

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.030

24 kV智能开关设备的集成设计和试验

胡良蓉¹, 戴冬云¹, 骆 虎¹, 李逸飞², 王 瑜¹ 王 帅¹

(1. 西安西电电气研究院有限责任公司, 西安 710075; 2. 陕西宝光真空电器股份有限公司, 陕西 宝鸡 721006)

摘要:文中首先分析了中压智能开关设备的现状,之后提出了集成设计和整体试验的指导思想,设计了一种集成式24 kV智能开关设备,最后介绍了整体试验的实施方案、智能单元的功能验证和比对试验。该产品将一次设备和二次设备有效集成,智能单元基于IEC 61850协议、基于GOOSE数字化指令对断路器、接地开关进行合分操作,完成全套型式试验;同时完成智能化功能的比对试验、实现试验状态实时通过网络协议上传后台,该设计方法和试验方式将为后续智能化产品提供示范作用。

关键词:智能开关设备;集成设计;整体试验;IEC 61850协议;比对试验

Integrated Design and Test of a 24 kV Intelligent Switchgear

HU Liangrong¹, DAI Dongyun¹, LUO Hu¹, LI Yifei², WAN Yu¹, WANG Shuai¹

(1. Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Shannxi Baoguang Vacuum Electric Device Co., Ltd., Shannxi Baoji 721006, China)

Abstract: The present situation of medium-voltage intelligent switchgears was analyzed, and the guiding ideologies for the integrated design and overall test were proposed. As a result, a 24 kV intelligent switchgear was designed. The implementation method of overall test, as well as the functional verification and contrast test of the intelligent unit, was discussed. This switchgear effectively integrates the primary and secondary equipment. The intelligent unit controls the circuit breaker and earthing switch to perform closing/opening operations based on the IEC61850 protocol and the GOOSE digital instruction for completing whole type tests. Meanwhile, the contrast test of the intelligent function is conducted, and the test condition is uploaded to the background in real time through network protocol. These design and test methods may provide demonstration for subsequent intelligent switchgears.

Key words: intelligent switchgear; integrated design; overall test; IEC 61850; contrast test

0 引言

随着工业生产的不断发展,用户对供电的可靠性提出了越来越高的要求^[1],要尽可能减少停电事故,缩短停电时间。为进一步提高供配电网络的供电可靠性,一方面需要提高供配电设备的产品品质,优化供配电^[2]网络结构^[3];另一方面开关设备加装智能化配件以达到配网要求是一种必然趋势^[4-6]。通过一次设备和二次设备的结合^[7-10],实现具有检测、监控、保护、通信、远程网络监测等功能^[11-15],监测开关设备的运行状态,增加智能提醒,减少人为事故,同时可以预警设备故障,减少因设备故障引起的停电事故^[16],优化智能电网控制和运行,提高电力系统的可

靠性。

1 中压智能化产品现状

随着智能电网建设的全面展开,国内许多开关柜生产厂家都在智能化开关设备领域进行尝试,也开发了众多的设备和应用方案,比如机械特性在线监测装置、断路器温度在线监测^[18-19]装置、开关柜温度湿度在线监测装置、开关柜的保护控制系统、选相控制装置等,具备了高压开关设备的智能化技术特征,但是由于二次厂家不了解开关设备本体,缺乏集成设计,导致研究的智能电子装置(如在线监测或控制装置)存在着以下几个问题:

1)二次设备由不同厂家研发,控制装置、测量装置、在线监测装置各自独立,每个都有自己的供电电

收稿日期:2017-05-21; 修回日期:2017-07-23

源和信号采集、处理、通信及显示模块,导致硬件资源重复设置,安装分散、连线繁杂、信号重复采样和处理,造成庞大的信息流,比集成设计的智能开关设备成本要高很多,用户难以接受,市场推广困难。

2)智能组件分散采购和分散安装,协同工作能力差,致使整机产品可靠性差,查找问题困难;尽管各种智能组件单独的智能设备通过其要求的型式试验,但因单独设计所产生的制约,使其与其他智能组件的协同工作能力差,将通过型式试验的多种二次设备装入开关设备后,导致开关设备误动作或二次设备误触发等现象也经常发生。分散式智能化开关设备的缺点见图 1。

