

# X 射线成像技术在组合电器中的应用研究

王 大 义 , 孙 家 孝 , 蒋 昊 巍 , 李 均

(四川革什扎水电开发有限责任公司,四川 丹巴 626300)

**摘 要:**常规手段对组合电器内部结构进行开盖检查需要停电进行且需投入大量的人力物力,因此,做好对组合电器的状态监测、结构检测及事故预防非常重要。将 X 射线成像技术成功应用于电力设备,弥补了停电检测的缺点,节约了大量的成本。笔者研究 X 射线探伤原理、X 射线检测仪器构成及操作,提出 X 射线检测的安全性措施,完成了组合电器隔离开关和断路器断口检测,通过试验进一步验证了 X 射线成像对 SF<sub>6</sub> 气体成分(即分解物)没有任何影响。X 射线成像技术不仅适用于组合电器设备,也可应用于敞开式电气设备、绝缘子和金具探伤、电缆接头检测等。X 射线成像技术实现了设备隐蔽缺陷的“可视化”,切实解决了传统工作中的一些难题,具有很高的推广应用价值。

**关键词:**X 射线;检测仪器;组合电器;隔离开关;断路器

中图分类号:O434.1;TM595;D035.39

文献标识码:A

文章编号:1001-2184(2020)06-0122-04

## Application of X-Ray Imaging Technology in GIS Combined Electrical Apparatus

WANG Dayi, SUN Jiexiao, JIANG Haowei, LI Jun

(Sichuan Geshizha Hydropower Development Co., LTD, Danba, Sichuan, 626300)

**Abstract:** It is necessary to cut off the power and invest a lot of manpower and material resources to open the cover of the internal structure of the GIS combined electrical apparatus for inspection by conventional means. Therefore, it is particularly important to do a good job in condition monitoring, structure detection and accident prevention of the combined electrical apparatus. X-ray imaging technology is successfully applied to power equipment, which cover the shortages of power failure detection and saves a lot of cost. The author studies the principle of X-ray flaw detection, the composition and operation of X-ray detection instrument, puts forward the safety measures for X-ray detection, completes the fracture detection of disconnector and circuit interrupter of combined electrical apparatus, and further verifies that X-ray imaging has no influence on the gas composition of SF<sub>6</sub> (i. e. decomposition products). X-ray imaging technology is not only suitable for combined electrical apparatus, but also can be used for open electrical equipment, insulator and fittings detection, cable joint detection and so on. X-ray imaging technology realizes the "visualization" of hidden defects of equipment, solves some problems in traditional work, and has a very high value of popularization and application.

**Key words:** X-ray; detection instrument; combined electrical apparatus; disconnector; circuit interrupter

## 1 概 述

组合电器(GIS)设备是以 SF<sub>6</sub> 气体为绝缘和灭弧介质的结构紧凑性电气设备,将断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、母线、进出线套管或电缆终端等元件组合封闭在接地的铝合金壳体内,不受环境影响,噪音和无线电干扰小,占地面积小,在电力系统中的应用越来越广泛,但也存在诸多问题,组合电器一旦发生内部故障,检修时间长,难度大,严重威胁着电力系统的安全可靠性<sup>[1]</sup>。因此,做好对组合电器的

状态监测、结构检测及事故预防非常重要。

## 2 组合电器隔离开关故障的启示

某 500 kV1 号变压器主接线见图 1,该开关设备采用组合电器,各设备运行状态良好。2020 年 3 月 26 日,500 kV 1 号变压器 1 号、2 号 T 区保护装置差动保护动作,跳开 5001 断路器、5002 断路器、1 号发电机出口断路器,1 号机组甩负荷 36.6 MW。

停电后,检查 5001、5002 开关外观、气压、油压未发现明显异常,检查 500 kV 1 号变压器间隔 1 号、2 号 T 区保护装置,T 区差动保护均动作,

