

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.032

X射线数字成像技术在开关设备缺陷诊断中的应用

向 真, 张 欣, 黄荣辉, 曾乔迪, 江 韬

(深圳供电局有限公司, 深圳 518001)

摘要: 高压开关设备的运行状态直接影响着电力系统的安全稳定运行。目前针对开关设备缺陷检测的检测手段较为缺乏,且往往无法给出具体的缺陷部位。X射线具有很强的穿透能力,因此可用于开关设备内部结构的无损检测。文中介绍了X射线数字成像技术的检测原理及检测系统,分析了X射线数字成像技术在开关设备缺陷诊断中的应用效果。检测结果表明,该技术能够实现开关设备内部缺陷的准确定位。

关键词: X射线; 数字成像; 开关设备; 组合电器; 断路器; 缺陷诊断

Application of X-ray Digital Radiography in the Defect Diagnosis of Switchgears

XIANG Zhen, ZHANG Xin, HUANG Ronghui, ZENG Qiaodi, JIANG Tao

(Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: The operating condition of high voltage switchgears directly influences the safe and stable operation of power grid. However, detection methods for the defect diagnosis of switchgears are rare, and usually unable to identify the specific defect. X-ray, due to its strong penetrability, is used in nondestructive testing of the internal structure of switchgears. This paper describes the testing principle and testing system of X-ray digital radiography (XDR), and analyzes the effect of XDR applied in the defect diagnosis of switchgears. The testing results show that XDR is an effective way to locate the inner defects in switchgears.

Key words: X-ray; digital radiography; switchgear; GIS; circuit breaker; defect diagnosis

0 引言

高压开关设备能够闭合、承载和开断正常回路条件下的电流,并在规定时间内承载和开断异常回路条件下的电流,其运行状态直接影响着电力系统的安全稳定运行^[1]。由于开关设备有金属或瓷外壳防护,针对开关设备的缺陷诊断,目前大多使用回路电阻测量^[2]、局部放电测量^[3-6]、SF₆气体成分分析^[7-8]、红外成像检测^[9]等常规检测手段,但这些方法往往只能给出一个大概的判断,无法在不解体设备的情况下给出具体的缺陷判断。而X射线成像技术所实现的“可视化”无损检测,能够直观反映开关设备内部部件的缺陷情况,为设备缺陷的准确定位及定位提供技术支持。青海、云南、山西等地电网公司已先后将X射线成像技术用于开关设备的检测与诊断,并取得了良好成效^[10-15]。自2013年底引进X射线成像技术以来,深圳供电局已将其成功应用于

多起开关设备缺陷的诊断分析。

1 X射线数字成像技术

X射线(X-ray)由德国物理学家伦琴(W. C. Rontgen)于1895年发现,故又称伦琴射线。X射线是一种波长很短的电磁辐射,其波长介于紫外线与 γ 射线之间,约为0.01~10 nm。X射线具有很强的穿透能力,已被广泛应用于医学和工业领域^[16]。

X射线成像检测是比较常用的无损检测方法。它是利用X射线穿透物体后,其强度因吸收和散射而衰减,衰减程度取决于物体的材料和厚度,进而在感光材料上获得与材料内部结构相对应的黑度不同的图像,达到检测目的^[17-18]。

X射线成像技术已从最初采用胶片照相,发展到使用直接数字成像(direct digital radiography, DDR或简称DR)和计算机射线成像(computed radiography, CR)等数字化成像技术。X射线数字成像技术使得实时采集、储存和传输图像成为可能,并且可以利

用各种图像处理技术对图像进行处理,改善图像质量。与CR相比,DR具有操作简单、检出效率高、图像质量好等优点^[19-20],文中即采用基于DR技术的X射线数字成像检测系统,见图1。

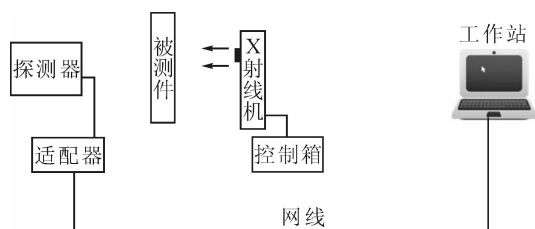


图1 X射线数字成像检测系统示意图

Fig. 1 Schematic of XDR detection system

2 X射线数字成像技术在开关设备缺陷诊断中的应用

2.1 GIS 隔离开关的X射线成像检测

某220 kV GIS间隔隔离开关机构大修工作完成,在进行某母线侧开关特性试验时,无论开关机构指示在合闸位置还是分闸位置,A相开关均为接地状态,而B、C两相状态正确。

