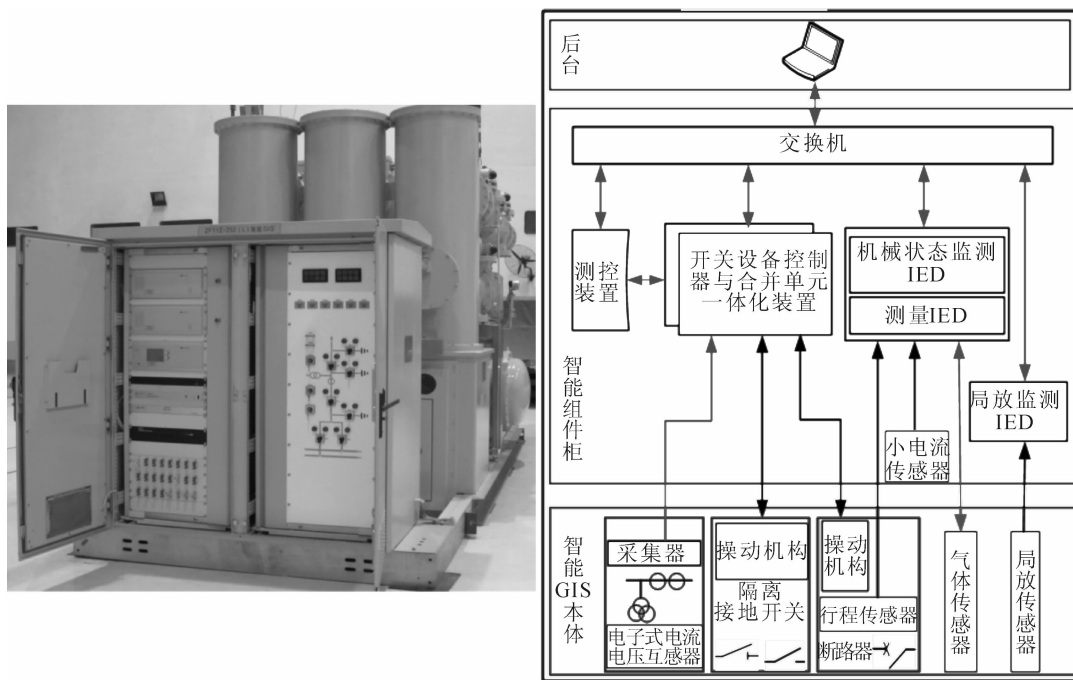


图 6 252 kV 智能 GIS 及其智能系统方案

Fig. 6 The 252 kV intelligent GIS and its intelligent system solutions

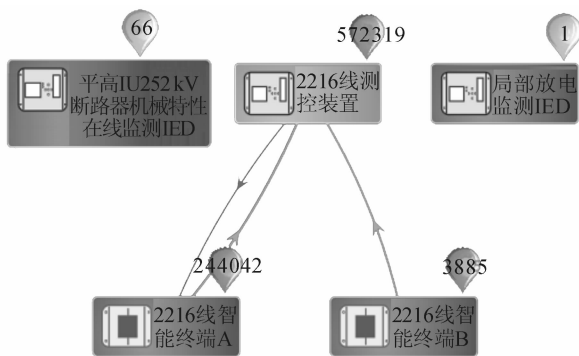


图 7 IED 逻辑连接图

Fig. 7 IED logic connection diagram

命试验, 见图 9、10。

4.3 252 kV 智能 GIS 联锁逻辑检验

只需录入联锁逻辑关系式, 新型智能高压开关调试设备可自动生成联锁逻辑测试方案, 一键式操作即可检验测控装置存储的开关联锁逻辑是否正确。如果期望动作与实际动作完全一致, 说明该开关所关联的联锁逻辑正确, 见图 11。如果所有开关联锁逻辑都正确, 才能说明 252 kV 智能 GIS 的联锁逻辑正确。该功能可避免人为操作及判断失误、工作量大、逻辑检验时间长等问题。

4.4 252 kV 智能 GIS 用智能终端动作延时测量

将新型智能高压开关调试设备的专用两根电缆连接到断路器或开关对应的智能终端出口干接点两端, 然后模拟测控给智能终端发送 GOOSE 报文, 即可精确测量智能终端干接点的动作延时, QSF1 分闸