收稿日期:2020-08-09

其他保护装置无动作情况。

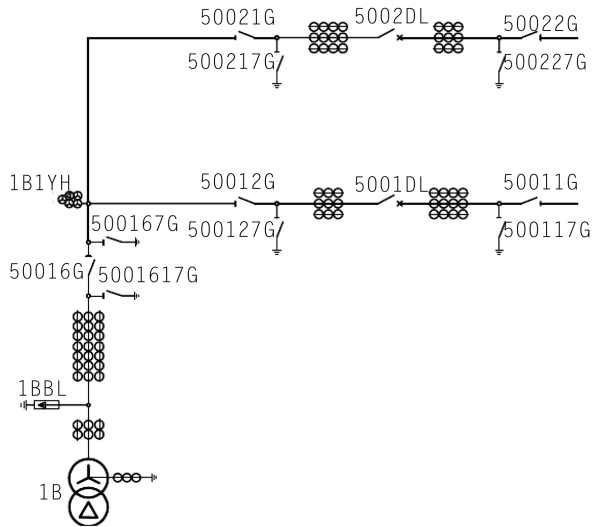


图1 主接线图

经打开通隔离开关气室观察孔板,发现隔离开关 50021G B相气室存在明显的放电痕迹,见图2。

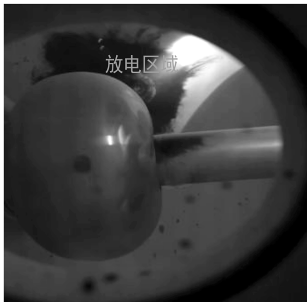


图2 隔离开关放电

经拆解,发现隔离开关动触头行程未到位是造成该次故障的主要原因。为全面检查其他设备情况,采取开启隔离刀闸观察孔的方式,对其他运行的隔离刀闸进行专项检查,发现合闸状态下,有13组隔离开关动触头不同程度地存在此问题。

采用开启隔离刀闸观察孔检查的方法需要停电才能完成,同时需要对 SF<sub>6</sub> 气体进行回收,检查完成后又需要将合格的 SF<sub>6</sub> 气体重新充入设备中,需要投入大量的人力物力。为此,采用 X 射线成像技术,将更好地解决停电问题,同时,不需对 SF<sub>6</sub> 气体进行回收。

### 3 X 射线成像技术

#### 3.1 X 射线探伤原理

X 射线(X-ray)波长短,能量大,具有超强的穿透能力。X 射线穿过物质的过程中,仅有部分会被物质吸收并会发生散射<sup>[2]</sup>,利用这一现象,当被测量的物质中存在缺陷时,该缺陷部位就会影响到射线的吸收,进而实现对缺陷的探测,这一原理与医学上的应用是一致的。X 射线能使胶片等感光材料感光,胶片感光的强弱与 X 射线量成正比,通过 X 射线感光强度的变化,经处理后形成影像。缺陷部分和完好部分在影像上的黑度图象是不一样的,这就是 X 射线探伤的基本原理。此外,X 射线还有着色作用,其长期照射某些物质(如水晶)后,使晶体因脱水而颜色改变。X 射线探伤是现代工业生产中质量检测、质量控制、质量保证的重要手段,一般用于金属、非金属等材料制成的零部件,铸造及焊接部件进行无损检测,以确定其内部缺陷<sup>[3]</sup>,如夹渣,裂纹,气孔,未焊透,未融合等。在机械、电力、石油、化工、航空、造船、国防军工等部门,尤其是在锅炉压力容器焊缝的检测中有极为广泛的应用<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 X 射线检测仪器

X 射线探伤检测仪器主要有三个部分组成:

(1)X 射线探伤机发生器,主要作用是提供 X 射线源,激发 X 光,起到类似于摄像机的作用。X 射线探伤机发生器一般由 X 射线管、高压变压器与绝缘气体(SF<sub>6</sub>)组成,通常将其封装在一个固定铝壳内。此外,还有作冷却用的风扇和散热器。高压变压器利用具有良好绝缘性能的 SF<sub>6</sub> 气体进行绝缘,但当 X 射线探伤机发生器 SF<sub>6</sub> 气体压力低于规定值(0.4 MPa)的时候就不能再使用。

(2)X 射线探伤机控制器,主要作用是对 X 射线探伤机发生器进行控制,可以调节延时拍摄时间、功率等。控制器能够自动稳定 X 射线的管电压和管电流。管电压及曝光时间均可预置,按相应的按钮即可重复曝光。如果在曝光期间保护单元动作,计时器将显示当前时刻,不归零。重新开机,可继续曝光至预置时间,因而可节省胶片。电源电压的波动通过控制器本身自动调节,以保证获得稳定的 X 射线束。