初步怀疑是B0地刀A相外壳绝缘垫失效。但在将B0地刀分闸后,A相接地连板不接地,可排除外壳接地。将该开关机构置于分闸位置,测得A相开关回路电阻为 $28\mu\Omega$,判断A相开关本体一直处于导通状态。

随后,打开A相开关气室的手孔盖,发现开关本体处于合闸状态。通过A相拉杆进行分合操作,开关动触头未动作,内部绝缘传动杆未发生断裂且能跟随外部拉杆转动。

为进一步确定缺陷原因,利用X射线探伤仪对缺陷开关进行透视检测。分别将开关传动轴动作到合闸位置与分闸位置,得到开关内部部件的成像结果见图2。通过对比两张图片可发现动触头拐臂的位置未发生变化。结合对开关内部部件的分析,判断传动轴与拐臂连接部位松脱。

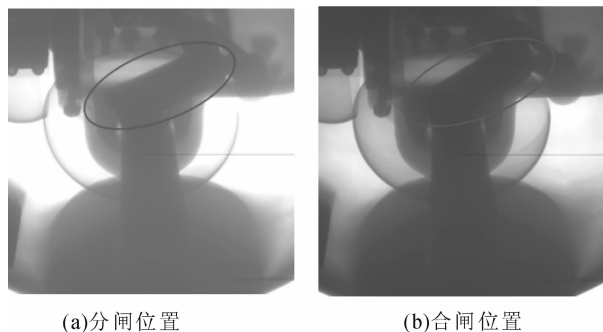
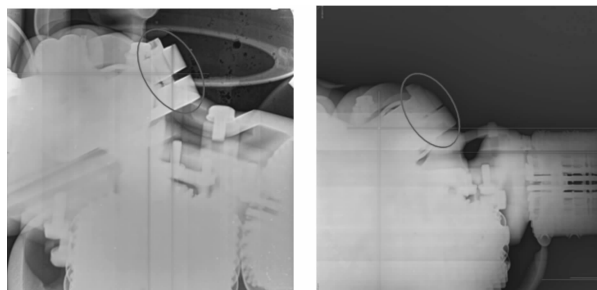


图2 不同分合闸位置下的开关气室X射线成像图

Fig. 2 X-ray radiographs of disconnector in open and closed position

对解体下的缺陷气室及新气室分别进行X射线探伤,得到拐臂位置的成像结果见图3,可见缺陷气室拐臂的紧固间隙过大。



(a)缺陷气室

(b)正常气室

图3 缺陷气室及正常气室拐臂X射线成像图

Fig. 3 X-ray radiographs of crank arm in defective and new disconnector chamber

通过内窥镜检查,确定开关操作连杆六方轴与动触头拐臂连接处松动,导致操作杆空转,无法带动拐臂转动,见图4。



图4 缺陷开关气室内窥镜检查

Fig. 4 Endoscopy of defective disconnector

2.2 敞开式断路器的X射线成像检测

某500 kV敞开式变电站在一次500 kV断路器分闸特性试验中,在机构分闸状态下,开关特性测试仪显示某断路器C相一侧断口导通。随后,通过万用表多次测量该断口均为导通状态。对该断口做回路电阻试验,测得阻值为 $30\mu\Omega$,而另一侧断口以及B相同侧断口阻值均为无穷大。

对该断路器进行X射线透视检测,成像系统现场布置见图5,X射线机放置于台架上,探测器则通过高工车升至灭弧单元上方。

由于灭弧室结构相对复杂,重点检测灭弧室与中间极柱之间的水平连接部分,见图6,图6中连接杆靠法兰侧与极柱上方曲柄机构相连,靠触头侧通过止动销与水平拉杆相连。

以仰视角度对该断路器进行X射线透视检测,得到缺陷断口和正常断口止动销位置成像结果分别见图7、8。通过对比两侧断口成像图,并对照处于



图5 X射线数字成像检测系统的现场布置

Fig. 5 Field layout of XDR detection system

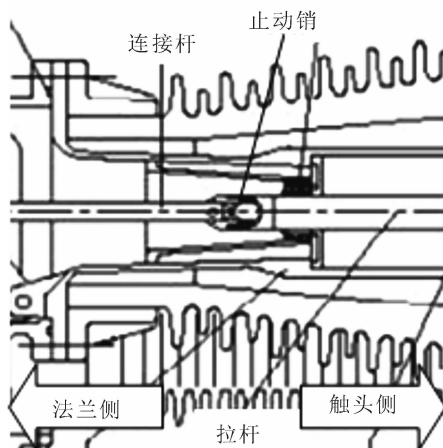


图6 合闸断口连接杆与拉杆之间的止动销

Fig. 6 Diagram of the stop pin connecting coupling rod and pull rod in closed circuit-breaker