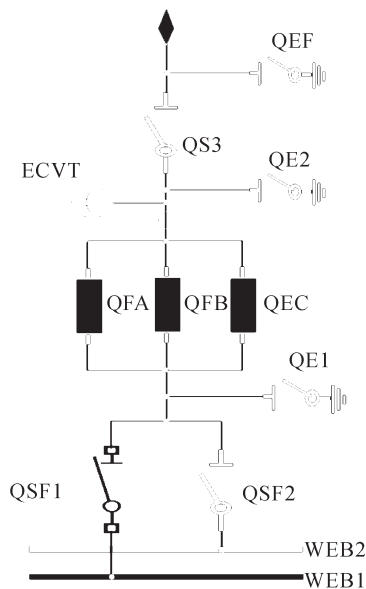


图 8 一键式开关操作及位置监测

Fig. 8 One-click switch operation and position monitoring

对应的智能终端干接点动作延时测量结果见图 12。

4.5 252 kV 智能 GIS 的断路器机械特性测试

252 kV 断路器每动作一次, 新型智能高压开关调试设备及时记录和显示机械状态监测 IED 或传感器信号 IO 平台采集的机械特性数据, 可代替 KoCoS 实现开关机械特性测试, 见图 13, 左侧显示机械特性波形, 右侧显示相关测量及计算后的机械特性参数(行程、超程、分合闸时间、分合闸速度等)。

控制用例基本信息				
IED名称	虚拟测控-CI126		控制方式	GOOSE控制
用例描述	重合闸		重复次数	1
开关选择	☒ 是否发送复位指令			
	开关名称	IED名称	IED描述	
	QF	CI126	虚拟测控	
	SAL	CI126	虚拟测控	

控制项配置				
操作序号	DA编码	开关名称	操作类型	操作间隔(S)
1	126.CI126.G1.PI_MEAS.CSW1.0pOpn.general	QF	分	0.3
2	126.CI126.G1.PI_MEAS.CSW1.0pCls.general	QF	合	0.055
3	126.CI126.G1.PI_MEAS.CSW1.0pOpn.general	QF	分	

图9 252 kV 智能 GIS 重合闸实现实例

Fig. 9 The reclosing implementation instance for 252 kV intelligent GIS

控制用例基本信息				
IED名称	虚拟测控-CI126		控制方式	GOOSE控制
用例描述			重复次数	5000
开关选择	☒ 是否发送复位指令			
	开关名称	IED名称	IED描述	
	QF	CI126	虚拟测控	
	SAL	CI126	虚拟测控	

控制项配置				
操作序号	DA编码	开关名称	操作类型	操作间隔(S)
1	126.CI126.G1.PI_MEAS.CSW1.0pOpn.general	QF	分	180
2	126.CI126.G1.PI_MEAS.CSW1.0pCls.general	QF	合	180

图10 252 kV 智能 GIS 机械寿命试验实现实例

Fig. 10 The mechanical life test implementation instance for the 252 kV intelligent GIS

公式名称				
N5-QE2				
公式				
QE2 = QSF1*Q53				
联锁逻辑真值表				
QSF1状态	Q53状态	QE2期望操作	QE2实际操作	操作
合	合	拒动	拒动	单击测试
合	分	拒动	拒动	单击测试
分	合	拒动	拒动	单击测试
分	分	动作	动作	单击测试

图11 QE2 联锁逻辑检验结果

Fig. 11 The interlock logic test results of QE2

启动控制时延测试				
选择IED装置	CL2216A	选择干接点	QSF1.遥控1-分	
测试重复次数	10	测试间隔(s)	1	启动
动态列表 图形统计				
序号	干接点名称	间隔时长(us)	接受指令时间	动作时间
1	QSF1.遥控1-分	4824	2012-08-20 17:29:05.001076	2012-08-20 17:29:05.005900
2	QSF1.遥控1-分	5152	2012-08-20 17:29:07.001058	2012-08-20 17:29:07.006210
3	QSF1.遥控1-分	4529	2012-08-20 17:29:09.000986	2012-08-20 17:29:09.005515
4	QSF1.遥控1-分	4807	2012-08-20 17:29:11.001020	2012-08-20 17:29:11.005827
5	QSF1.遥控1-分	4724	2012-08-20 17:29:13.000912	2012-08-20 17:29:13.005636
6	QSF1.遥控1-分	4885	2012-08-20 17:29:15.001058	2012-08-20 17:29:15.005943
7	QSF1.遥控1-分	5161	2012-08-20 17:29:17.001090	2012-08-20 17:29:17.006251
8	QSF1.遥控1-分	5004	2012-08-20 17:29:19.001054	2012-08-20 17:29:19.006058
9	QSF1.遥控1-分	5091	2012-08-20 17:29:21.000299	2012-08-20 17:29:21.005390
10	QSF1.遥控1-分	4658	2012-08-20 17:29:23.001037	2012-08-20 17:29:23.005695
	最小值	4529		
	平均值	4883.5		
	最大值	5161		

