

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.007

GIS设备异物缺陷X射线检测研究

周艺环¹, 王嘉琛², 王亚楠², 李志闯², 夏健², 丁卫东²

(1. 国网陕西省电力科学研究院, 西安 710199; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: SF₆气体绝缘全封闭组合电器(GIS)内部可能出现金属微粒等异物缺陷导致故障,因此对GIS设备内部的异物缺陷故障进行检测具有重要的意义。X射线成像法是一种检测GIS设备内部缺陷的有效方法,但缺乏成熟的参数选择方法。文中对X射线检测的基本理论进行了介绍,对GIS设备X射线检测参数选择方法进行了讨论,并为220 kV GIS设备内异物缺陷检测选择了合适的参数。在选定参数下,使用双丝像质计对射线成像系统的清晰程度进行了研究,验证了X射线对金属微粒缺陷检测的可行性,之后在GIS设备内部设置异物缺陷并利用X射线检测系统进行缺陷检测。结果表明,选定参数能够对遗落零件缺陷以及1~2 mm的铜金属微粒缺陷进行有效的检测;对1~2 mm的铝金属微粒缺陷,X射线成像法能够实现检测,但对比度较低。

关键词: SF₆气体绝缘全封闭组合电器; X射线检测; 参数选择方法; 内部异物缺陷

X-Ray Detection for Foreign Body Defect in GIS

ZHOU Yihuan¹, WANG Jiachen², WANG Yanan², LI Zhichuang², XIA Jian², DING Weidong²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710199, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Foreign body defect such as metallic particles inside gas insulated switchgear(GIS) can cause insulation fault, so it is of great significance to detect this kind of defect. X-ray detection is an effective method to detect inner defects in GIS, but this method is lacking in mature method of selecting parameters. In this paper, basic theory of X-ray detection is introduced, and method of selecting parameters for X-ray detection is discussed. Then proper parameters for detecting foreign body defect for 220 kV GIS is selected. Under selected parameters, unsharpness of radiographic imaging system is studied by using duplex wire image quality indicator, which verifies the feasibility of X-ray detection for metallic particle defects. Then, foreign body defect in GIS is detected and studied. The results show that defect of missing parts and copper particles defect of a diameter of 1~2 mm can be effectively detected by computed radiography system. Aluminum particles defect of 1~2 mm can be detected, but with low contrast.

Key words: SF₆ gas insulated switchgear; X-ray detection; method of selecting parameters; foreign body defect

0 引言

SF₆气体绝缘全封闭组合电器(gas insulated switchgear, GIS)因占地面积小、可靠性高^[1],广泛应用于电力系统,并应用于特高压工程中^[2]。然而GIS设备仍会发生故障,根据相关研究,异物缺陷是导致GIS设备故障的一个重要原因^[3]。其中,金属微粒

缺陷对设备的绝缘具有劣化作用^[4-5],引发GIS设备故障甚至严重的事故^[6]。因此对GIS设备内部的异物缺陷故障进行检测具有重要的意义。

X射线成像法利用X射线极强的穿透能力和成像可视化^[7]的优势,已经成为检测GIS设备的内部缺陷的有效手段。X射线检测法可以在不拆卸罐体的条件下获得GIS设备内部缺陷的情况,极大地提升

收稿日期:2018-08-15; 修回日期:2018-10-17

基金项目:国家电网公司总部科技项目(SGSNKY00KJJS1501562)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (SGSNKY00KJJS1501562).

了GIS设备内部缺陷的检测效率,具有较为良好的应用价值。

国内对GIS设备X射线检测已经有一定研究。南京供电公司李凯于2009年利用胶片成像系统对220 kV GIS母线连接机构进行了拍摄,用以检测滑动套筒的非正常位移^[8]。青海电科院利用计算机射线成像系统(computed radiography, CR)对多种电压等级下的GIS设备进行了拍摄研究,并设置部件缺失、金属异物等多种缺陷进行拍摄研究,获得较为良好的拍摄效果^[7,9-10]。云南电力研究院在GIS设备内设置异物、装配等缺陷,应用数字成像系统(digital radiography, DR)进行了拍摄研究^[11-12],并提出X射线成像中各参数的选择方法^[13-14]。河北电科院将X射线检测法应用于检修工作,成功对GIS设备内部吸附剂罩材质进行了辨识^[15-16]。然而现阶段缺乏成熟的GIS设备X射线检测参数选择方法,现场检测需要多次试拍,降低工作效率。