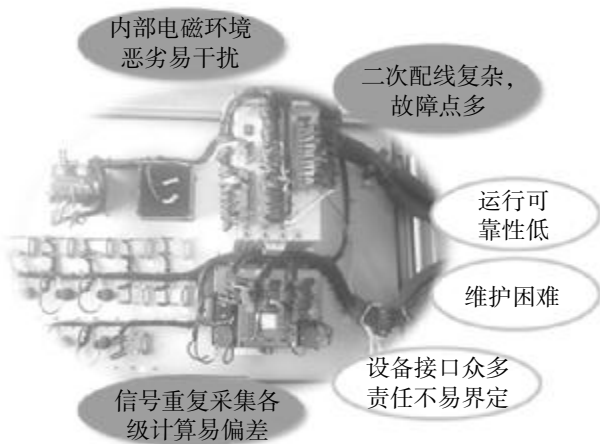


图 1 分散式智能化开关设备的缺点

Fig. 1 Disadvantages of distributed intelligent switchgear

2 新一代 24 kV 智能开关设备

针对市场的强劲需求及传统开关设备智能化存在的问题,文中研发了一种 24 kV 智能交流金属封闭开关设备,着重两个设计层次:

第 1 层次,整体设计。开关柜集小型化、智能化为一体,将智能组件有效地集成设计,基于一次强电设备与二次弱电设备和传感器的集成,实现功能创新。其中包含底层的传感技术及信息传输技术,依据开关设备监测需求,将不同物理量转换成数据信息并传输;中间层的智能装置技术,与开关设备形成整合;以及顶层的智能应用技术,以开关设备智能控制和状态评估为基础,提升开关设备技术性能和经济寿命,并形成区域性协同工作拓展智能开关设备应用。

整体设计重点在于将一、二次设备在设计之初进行整体规划,考虑好各类传感器植入问题。同时,将各类传感器采集到的信号集中处理和分析,解决智能化开关设备中各个智能化装置(如机械特性、温升)自成体系,安装困难、调试困难、价格较贵等问题,有利于智能化开关设备的应用和推广。

第 2 层次,整体试验。一、二次设备整体完成全部智能化型式试验。

整体试验在于智能化装置随同一次开关设备进行全面的检验,严酷考核一次开关设备、智能装置整机性能,提高智能开关柜的可靠性。

2.1 智能组件布局

该产品为了满足智能开关设备总体设计需求的同时,实现传统开关柜与智能开关柜的兼容性,将智能模块按其功能划分为 3 个智能装置电子装置:智能终端、智能保护、智能显示装置。其中智能终端安装在断路器框架内,智能显示装置安装于开关柜仪表门上,智能保护装置安装于开关柜仪表室内。

其中智能显示和智能保护装置之间通过 RJ45 私有协议通讯,智能保护装置和智能终端之间采用 IEC 61850 MMS 协议,保护装置信息通过 IEC 61850 或 IEC 60870-104 标准进行上传。

结构布局和通讯构架示意图见图 2。

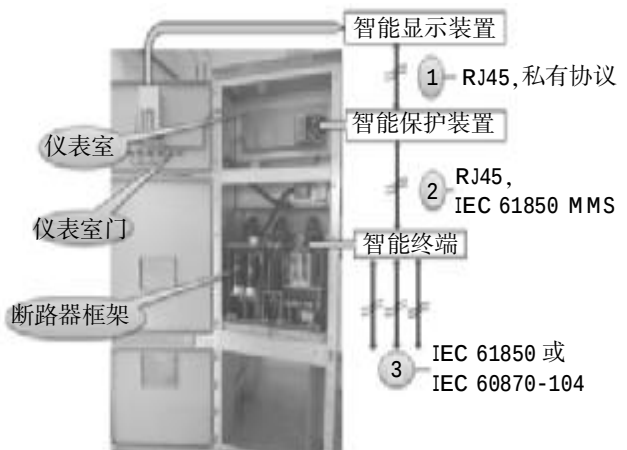


图 2 智能装置布局和通讯构架示意图

Fig. 2 The intelligent device layout and the sketch of communication architecture