图12 智能终端干接点动作延时测量结果

Fig. 12 The action delay measurement results of the intelligent terminal dry contacts

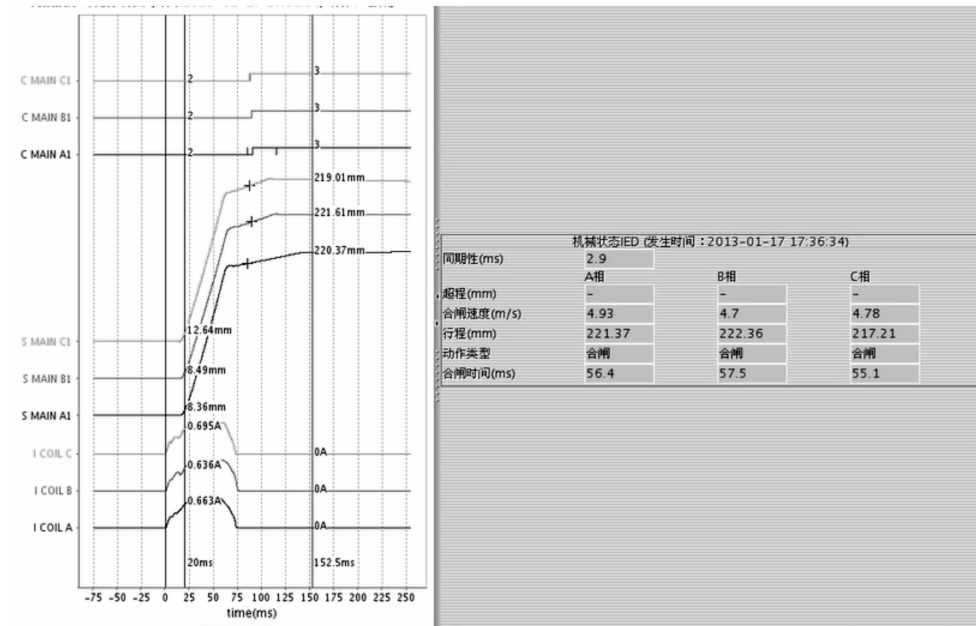


图 13 252 kV GIS 的断路器合闸机械特性

Fig. 13 The on trip mechanical properties of the circuit breaker for 252 kV intelligent GIS

5 结语

笔者通过分析智能高压开关信息流和调试内容,提出了一种新型智能高压开关设备调试设备。通过对 252 kV 智能 GIS 的调试,该设备可快速校验智能系统配置的准确性和完整性,全面跟踪动态信息交互细节,高可视化展示调试过程和结果,成功实现了智能高压开关用传感器信号检测及模拟输出、智能组件功能测试及智能开关系统调试功能,可作为智能高压开关的统一及通用调试平台。

参考文献:

- [1] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(4):1-8.
YU Yixin,LUAN Wenpeng. Smart-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):1-8.
- [2] 崔毅敏,李福岭. 浅谈智能电网和智能网络[J]. 电力信息化,2008,6(11):32-34.
CUI Yimin,LI Fuling. Introduction to smart grid and smart web[J]. Electric Power informatization,2008,6(11):32-34.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源,2009,25(1):8-11.
YU Wenxin,LUAN Wenpeng. Smart grid[J]. Power System and Clean Energy,2009,25(1):8-11.
- [4] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
CHEN Shuyong,SONG Shufang,LI Lanxin,et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology,2009,33(8):1-6.
- [5] 林宇锋,钟金,吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术,2009,33(12):8-14.
LIN Yufeng,ZHONG Jin,WU Fuli. Discussion on smart grid supporting technology[J]. Power System Technology,2009,33(12):8-12.
- [6] 王冬青,李刚,何飞跃. 智能变电站一体化信息平台的设计[J]. 电网技术,2010,34(10):20-25.
WANG Dongqing,LI Gang,HE Feiyue. Intelligent substation integration information platform design[J]. Power System Technology,2010,34(10):20-25.
- [7] 周和. 智能变电站的设计及其应用[D]. 北京:华北电力大学,2011.
- [8] 刘有为. 高压设备智能化技术分析报告[R]. 北京:中国电力科学研究院,2009.
- [9] 刘有为,邓彦国,吴立远. 高压设备智能化方案及技术特征[J]. 电网技术,2010,34(7):1-4.
LIU Youwei,DENG Yanguo,WU Liyuan. High voltage equipment intelligent scheme and technical characteristics [J]. Power grid technology,2010,34(7):1-4.
- [10] 王宁,张可畏,段雄英,等. 智能 GIS 及其发展现状[J]. 高压电器,2004,40(2):139-141.
WANG Ning,ZHANG Kewei,DUAN Xiongying,et al. Smart GIS and its state-of-art[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2):139-141.
- [11] Q/GDW 410—2011 智能电气设备智能化技术导则[S]. 2011.
Q/GDW 410—2011 Intelligent electrical equipment intelligent technical guideline[S].2011.
- [12] LUND J,CORP E. The smart grid ecosystem[J]. Electric Light & Power,2009(4):32-34.
- [13] Q/GDW 383—2009 智能变电站技术导则[S].2009.
Q/GDW 383—2009 Intelligent substation technical