文中首先就GIS设备X射线检测的基本理论和参数选择方法进行了研究,并为220 kV GIS设备内异物缺陷检测选择参数。在选定参数下,利用双丝像质计对X射线计算机射线成像系统的不清晰度进行评定。之后针对GIS设备异物缺陷,即遗落零件和两种不同材质的金属微粒分别进行拍摄研究,并解释实验结果。

1 实验平台

文中使用的计算机射线成像系统由通用公司ERESCO 300 MF4-R型便携式X射线机作为射线源,其基本参数为:管电压0~300 kV可调,管电流0~3 mA可调,焦点尺寸为1 mm;使用通用公司CR25P便携式X射线扫描仪对成像板进行扫描,其基本参数为:灰度级分辨率为16位,即65 536灰度,最高扫描分辨率为17 μm ;使用缙云URT5080双丝像质计检测X射线成像系统的不清晰度,其规格满足GB/T 23901.5—2009^[17]的相关要求。

X射线检测GIS设备的示意图见图1。

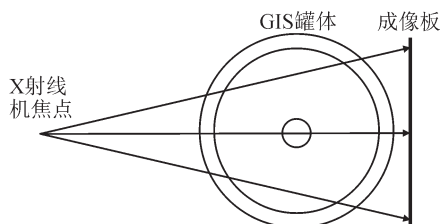


图1 X射线检测GIS设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of X-ray detection for GIS equipment

2 理论分析

2.1 X射线检测理论概述

X射线成像原理基于X射线的衰减规律。当单色窄束X射线入射到物体时,能量会被吸收而使强度产生衰减^[18],其衰减规律为

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

式(1)中: I_0 为入射射线强度; I 为透射射线强度; μ 为线衰减系数, cm^{-1} ; x 为吸收体厚度,cm。其中,线衰减系数与吸收体密度相关,往往使用质量衰减系数来描述单位质量吸收体对射线的衰减,即

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (2)$$

式(2)中: μ_m 为质量衰减系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; ρ 为吸收体密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

X射线成像原理见图2,在不考虑次级射线和散射射线情况下,对于存在缺陷的被检测设备,穿过设备后X射线强度关系为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I \cdot e^{-\mu' \cdot T}}{I \cdot e^{-\mu \cdot (T - \Delta T)} \cdot e^{-\mu' \cdot \Delta T}} = e^{-(\mu - \mu') \Delta T} \quad (3)$$

式(3)中: I 为一次射线强度; I_1 为不经过缺陷的透照射线强度; I_2 为经过缺陷的透照射线强度; T 为所透照物质的厚度; ΔT 为缺陷的厚度; μ 为透照物质的线衰减系数; μ' 为缺陷的线衰减系数。

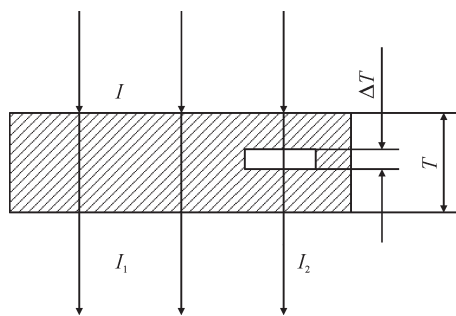


图2 X射线成像原理

Fig. 2 X-ray imaging principle

从图2可以看出,由于被检测设备厚度或线衰减系数存在差异,透照物质和缺陷对X射线的衰减能力不同,导致成像板上接收的X射线能量存在差异。而成像板的成像灰度与射线能量相关,因此形成具有灰度差异的图谱。