智能终端可控制手车的电动进出,可实现断路器的合分操作和状态监测。带有测温用光纤浇注的触头盒和可电动(手动)的接地开关,可通过安装于仪表室的智能保护模块进行温度在线监测和接地开关的电动合分。在仪表室门上安装有智能显示模块,可显示各隔室的带电状态,影像(母线室、断路器室、电缆室分别安装有红外摄像头)以及开关设备各元件的状态信息,示意图见图 3。

文中智能化功能主要包括 3 个方面:

1)断路器机械特性在线监测;分别采用了霍尔电流传感器、力传感器、接近开关、红外位移传感器来实现;

2)温、湿度在线监测;采用光纤测温传感器来实现;

3)电动执行单元及特性监测;采用霍尔电流互感器和行程开关来实现。

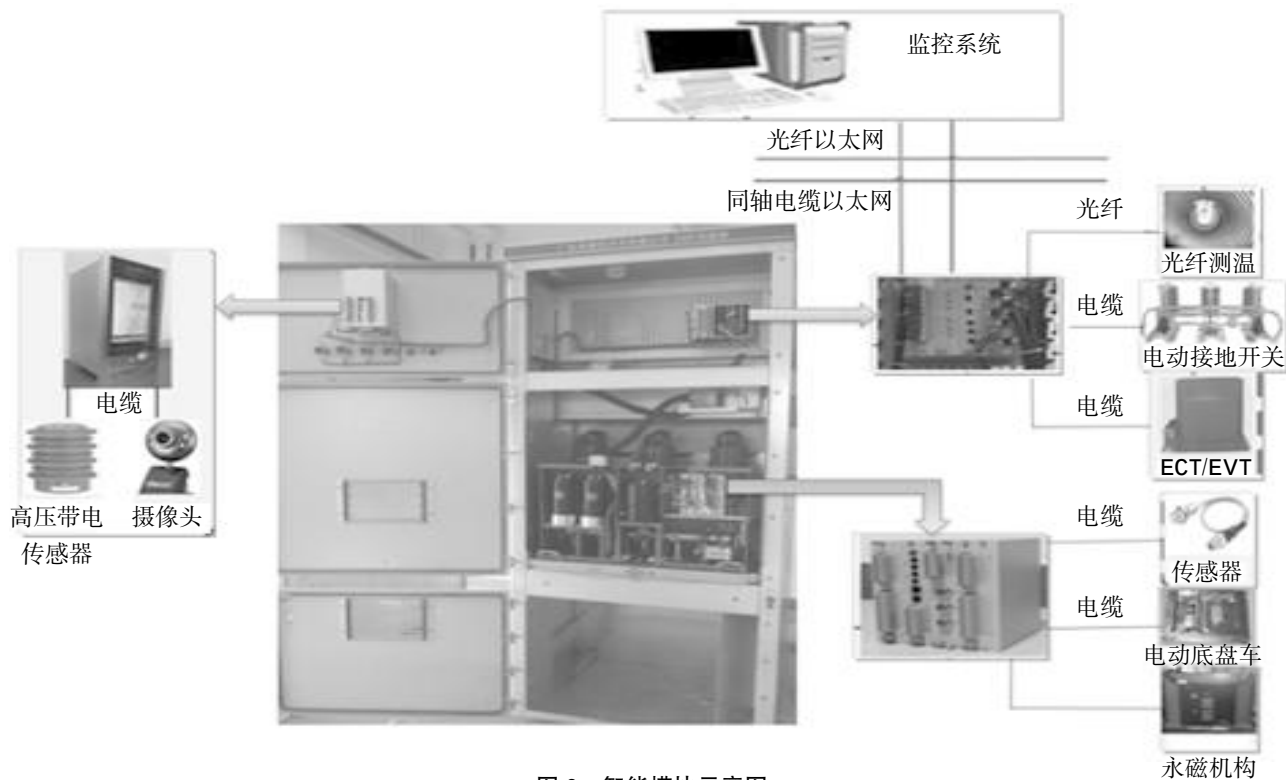


图 3 智能模块示意图

Fig. 3 The sketch of intelligent module

安装的传感器及智能元件见表 1。

表 1 安装的传感器及智能元件

Table 1 Installed sensors and intelligent components

功能	监测量	传感器
断路器机械特性监测	储能电机电流,合、分闸线圈电流	霍尔电流传感器
	灭弧室断口信号	力传感器
	断路器位置信号	接地开关
	断路器机械行程	红外位移传感器
温、湿度监测	主回路温升;环境温度、湿度变化	光纤测温传感器;环境温度、湿度传感器
	电动底盘车、接地开关特性监测	电机电流 位置状态 行程开关