- guidance[S]. 2009.
- [14] 刘有为,周 华. 智能高压开关设备信息流方案设计[J]. 电工文摘,2011,47(5):27-30.
LIU Youwei,ZHOU Hua. Intelligent switchgear equipment information flow design[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):1-4.
- [15] 苗 新,张 恺,田世明,等. 支撑智能电网的信息通信体系[J]. 电网技术,2009,33(17):8-13.
MIAO Xin,ZHANG Kai,TIAN Shiming,et al. Information communication system supporting smart grid[J]. Power Grid Technology,2009,33(17):8-13.
- [16] 赵祖康,徐石明. 试论智能变电站状态监测技术及应用[J]. 电力自动化设备,2002,20(1):38-42.
ZHAO Zukang,XU Shiming. Try to talk about intelligent substation state monitoring technology and application[J]. Automation Equipment,2002,20(1):38-42.
- [17] 邹积岩,胖质玲,尹承尚. 高压开关设备的状态检修技术[J]. 高压电器,1999,35(5):45-47.
ZOU Jiyan,PANG Zhiling,YIN Chengshang. The state of maintenance technology of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus,1999,35(5):45-47.
- [18] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [19] 陈振生. 智能高压开关设备的在线监测技术[J]. 电力设备,2008,9(3):5-8.
CHEN Zhensheng. Intelligent high voltage switch equipment online monitoring technology[J]. Electric Power Equipment,2008,9(3):5-8.
- [20] 王 璐,王步华,宋丽君,等. 基于 IEC 61850 的数字化变电站的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(24):90-92.
WANG Lu,WANG Buhua,SONG Lijun,et al. The research and application of digital substation based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control,2008,4(24):74-75.
- [21] IEC 61850-7-2 Communication networks and systems in substations,Part7-2:Basic communication structure for substation and feeder equipment-abstract communication service interface[S]. 2003.
- [22] 刘 栋,黄 新,曹 辉. 分布式 IEC 61850 MMS 报文监测系统研究与实现[J]. 科技资讯,2012(27):14-18.
LIU Dong,HUANG Xin,CAO Hui. Research and implementation of IEC 61850 MMS message monitoring system[J]. Information Technology,2012,27(10):14-18.

孙银山(1980—),男,博士,工程师,主要研究方向为智能高压开关及其关键技术、智能变电站系统集成及调试技术等。

(上接第 10 页)

- Research on the theory of magnetic valve type saturable current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(3):203-207.
- [14] KANG Y C,UI J L,SANG H,et al. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1642-1649.
- [15] PAN Jiuping,KHOI V,YI Hu,et al. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1623-1628.
- [16] 陈建玉,孟宪民,张振旗,等. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策[J]. 电力系统自动化,2000,24(6):54-56.
CHEN Jianyu,MENG Xianmin,ZHANG Zhenqi,et al. Influence of the current transformer saturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(6):54-56.
- [17] 赵满江,李仰平. 保护用电流互感器饱和特性及其误差曲线研究[J]. 高压电器,2010,46(12):29-31.
ZHAO Manjiang,LI Yangping. Research on saturated characteristics and error curve of protective current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(12):29-31.
- [18] 张新刚,王泽忠. 电流互感器铁心饱和引起二次电流畸变的补偿研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(3):36-42.
ZHANG Xingang,WANG Zezhong. Research on compensation of the distortion in secondary current caused by TA saturation[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,2006,26(3):36-42.
- [19] 杜西亮,孙慧明. 多项式回归在智能传感器线性化中的应用[J]. 传感技术学报,2005,18(1):212-214.
DU Xiliang,SUN Huiming. Application of polynomial regression in the smart sensor linearization[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2005,18(1):212-214.
- [20] 林湘宁,刘 沛,高 艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和识别判据[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):44-48.
LIN Xiangning,LIU Pei,GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):44-48.

韦兆碧(1974—),男,博士后,高级工程师,主要从事于电工电能新技术及无线通信射频开发工作。