GIS设备X射线检测的成像不清晰度主要来自两个方面,几何不清晰度和固有不清晰度。

几何不清晰度的产生原理见图3,其计算式为

$$U_g = \frac{F-f}{f} \cdot d = (M-1) \cdot d \quad (4)$$

式(4)中: F 为射线机焦点到成像板的距离,即焦距(focal film distance, FFD); f 为射线机焦点到被检

测设备距离; d 为焦点尺寸; M 为成像放大率。

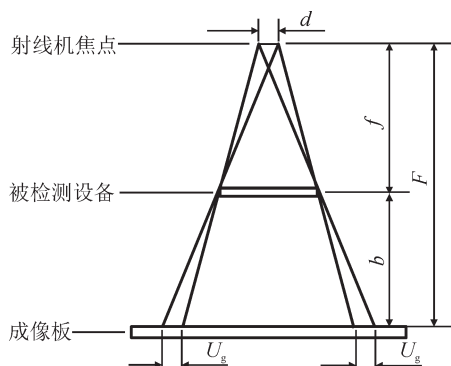


图3 几何不清晰度的产生原理

Fig. 3 Formation of geometric unsharpness

固有不清晰度是由于X射线入射到成像板时产生次级射线或散射射线造成的,与X射线能量和所用成像板相关。

射线成像总不清晰度为

$$U_t = (U_g^2 + U_i^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式(5)中: U_t 为总不清晰度; U_g 为几何不清晰度; U_i 为固有不清晰度。

2.2 关键参数确定方法

影响X射线成像质量的关键参数包括焦距、管电压、管电流和曝光时间。实验主要对220 kV GIS设备进行实验,其外壁直径350 mm,壁厚10 mm,材质为铝合金,无中心导体。下面就各项参数的选取方法进行分别阐述。

2.2.1 焦距确定方法

焦距主要影响成像的几何不清晰度。根据标准JB/T 4730.2—2005^[19],采用B级(高灵敏度级别)对焦距最小值进行确定,其计算式为

$$f \geq 15 \cdot d \cdot b^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

式(6)中: f 为射线机焦点到被检测设备距离; d 为焦点尺寸; b 为被检测设备到成像板距离。在满足灵敏度要求的条件下,可根据情况适当改变焦距,调整成像放大率以获得合适图像。

对于计算机射线成像,成像板可紧贴GIS设备壳体,因此计算出实验所需焦距至少为644 mm。文中为获得GIS设备的整体拍摄效果,选择焦距为1 500 mm,即成像放大率为1.13,可保证成像板能接收完整的拍摄结果。

2.2.2 管电压选取方法

管电压影响X射线的穿透能力并对成像对比度有影响。一般地,管电压的选取应满足成像效果下的最低值。标准JB/T 4730.2—2005中规定了最大许用管电压值,相关研究对其进行了公式拟合和优

化^[20],可以用于管电压选取,见图4。

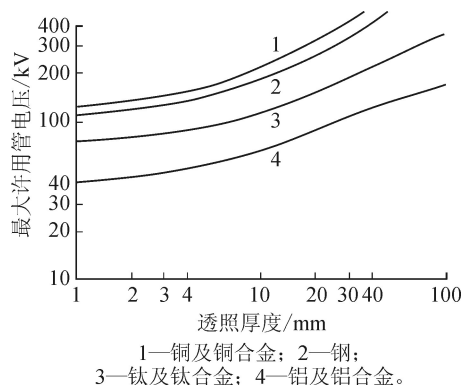


图4 JB/T 4730.2—2005中规定的最大许用管电压

Fig. 4 Maximum allowable tube voltage provided in JB/T 4730.2—2005

管电压的选择需保证X射线能够有效穿透GIS设备,并使得成像结果具有一定的对比度,但GIS设备内部结构往往比较复杂,X射线的穿透深度差距较大,需要对GIS的壁厚进行等效作为管电压选择依据。如需要对GIS设备整体进行拍摄,可以选用平均壁厚作为等效壁厚进行管电压选取;对位于GIS罐体底部的金属微粒和异物缺陷,则需提升选用的管电压,防止由于曝光不足导致缺陷难以辨识。将X射线在各个角度上对无中心导体和有中心导体(中心导体外壁直径100 mm,壁厚12 mm)GIS设备在各个角度上的厚度值、等效壁厚和底部厚度分别求出,结果见图5。