合闸状态的断口同样位置侧视示意图(图6),可以看出,缺陷断口止动销位于图7中三角锥以内,而正常分闸断口止动销被拉到图8中三角锥大口沿外。说明分闸时缺陷断口连接杆未动作到位,由此可排除止动销及灭弧系统失效导致断路器分闸异常的可能,判断可能出现连接失效的地方为绝缘极柱内垂直操作杆和连接杆之间的传动部分,见图9。

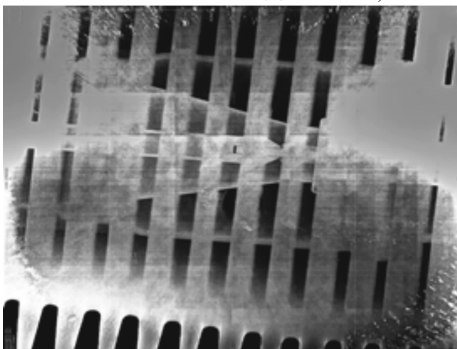


图7 缺陷断口止动销位置 X射线成像图

Fig. 7 X-ray radiograph of stop pin in defective interrupter

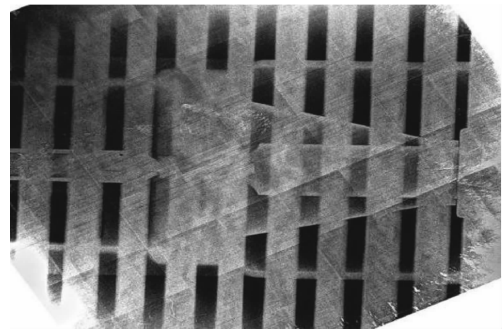


图8 正常断口止动销位置 X射线成像图

Fig. 8 X-ray radiograph of stop pin in normal interrupter unit

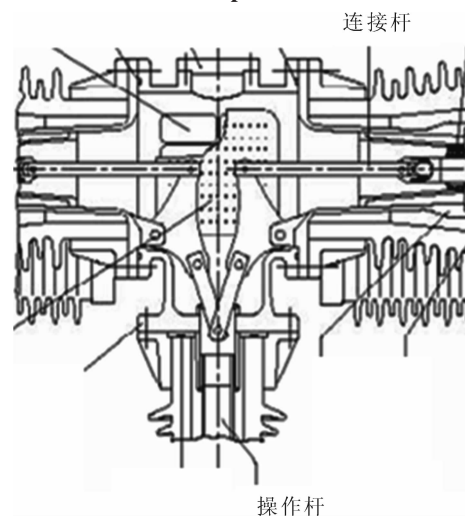
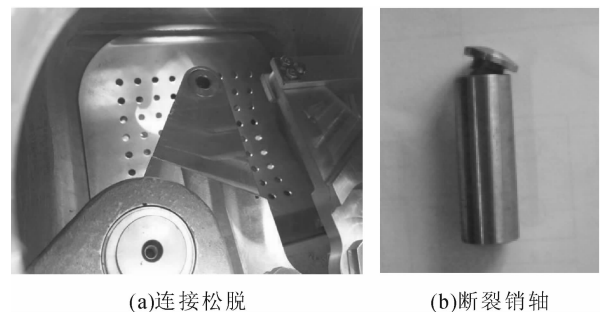


图9 断路器操作杆与连接杆之间的曲柄机构

Fig. 9 Bell-crank mechanism of circuit-breaker

打开绝缘极柱上方曲柄机构箱盖板进行检查,发现缺陷断口连接杆与操作杆上方内摇臂发生松脱,连接杆内销轴断裂脱落,导致曲柄机构失效,见图10。



(a)连接松脱

(b)断裂销轴

图10 缺陷断路器曲柄机构箱开盖检查情况

Fig. 10 Inspection of defective bell-crank mechanism after opening cover of the housing