(3)移动式计算机及操作系统,主要作用是对拍摄数据进行处理影像和分析。其原理见图3。

#### 3.3 X 射线检测安全性措施

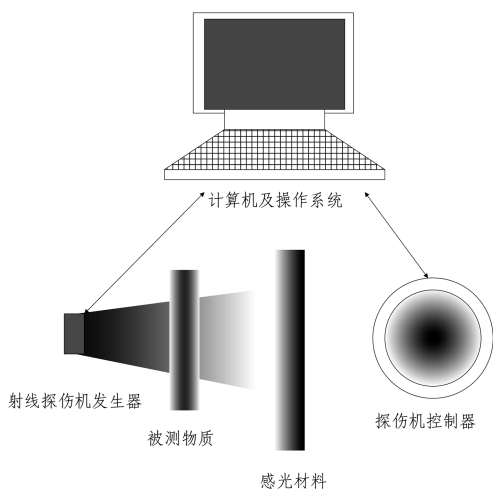


图 3 X 射线探伤检测仪器原理

X 射线检测安全性措施如下：

(1)对 X 射线探伤检测仪器进行远程控制，利用无线技术进行数据传输。

(2)为了便于作业人员及时撤离现场，调节控制拍摄延时时间，控制 X 射线对作业人员的照射影响，避免受到 X 射线的辐射。根据经验，延时不小于 1 分钟。

(3)确定好 X 射线探伤机控制器自适应射线机和探伤检测对象间的相对位置，调节合适的射线功率，最大限度的减少辐射能量。

(4)在作业人员与辐射源之间加一层足够厚的铅板，采用厚度不小于 2 mm 铅板做好防护。

(5)控制辐射源与业人员之间的距离，划定射线控制区与隔离区，并配置射线泄漏监测仪，超出安全值进行及时报警。在工作现场，无法做到铅板防护时，要以管头焦点为中心，半径 20 m 内应无人员滞留。

(6)在工作区域开始作业前，应用接地线将控制器接于地端接专用接地线上。用连接电缆将控制器和发生器连接起来，并确保接触良好。

## 4 X 射线成像技术的应用

### 4.1 X 射线检测仪器操作

正确使用 X 射线探伤检测仪器很重要，未经培训合格的人员不能使用 X 射线探伤检测仪器。正常的操作流程见图 4。

在装置放置好后，正确连接电源线，打开电源控制开关，进一步检查风扇和散热器等是否能够正常工作，然后开机自检，该过程大约需要 10 几

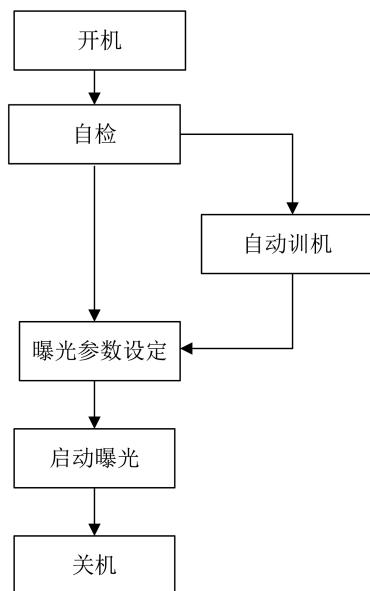


图 4 X 射线探伤检测仪器操作流程

秒钟，只有自检正常后才能开始工作。根据 X 射线探伤检测仪器停机时长确定是否进行训机，一般停机时长低于 48 小时不用训机，不重视训机将造成 X 射线管损坏或寿命缩短。曝光参数的设定主要包括 KV 值和曝光时间，可记忆最近一次设定的曝光参数，在关机后不会丢失。为了便于作业人员及时撤离现场，避免受到 X 射线的辐射，可以设置延时启动曝光。延时启动后，开始倒计时，指示灯闪亮，同时发出警示声，延时完毕，自动开启高压曝光。需要注意的是：在延时过程中按启高压按钮可直接启动曝光，按停高压按钮可停止曝光操作。

### 4.2 组合电器隔离开关断口检测

运用 X 射线探伤检测仪器对组合电器隔离开关进行 X 射线检测工作，考虑组合电器铝合金壳体内最大穿透功率，调节合适的射线功率，根据组合电器隔离开关断口最大成像面积，选择合适的成像面板<sup>[5]</sup>。在用 X 射线探伤检测仪器对组合电器隔离开关断口检测进行检测时，将射线探伤机发生器正对组合电器隔离开关断口处，成像板放置于射线探伤机发生器正对面，按要求进行操作，即可拍摄所需要的成像照片。

在此后的过程中，多次对不同间隔的隔离开关分闸、合闸两个位置进行拍摄检测其内部零部件情况。经检测发现，有一组隔离开关 C 相的罐体内部有螺栓遗落(图 5)。



图 5 罐体内螺丝遗落

针对 X 射线探伤检测仪器发现的问题,立即对该隔离开关进行开盖检查,进一步证实 X 射线探伤检测的准确性。

#### 4.3 组合电器断路器断口检测

运用 X 射线探伤检测仪器对组合电器断路器进行 X 射线检测工作,将射线探伤机发生器正对组合电器断路器断口处,考虑到断路器气室体积较大,选择 2 张成像面板并排放置于射线探伤机发生器正对面,按要求进行操作,即可拍摄所需要的成像照片(图 6)。