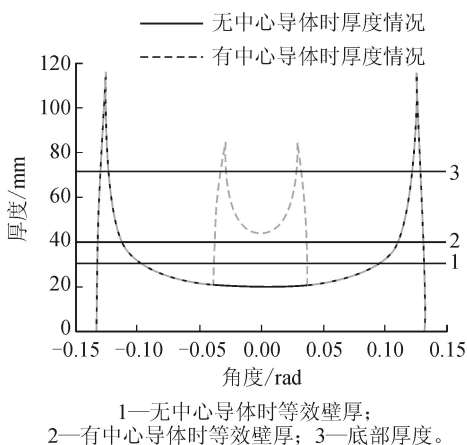


图5 无中心导体和有中心导体220 kV GIS设备在各个角度上的厚度值

Fig. 5 Thickness of a 220 kV GIS at each angle without and with center conductor

为检测底部异物缺陷,选用底部附近厚度作为管电压选择依据,可以得到底部附近厚度为71.4 mm,因此选择150 kV作为检测异物缺陷的管电压。

2.2.3 曝光量选取方法

对于X射线检测,曝光量为管电流和曝光时间的乘积,且根据互易律^[18],在曝光量为定值时,X射

线成像结果一致。

经过多次试拍,选定合适的曝光量为 $2 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 。由于X射线机在最高管电压下能够达到 3 mA 管电流,取管电流为 3 mA 有利于不同参数下拍摄图像之间的对比,即选择管电流为 3 mA 。在确定管电流后,可以选取曝光时间为 40 s 。

2.2.4 最佳成像放大率选取方法

在最佳成像放大率下进行X射线成像可以获得理论最小的几何不清晰度,其计算方法为

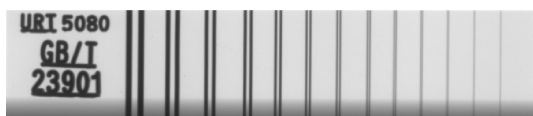
$$M_{\text{opt}} = 1 + \left(\frac{U_i}{d}\right)^2 \quad (7)$$

式(7)适用于 $d \geq 0.1 \text{ mm}$ 的情况。

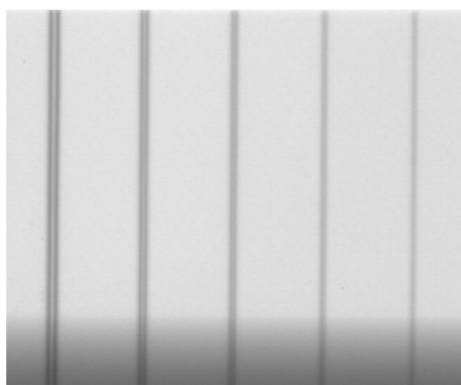
3 实验结果

3.1 X射线机不清晰度获取

将双丝像质计设置于X射线机出口正前方,利用所选参数进行拍摄,拍摄结果见图6。



(a) 整体结果



(b) 后五组线对结果

图6 管电压 150 kV , 管电流 3 mA , 焦距 1.5 m , 曝光时间 40 s 下双丝像质计成像结果

Fig. 6 Image of duplex wire image quality indicator at a tube voltage of 150 kV , a tube current at 3 mA , a focal film distance of 1.5 m and an exposure time of 40 s

根据 GB/T 23901.5—2009 中的相关规定,可辨别的极限值为使影像正好是两双线间距可以识别极限下的两独立线过渡到单线的影像^[17]。图6(b)中可以识别的最大线对为 11D ,因此X射线成像的总不清晰度为 0.16 mm 。计算可知,此时的几何不清晰度为 0.13 mm ,因此根据式(3),在这组参数下的固有模糊度为

$$U_i = \sqrt{U_i^2 - U_g^2} = 0.09 \text{ mm} \quad (8)$$

由此结果可知,利用X射线检测系统能够对微

小异物缺陷实现检测。

3.2 异物缺陷X射线检测

3.2.1 遗落零件缺陷检测

在GIS设备底部附近放置螺母、垫片等异物以模拟遗落零件缺陷,见图7。

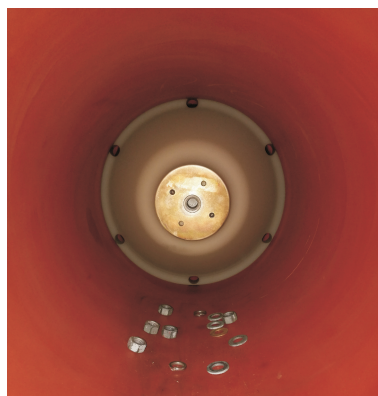


图7 遗落零件缺陷设置

Fig. 7 Set-up of defect of missing parts

利用前文确定的X射线检测参数,对GIS设备内部遗落零件缺陷进行检测,结果见图8。



图8 管电压 150 kV , 管电流 3 mA , 焦距 1.5 m , 曝光时间 40 s 下遗落零件缺陷结果

Fig. 8 Image of missing parts at a tube voltage of 150 kV , a tube current at 3 mA , a focal film distance of 1.5 m and an exposure time of 40 s