安装好曲柄机构箱盖板后,将缺陷断路器灭弧单元连同绝缘极柱进行更换,对吊装下来不含绝缘支柱的缺陷断路器进行X射线探伤,得到曲柄机构的成像结果见图11,也能判断连接杆与内摇臂间的连接松脱。



图 11 缺陷断路器曲柄机构 X 射线成像图

Fig. 11 X-ray radiograph of defective bell-crank mechanism

为验证 X 射线数字成像技术能否用于检查同型号销轴发生轴向窜动但未脱落的情形,模拟了销轴装配不到位缺陷并进行透视检测,见图 12。将一相断路器安装在工装架上,该断路器含双断口灭弧单元和 2 个分级电容,并带有 1 个极柱电晕环。断路器曲柄机构一侧销轴正常装配,即将限位片卡入销轴卡槽并固定限位片;另一侧限位片未卡住销轴卡槽但紧贴销轴帽。



(a)模拟装配缺陷



(b)成像系统布置

图 12 模拟装配缺陷及 X 射线成像系统布置

Fig. 12 Mimic assembly defect and XDR detection system layout

曲柄机构的 X 射线成像结果见图 13, 从图 13 可以看到,正常装配侧销轴成像图均匀,而缺陷侧销轴成像图出现空隙,原因是销轴卡槽伸入连接杆,其直径较销轴其他部分小。由此证明,X 射线检测方法可用于排查同类销轴装配不到位缺陷。

3 结语

X 射线具有很强的穿透能力,能够穿透 GIS 设备金属护壳及断路器瓷护套。基于 X 射线数字成像技术对开关设备进行透视检测,可以实时掌握设备内部结构状态信息。变电站现场试验表明,X 射线数字成像技术能够在不停电、不解体的情况下,直观反映开关设备内部部件的缺陷情况,为开关设备的缺陷诊断及排查提供技术支持。

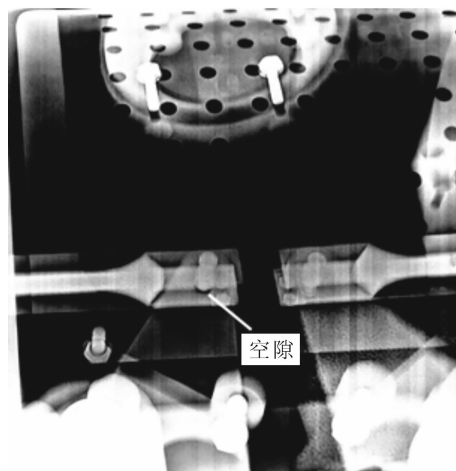


图 13 模拟装配缺陷 X 射线成像图

Fig. 13 X-ray radiograph of mimic assembly defect

参考文献:

- [1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社,2011.
LIN Xin. Modern high voltage switchgear technology[M]. 2nd ed. Beijing:China Machine Press,2011.
- [2] 徐 鹏,秦华蔚,郑树青,等. 抽水蓄能机组发电机断路器回路电阻异常增大原因分析[J]. 高压电器,2012,48(3):90-94.
XU Peng, QIN Huawei, ZHENG Shuqing, et al. Analysis of abnormal increase of circuit breaker resistance for pumped storage generator units[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3):90-94.
- [3] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等. 基于超高频法的典型 GIS 局部放电检测[J]. 高压电器,2012,48(4):7-12.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4):7-12.
- [4] 朱海涛,刘晓华,李 明,等. 750 kV GIS 隔离开关内部局放检测及诊断分析[J]. 高压电器,2010,46(8):6-9.
ZHU Haitao, LIU Xiaohua, LI Ming, et al. Detection and diagnostic analysis of internal partial discharge in 750 kV GIS disconnectors[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8):6-9.
- [5] 严玉婷,王亚舟,段绍辉,等. GIS 局部放电带电测试原理研究及现场缺陷分析[J]. 电瓷避雷器,2012(3):51-56.
YAN Yuting, WANG Yazhou, DUAN Shaohui, et al. Study on live test principle of GIS partial discharge and analysis of site defects[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(3):51-56.
- [6] 朱正国,江健武,钟建灵,等. 深圳 110 kV 高新站 110 kV GIS 秀高 I 线间隔缺陷分析[J]. 高压电器 2012,48(11):119-124.
ZHU Zhengguo, JIANG Jianwu, ZHONG Jianling, et al. Analysis of defects in Xiugao no.1 line compartment of