2.2 集成设计

将一、二次设备一体设计,实现测量、保护、控制、监测、显示集成,就地采集、分析与处理,智能显示装置能够就地显示信息,智能终端能够远方交换信息,见图 4。

集成设计包括一、二次设备两部分。

2.2.1 一次设备的集成

2.2.1.1 电流互感器集成

将电子互感器与开关设备集成是实现开关设备智能化和小型化结合的有效方式,能简化开关设备和成套设备结构,提供智能化需要的电量测量信号和保护信号,提高产品集成度和产品技术水平。在

简化结构的同时发挥电子互感器无饱和、小体积、无开路危险、安全性高的优点。实现计量级和或测量级和保护级电流的测量功能、发挥电子互感器优点且不影响开关设备性能包括绝缘性能、散热性能的电子互感器。

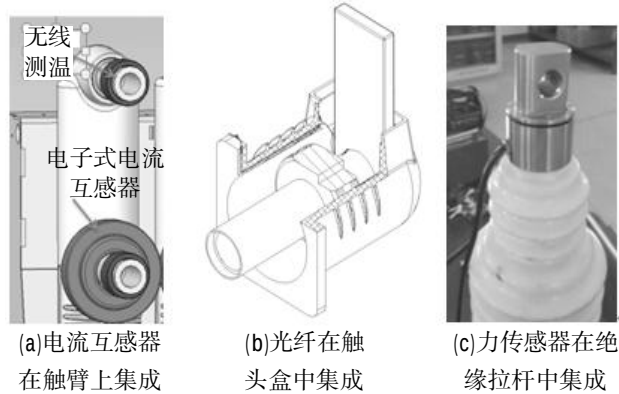


图 4 传感器集成示意图

Fig. 4 The sketches of sensor integration

与触臂集成的电子互感器,其线圈传感器引出线与引出线接线盒与触臂浇注在一起,形成一个集成体。低功耗线圈传感器实现一次主回路计量级或测量级电流的测量,罗氏线圈传感器实现一次主回路保护级电流的测量,见图 4(a),包括开关设备的触臂及绝缘件。绝缘件中一体浇注电子互感器线圈传感器及屏蔽件,屏蔽件的一端与触臂固定电连接形成等电位体,其他部分浇注在绝缘件中,屏蔽件与触臂等电位并将触臂的高电位和电子互感器线圈的地

电位间的强电场控制在绝缘件内,降低绝缘件表面电场强度。此外,触臂是一次设备开关的配套零件,线圈传感器是二次设备的配套零件,实现了一、二次设备的集成,且解决了电子互感器与触臂集成时耐受电压不符合型式试验要求和运行要求的问题,同时解决了集成体积大,开关设备安装后与柜体有干涉的问题。集成式电子式互感器简化了互感器的安装过程,节省了人力物力。

2.2.1.2 无线测温传感器集成

测温方案可选用无线测温,将无线测温传感器集成于触臂上,见图4中(a)固封极柱的触臂上。

2.2.1.3 测温光纤的集成

测温采用光纤测温。直接将光纤从测量点(高压)沿着触头盒表面到达触头盒的安装金属板(地)方案,存在如下问题:

- 1) 光纤外漏,容易受环境影响,导致绝缘失效;
- 2) 光纤沿着触头盒表面布线,需要外加固定,影响外观。

基于以上原因,决定采取将光纤浇注于环氧体中方案,见图4(b)。

2.2.1.4 力传感器集成

测量触头压力突变,需在绝缘拉杆低压端植入拉压力传感器,通过测量灭弧室的触头压力的突变值,实行刚分/合时刻判定,见图4(c)。

2.2.2 二次设备的集成

2.2.2.1 光纤板卡与智能保护装置的集成

市场上的光纤测温系统,有自身的电源、自身的软件及报警系统和显示仪表,单套独立光纤测温价格较高、体积较大,不利于光纤测温系统推广应用,也不利于智能开关设备的集成化设计。

该项目采用一体化、集成化的设计理念,将光纤测温系统进行分解,将光纤温度传感器、荧光光纤温度调制解调系统、光信号传输光纤、光纤连接适配器、光纤耦合透镜等光路处理部分,交给专业光纤测温厂家处理。取消原有的电源及显示模块,形成一个小体积的三通道光纤测温模块,易于嵌入用户硬件设计,具有接口简单、安装方便的特点。然后该模块与智能保护模块集成,由智能保护装置为该模块提供电源,并接收该模块的输出信号,转变成所需的温度信号。原有独立光纤测温系统的电源、测温系统的数据处理、报警、通信等功能由智能保护装置承担并采用统一的 IEC 61850 协议将光纤测温上传和显示。

独立设计和集成式设计光纤系统见图5。

2.2.2.2 智能显示装置的集成

智能显示装置直观地在液晶屏上显示一次回路

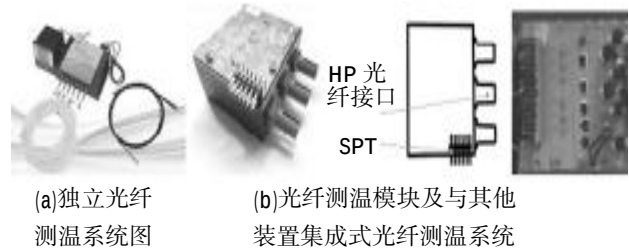


图5 光纤测温系统

Fig. 5 The system of optical fiber temperature
的主接线图,包括断路器、电动底盘车、接地开关的位置状态,当设备的位置发生变化,接线图上相应的元件会发生变化,显示对应的位置状态;替换传统的电压指示、电流指示、功率显示等传统仪表,在主界面上实时显示线路的相电压、三相电流、有功功率、无功功率及功率因素,部分显示界面见图6。

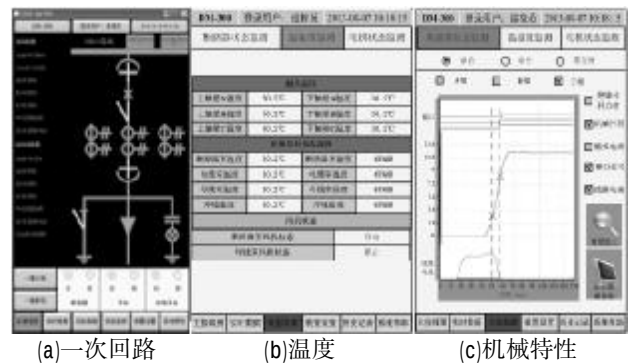


图6 界面显示

Fig. 6 Interface display

2.3 智能单元功能

2.3.1 实现开关状态的自感知和自诊断

实现以下监测与诊断功能:开关柜机械特性监测与诊断(包括:机械寿命、行程—时间曲线、分合闸线圈电流、储能状态、运行状态)、底盘车运行状态监测与诊断(机械寿命、电机电流)、触臂温度监测。