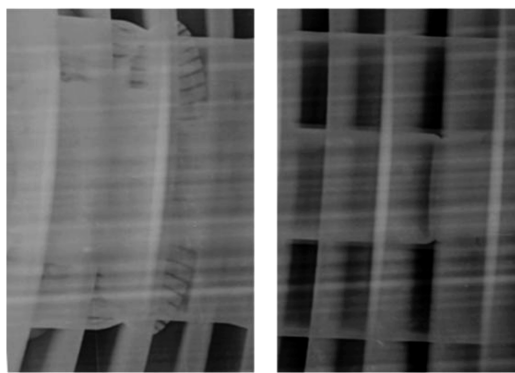


图 6 双成像面板断路器断口检测

#### 4.4 X 射线成像对 SF<sub>6</sub> 气体成分的影响

由于 X 射线能量大,具有超强的穿透力,为此,通过试验进一步验证 X 射线成像对 SF<sub>6</sub> 气体成分的影响。

试验前,测得现场环境温度为 25℃,湿度为 60%。采用 SF<sub>6</sub> 设备气体综合检测仪,根据被测气体中的不同组分改变电化学传感器输出电信号,从而确定被测气体中的组分及其含量,对 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 气体的检测量程应大于 100 μL/L,CO 气体的检测量程应大于 500 μL/L。按照正确的操

作流程,反复测量 3 次,取平均值作为最终测量结果。在 X 射线探伤检测仪器对组合电器成像前,特意选择了 SF<sub>6</sub> 气体中已含有少量分解物的气室进行检测(表 1)。

为了较为准确地获取 X 射线成像对 SF<sub>6</sub> 气体成分的影响,防止因设备内部吸附剂的存在造

表 1 X 射线成像对 SF<sub>6</sub> 气体成分的影响

成分	X 射线成像前	X 射线成像后
CF <sub>4</sub> (μL/L)	0	0
CO(μL/L)	3.0	2.9
CO <sub>2</sub> (μL/L)	0	0
HF(μL/L)	0	0
SO <sub>2</sub> (μL/L)	0.22	0.22
SF <sub>4</sub> (μL/L)	0	0
SOF <sub>2</sub> (μL/L)	0	0
H <sub>2</sub> S(μL/L)	0	0
纯度(%)	99.57	99.55
湿度(μL/L)	41.42	41.43

成对测量结果的影响,在 X 射线成像完成后,迅速采用同一台 SF<sub>6</sub> 设备气体综合检测仪,按照正确的操作流程,反复测量 3 次,取平均值作为最终测量结果(表 1)。

从表 1 可以看出,除因测量误差引起数据上的微小差异外,X 射线成像对 SF<sub>6</sub> 气体成分即分解物没有任何影响。

## 5 结 语

X 射线成像技术在电力系统中的成功应用,与传统的技术手段相比,弥补了停电检测的缺点,节约了大量的人力物力。

组合电器设备是以 SF<sub>6</sub> 气体为绝缘和灭弧介质,通过多次对使用 X 射线成像前后 SF<sub>6</sub> 气体成分的检测,试验结果表面 X 射线成像不会对 SF<sub>6</sub> 气体成分造成的影响,也不会对设备材质造成危害,是一种应用前景广阔的“无损”检测技术。

X 射线成像技术不仅适用于组合电器设备,也可应用于敞开式电气设备、绝缘子和金具探伤、电缆接头检测等。

X 射线成像技术实现了设备隐蔽缺陷的“可视化”,切实解决了传统工作中的一些难题,具有非常高的推广应用价值。

应用 X 射线进行电气设备检测,应注意采取安全措施,划定射线控制区与隔离区,在作业人员与辐射源之间加一层足够厚的铅板或混凝土板,做好防护。

(下转第 135 页)



- [4] 李攀光,贺玉彬,等.流域水电智慧调度—大渡河探索与实践[M].北京:科学出版社,2019.
- [5] 罗玮,钟青祥,顾发英.大渡河梯级电站群实时负荷智能调控技术研究[J].中国电机工程学报,2019,39(09):2553—2560.
- [6] 邹建国,芮钧,吴正义.梯级水电站群优化调度控制研究及解决方案[J].电力自动化设备,2007(10):107—111.
- [7] 李蓬路.经济调度控制(EDC)在四川黑水河集控的运用[J].水电厂自动化,2016,37(01):17—18.
- [8] 吴家乐.流域梯级电站集中控制和联合优化调度浅析[J].水电厂自动化,2016,37(03):58—61.
- [9] 尤渺.大渡河流域下游梯级电站发电优化调度研究[D].重庆大学,2008.