- 110 kV GIS in 110 kV Gaoxin substation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 119-124.
- [7] 李国兴, 姜子秋, 王晓丹. SF₆分解产物体积分数检测在SF₆电气设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 104-108.
- LI Guoxing, JIANG Ziqiu, WANG Xiaodan. Application of content of SF₆ decomposition products in fault diagnosis of SF₆ electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12): 104-108.
- [8] 杨彦博, 董明, 陈晓清, 等. GIS中SF₆气体分解机理分析及使用维护方法建议[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 18-23.
- YANG Yanbo, DONG Ming, CHEN Xiaoqing, et al. Analysis of SF₆ decomposition mechanism and maintenance strategies of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 18-23.
- [9] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发热故障中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 92-95.
- CHEN Baoyi. Application of infrared diagnostic technology in high voltage circuit breaker internal heat fault[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 92-95.
- [10] 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): 89-91.
- YAN Bin, HE Ximei, WANG Zhihui, et al. Application of X-ray digital imaging defect detection system in GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 89-91.
- [11] 闫斌, 何喜梅, 吴童生, 等. GIS设备X射线可视化检测技术[J]. 中国电力, 2010, 43(7): 44-47.
- YAN Bin, HE Ximei, WU Tongsheng, et al. X-ray visualization detection technology for GIS equipment[J]. Electric Power, 2010, 43(7): 44-47.
- [12] 王达达, 魏杰, 于虹, 等. X射线数字成像对GIS设备的无损检测[J]. 云南电力技术, 2012, 40(2): 8-10.
- WANG Dada, WEI Jie, YU Hong, et al. Nondestructive testing of GIS using X-ray digital radiography[J]. Yunnan Electric Power, 2012, 40(2): 8-10.
- [13] 郭涛涛, 王达达, 于虹, 等. GIS设备X射线可视化检测中焦距的选择[J]. 南方电网技术, 2012, 6(3): 111-114.
- GUO Taotao, WANG Dada, YU Hong, et al. Selection of focal length parameter in the GIS equipment's x-ray visualization testing[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(3): 111-114.
- [14] 闫文斌, 王达达, 李卫国, 等. X射线对复合绝缘子内部缺陷的透照检测和诊断[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 58-66.
- YAN Wenbin, WANG Dada, LI Weiguo, et al. Application of X-ray technology in composite insulators defect diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 58-66.
- [15] 高鹏, 米康民, 张来福. X射线成像技术在开关设备状态检修中的应用[J]. 山西电力, 2012(6): 13-15.
- GAO Peng, MI Kangmin, ZHANG Laifu. Application and research of X-ray imaging detection technology in condition-based maintenance of switch devices[J]. Shanxi Electric Power, 2012(6): 13-15.
- [16] 张小海, 郭冠华. 射线检测[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- ZHANG Xiaohai, GUO Guanhua. Radiographic testing[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [17] 李伟. 高分辨率X射线数字化成像技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2009.
- [18] 李汉志. X射线数字化成像技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2010.
- [19] 胡永东. 枪管类零件X射线探伤检测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [20] 刘海宽. X射线诊断所致受检者剂量的估算模式研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- 向真(1989—), 男, 助理工程师, 硕士, 从事输变电设备技术监督与检测分析工作。
- 张欣(1984—), 男, 工程师, 大学本科, 长期从事输变电设备技术监督与检测分析工作。
- 黄荣辉(1976—), 男, 高级工程师, 大学本科, 长期从事输变电设备状态检测与管理工作。

(上接第194页)

- 断路器机构仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2009(3): 47-53.
- TU Kai, ZHOU Yi, ZHANG Li. The simulation analysis of high-voltage circuit breaker based on Pro/E and ADAMS[J]. Machinery Research and Application, 2009(3): 47-53.
- [22] 李鹏, 梁维宏. 高压开关设备国内外产品水平[M]. 第五版. 西安: 西安高压电器集团有限责任公司, 2011.
- LI Peng, LIANG Weihong. Level of high voltage switchgear for internal and external[M]. Fifth Edition. Xi'an: Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., 2011.
- [23] 李建基. 高压开关设备实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- LI Jianji. High voltage switchgear practical technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- 曹永进(1978—), 男, 工程师, 主要从事变电一、二次设备管理工作。
- 彭翔(1980—), 男, 工程师, 主要从事高压断路器产品开发工作。
- 吴鹏(1981—), 男, 工程师, 主要从事35 kV高压断路器产品开发设计工程。
- 杭飞(1985—), 男, 助理工程师, 主要从事35 kV六氟化硫断路器产品的工程开发设计工作。