2.3.2 实现开关智能化控制

电动底盘推进、推出控制;电容电压低闭锁控制;程序化操作与控制;智能化相关功能见图7。

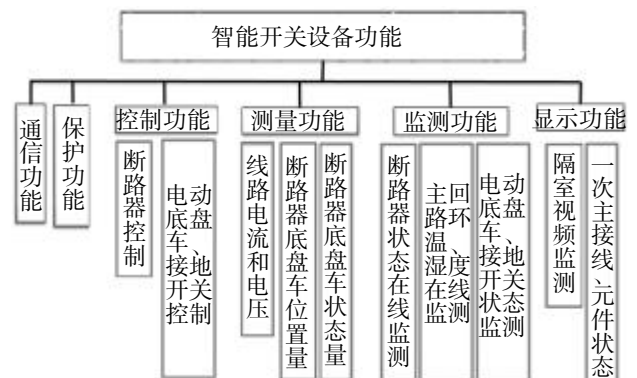


图7 智能化开关设备功能

Fig. 7 The function of intelligent switchgear

2.3.3 网络化

能与后台实现监控数据的远程交换, 支持 IEC 61850 协议、实现远程维护及代码下载。

2.3.4 保护要求

交流采样方面: 配置虚拟合并单元模块, 直接转成 SV 输出; 开关操作及状态采集: 直接配置 GOOSE 处理模块, 输出状态信号, 接收开关操作命令; 间隔内联锁: 检修状态与运行状态控制, 电动小车接点信号参与联锁等等; 本体保护: 操作电机堵转保护、超时保护等等。

2.3.5 用触摸屏代替传统仪表并显示所有信息

智能化相关功能的技术参数参照《NB/T 42044—2014 3.6~40.5 kV 智能交流金属封闭开关设备和控制设备》标准执行。

3 整体试验

智能柜整体试验是保证智能开关设备必须进行的检验验证工作。首先要求所有的智能组件及其传感器必须全部安装、所有的智能组件必须正常工作, 在这样的前提要求下, 开关设备要求的绝缘试验、大容量试验、热机试验、EMC 试验必须逐一进行, 用以验证“智能开关设备”作为开关设备的能力。其次在各项试验中, “智能开关设备”的智能功能包括控制、监测、信息显示、通讯等应逐项验证, 用以检验“智能开关设备”是否具有所需要的智能化功能以及其智能化功能是否符合设计要求。

该项目产品一、二次设备是有机组合的整体, 在二次设备全部带电工作的状态下, 与一次设备共同完成全部型式试验, 包括电磁干扰试验、绝缘试验、大容量试验、热机试验。试验过程中, 智能组件通电, 智能单元操作和显示正常; 同时对智能组件进行实时后台监测, 所有操作和状态正常, 其试验接线示意图见图 8。

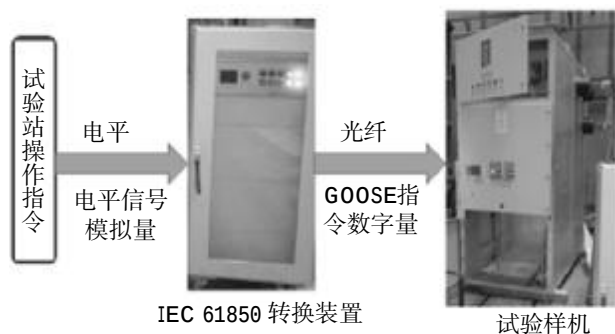


图 8 型式试验接线示意图

Fig. 8 The connection diagram of type test

智能化开关设备的试验内容、检验方法、评判准则如下:

1) 动热稳定试验中进行主回路(梅花触头电联接处)的温度在线监测;

2) EMC 试验中在各种干扰源持续的状态下进行所有控制操作和在线监测操作; 智能控制单元显示和监测单元工作正常。

3) 大容量试验、接地开关合分试验采用基于 IEC 61850 GOOSE 指令的网络控制方式; 大容量试验过程中进行断路器、手车、接地开关的合、分操作以及位置、状态的在线监测, 以上所有操作过程中智能控制单元显示和监测单元工作正常。

4) 机械操作试验中所有智能组件全程工作, 所有动作采用 GOOSE 机械操作试验指令方式; 机械操作试验中进行温度在线监测、断路器机械特性在线监测比对试验。

5) 温升试验, 监测单元工作正常, 且与西安高压电器研究院有限责任公司(西高院)温升监测设备进行比对试验, 测温误差小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

6) 比对试验, 目的为验证智能单元测量的准确性, 包括机械特性、温度监测、底盘车、接地开关电机电流等监测数据的比对。

3.1 机械特性比对试验

样机另安装直线位移传感器, 与机械特性在线监测用的红外位移传感器监测的参数进行比对, 以满足技术条件要求。断路器机械比对时安装的直线位移传感器及红外位移传感器见图 9。