- [10] 汤洁.乌江梯级水电站的经济运行研究及应用[D].河海大学,2005.
- [11] 王家华.红水河流域梯级水电站联合发电控制[D].贵州大学,2009.
- [12] 卢立宇,黄炜斌,陶春华,李永利,王金龙.大渡河流域梯级电站经济调度策略研究[J].水力发电,2017,43(03):106—110+131.

#### 作者简介:

李雪梅(1989-),女,四川内江人,工程师,从事梯级水电调度工作;  
钟青祥(1979-),女,四川金堂人,高级工程师,从事梯级水电技术管理工作.  
(责任编辑:吴永红)

(上接第125页)

#### 参考文献:

- [1] 许焕清,马君鹏,王成亮,等. GIS设备典型缺陷的X射线数字成像检测技术[J].电网技术,2017,41(5):1697—1701.
- [2] 闫斌,何喜梅,王志惠,等. X射线数字成像检测系统在GIS设备中的应用[J].高压电器,2010,46(11):89—90.
- [3] 袁文静,董晓,秦国永. X射线实时成像检测技术在动车组上的应用[J].中国科技投资,2018.
- [4] 王坤,李亚宁,杨迎春,等.一种x射线发射器移动调节

装置的制造方法[P].国家知识产权局,2016.06.

- [5] 任立新,陈飞宇,路遥,等.基于X射线数字成像技术的配电设备无损检测[J].农村电气化,2018,第5期:30—32.

#### 作者简介:

王大义(1991-),男,河南邓州人,本科,从事运维工作;  
孙家孝(1996-),男,四川成都人,本科,从事发电运维工作;  
蒋昊巍(1998-),男,四川乐山人,本科,从事发电运维工作;  
李均(1991-),男,四川达州人,本科,从事发电运维工作.

(责任编辑:吴永红)

(上接第10页)

型会先后出现与实际试验结果偏离较大的情况。并且在同样的应力下,这两种模型得到的应变较试验结果偏小,偏于不安全范围。

硬化土小应变模型能较好地模拟砂卵石土体的应力应变特征,从初始段到最终破坏应变段都与实际试验结果有着较大程度的吻合,只是在试样2和试样3大应变状态下出现应变软化现象时有所偏差。

#### 5 结语

成都广泛分布着砂卵石地层,笔者利用大型三轴试验机进行了数组试验,并将结果与采用三种本构模型得到的模拟三轴数据进行了对比,得出以下结论:

(1)三种本构模型的主要参数都可通过常规室内试验方法获取或推导,有利于工程实际应用的推广。

(2)相较于摩尔—库伦模型和修正摩尔—库伦模型,硬化土小应变模型可以更好的反应土体的应力应变特征,并且前两类模型的结果偏于不安全范围。

(3)硬化土小应变模型的部分参数基于前人的经验,下一步应开展卸载应力路径三轴试验和通过实际工程的监测数据进行反演分析优化模型参数。

#### 参考文献:

- [1] 王继庄.粗粒料的变形特性和缩尺效应[J].岩土工程学报,1994(04):89—95.
- [2] 沈珠江,赵魁芝.堆石坝流变变形的反馈分析[J].水利学报,1998(06):2—7.
- [3] 何建平,彭兴芝,祖焯,等.砂卵石土动、静特性的对比试验研究[J].长江科学院院报,2010(08):40—43.
- [4] 曹海静.成都地铁砂卵石基坑变形监控指标研究[D].中国铁道科学研究院,2015.
- [5] 王海波,徐明,宋二祥.基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J].岩土力学,2011(01):39—43.
- [6] 刘熙媛,同澍旺,窦远明,顾杰.模拟基坑开挖过程的试验研究[J].岩土力学,2005(01):97—100.
- [7] T B. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.

#### 作者简介:

李峰(1988-),男,重庆人,硕士,工程师,主要从事岩土工程、地下工程等领域的设计与科研工作;  
程丽娟(1984-),女,四川仁寿人,工学博士学位,正高级工程师,主要从事岩土工程、地下工程的科研和设计工作.

(责任编辑:卓政昌)