(a) 直线位移传感器

(b) 红外位移传感器

图 9 位移传感器的安装

Fig. 9 The installation of displacement sensor

3.2 温升比对试验

在需要比对的同一点同时埋入热电偶和光纤测温点进行比对, 以满足技术条件要求。

温升试验过程中, 可采用手机通过 WiFi 连接至智能保护装置, 获取到的光纤测温信号。也可采用智能显示装置通过网络访问智能保护装置测量梅花触头温度值及环境温湿度值并显示。温升试验样机及显示见图 10。



图 10 温升试验

Fig. 10 Temperature rise test

3.3 底盘车电机电流、电动接地开关电机电流的比对试验

在底盘车、接地刀机械寿命前、后,在低电压、额定电压、高电压下对底盘车的进车和出车各比对 5 次,电机电流及回路电阻值均要满足技术参数要求。

4 结语

文中将一、二次设备一体设计,实现测量、保护、控制、监测、显示集成,就地采集、分析与处理。能够就地显示信息,远方交换信息。能进行断路器控制、状态监测及综合诊断,进行底盘车、接地刀控制、状态监测及综合诊断,实现梅花触头温度、断路器室、电缆室、母线室的温度信号的在线监测及综合诊断等功能。

文中 24 kV 中压智能开关设备是采用一次设备和二次设备集成设计,整体完成全套智能化型式试验的配电设备产品,实现基于 IEC 61850 协议,基于 GOOSE 数字化指令,进行断路器和接地开关的合分操作;实现机械特性监测、温度监测和底盘车、接地刀电机电流的智能化功能比对,验证了监测数据的准确性;实现试验状态实时通过网络协议上传后台。该产品性能可靠、稳定,二次配线简化,可满足国内电力市场对智能化开关设备的需求。

参考文献:

- [1] 韩书谟,钟建英,尹军华,等.智能高压开关设备技术发展[J]. 智能电网,2013,1(1):6-11.
HAN Shumo,ZHONG Jianying,YIN Junhua,et al.Technology development of intelligent high-voltage switchgear[J]. Intelligent Grid,2013,1(1):6-11.
- [2] 刘有为,周 华.智能高压开关设备信息流方案设计[J]. 高压电器,2011,47(1):1-4.
LIU Youwei,ZHOU Hua.Intelligent solutions and technical characteristics of high-voltage equipment[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):1-4.
- [3] 钟建英.智能高压开关设备技术研究进展[J]. 高压电器,2013,49(7):110-115.
ZHONG Jianying. Technology development summary of intelligent high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(7):110-115.
- [4] 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. Intelligent solutions and technical characteristics of high-voltage equipment[J]. Power System Technology,2010,34(7):1-4.
- [5] 潘勇良.智能断路器工作原理及技术特点[J]. 电器工业,2011,1(1):58-60.
PAN Yongliang. Working principle and technical characteristics of intelligent circuit breaker[J]. China Electrical Equipment Industry,2011,1(1):58-60.
- [6] NB/T 42044—2014 3.6~40.5 kV 智能交流金属封闭开关设备和控制设备[S].2014.
NB/T 42044—2014 Alternating-current metal-enclosed intelligent switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5kV[S].2014.
- [7] GB/T 28811—2012 高压开关设备和控制设备基于 IEC 61850 的数字接口[S].2012.
GB/T 28811—2012 High-voltage switchgear and controlgear: Digital interfaces based on IEC 61850[S].2012.
- [8] 高国英,张和顺,郭江文.GIS 隔离开关、接地开关机构的模拟试验装置[J]. 高压电器,2011,47(1):100-102.
GAO Guoying,ZHANG Heshun,GUO Jiangwen. Simulating test device for the mechanism for GIS disconnecting switches or earthing switches[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):100-102.
- [9] 钱家骊,袁大陆,杨丽华,等.高压开关柜——结构 计算 运行 发展[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
QIAN Jiali,YU AU Dalu,YANG Lihua,et al. The structure,calculate,operation and development of high voltage switchgear[M]. Beijing. China Electric Power Press,2006.
- [10] 朱美杰.感应式无线充电技术的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
ZHU Meijie.Comparison of different test circuit parameters [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology,2012.
- [11] 冀翔宇,冯冬芹.低功耗工业无线传感器网络的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表,2008,35(4):47-50.
JI Xiangyu,FENG Dongqin. Design and implementation of low power consumption industrial wireless sensor networking[J]. Control and Instruments in Chemical Industry,2008,35(4):47-50.
- [12] 刘 刚,郑青玉,王德钊.一种基于电磁感应的无线充电方法[J]. 北京信息科技大学学报,2013,4(2):51-54.

- LIU Gang, ZHENG Qingyu, WANG Dezhaoh. A wireless-charging method based on electromagnetic induction [J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2013, 4(2): 51-54.
- [13] 兰西柱, 李海鹏, 颜文靖. 基于 ZigBee 的高压开关柜无线测温系统的设计[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 45-50.
- LAN Xizhu, LI Haipeng, YAN Wenjing. Research and design of wireless temperature measurement system of high-voltage switch cabinet based on ZigBee technology[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2011, 31(1): 45-50.
- [14] 方勇灵. 智能开关设备优化设计方案探讨[J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 44-47.
- FANG Yongling. Discussion on the optimal design scheme for intelligent cubicle switchgear[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(4): 44-47.
- [15] 苑 舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- YUAN Shun. High voltage switch equipment condition monitoring and diagnosis technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [16] 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. Intelligent solutions and technical characteristics of high-voltage equipment[J]. Power System Technology[J], 2010, 34(7): 1-4.
- [17] 巩宪锋, 农红钢, 王长松. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 155-158.
- GONG Xianfeng, NONG Honggang, WANG Changsong. Research on temperature monitoring of isolators in HV switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 155-158.
- [18] 贾一凡, 殷晓刚, 姚晓飞, 等. 智能化高压开关机械试验测试用位移传感器的分析与研究[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 58-63.
- JIA Yifan, YIA Xiaogang, YAO Xiaofei, et al. Analysis and study on displacement transducer for testing in mechanical test of intelligent high-voltage switch [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 58-63.
- [19] 邓世杰. 中置式开关柜的无线测温方法[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 99-101.
- DENG Shijie. Wireless real-time temperature monitor in method for mid-set switch cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 99-101.

胡良蓉(1972—), 女, 硕士, 高工, 从事高压开关柜及智能化设计。

(上接第 180 页)

- [15] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 稍不均匀电场空气间隙击穿电压计算的新方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 662-668.
- SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. A new calculation method for the breakdown voltage of air gap in slightly uneven electric field[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 662-668.
- [16] SARMA M P, JANISCHEWSKY J W. DC corona on smooth conductors in air. steady-state analysis of the ionisation layer[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1969, 116(1): 161-166.
- [17] CALLIMBERTI I. A computer model for streamer propagation[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1972, 5(12): 2179-2189.
- [18] 胡凯旋, 刘利强, 李昌陵, 等. 基于仿生模式识别的 GIS 局部放电类型辨识[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 35-41.
- HU Kaixuan, LIU Liqiang, LI Changling, et al. GIS partial discharge type recognition based on the BPR[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 35-41.
- [19] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- LIU Sifeng. Gray system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [20] 郝 爽, 仲林林, 王小华, 等. 基于支持向机的高压断路器机械状态预测算法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 155-165.
- HAO Shuang, ZHONG Linlin, WANG Xiaohua, et al. Mechanical life prognosis of high voltage circuit breaker based on support vector machine[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 155-165.
- [21] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. New York, USA: Springer, 1995.
- [22] GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术第一部分: 一般试验要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- GB/T 16927.1—2011 High-voltage test techniques Part 1: General test requirements[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [23] IEEE Standards Board. IEEE Std 4—2013 (Revision of IEEE Std 4—1995), IEEE standard techniques for high-voltage testing[S]. New York: IEEE, 2013.
- 唐烈峰(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为空气间隙放电机理、电缆附件绝缘检测。
- 阮江军(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电磁场数值计算、高电压与绝缘技术等方面的研究工作。
- 邱志斌(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为空气间隙放电、输变电设备外绝缘。