从图8可以明显看出,螺母和垫片在GIS设备中的分布情况,说明X射线检测法对于遗落零件缺陷具有非常良好的检测效果。

3.2.2 铜金属微粒缺陷检测

在GIS设备底部附近设置粒径为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的铜金属微粒,并用前文确定的X射线检测参数,对GIS设备内部铜金属微粒缺陷进行检测,进行调窗处理后的检测结果见图9。

从图9可知,铜金属颗粒和GIS罐体的灰度具有较为明显的区别,且主要分布在GIS罐体底部。通过软件可以获得图谱中金属颗粒的尺寸,并根据成像放大率即可获得缺陷的真实尺寸,计算可得颗粒1至3粒径分别为: 1.61 、 1.57 、 1.53 mm ,与实际测

量结果接近。

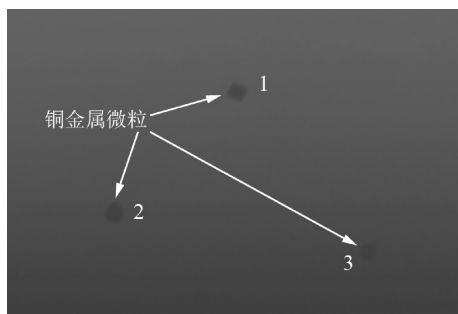


图9 管电压150 kV,管电流3 mA,焦距1.5 m,曝光时间40 s下铜金属微粒(粒径1~2 mm)缺陷结果(局部图像)

Fig. 9 Image of copper particles (diameter is 1~2 mm) at a tube voltage of 150 kV, a tube current at 3 mA, a focal film distance of 1.5 m and an exposure time of 40 s(part image)

在使用调窗调整并对图像着色后的局部检测结果见图10。

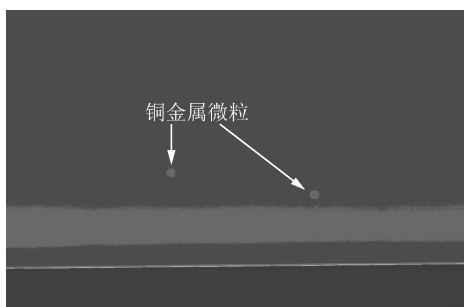


图10 调窗并着色处理后的结果

Fig. 10 Image after adjusting window and coloring

3.2.3 铝金属微粒缺陷检测

在GIS设备底部附近设置粒径为1~2 mm的铝金属微粒,并用前文确定的X射线检测参数,对GIS设备内部铜金属微粒缺陷进行检测,检测结果中的铝微粒成像对比度很差,难以分辨。因此对成像结果进行调窗和着色处理,结果见图11。

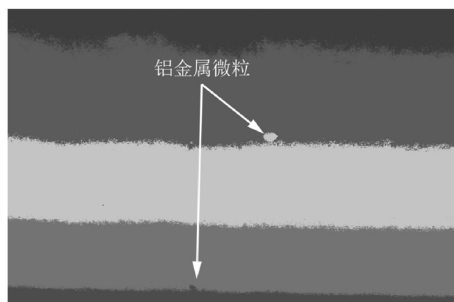


图11 调窗并着色处理后的结果

Fig. 11 Image after adjusting window and coloring

出现铝微粒几乎难以分辨的原因与金属微粒对X射线的衰减能力不同有关。根据美国国家标准技术研究所(national institute of standards and technology, NIST)的相关研究^[21],铜与铝的质量衰减系数与X射

线能量的关系见图12。

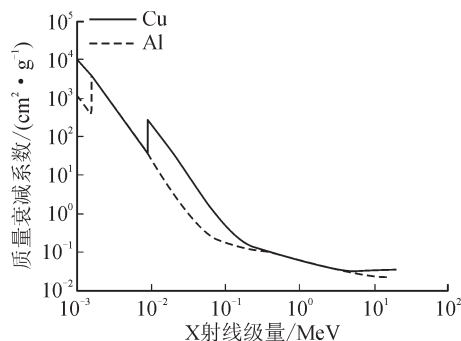


图12 铜和铝的质量衰减系数比较

Fig. 12 Comparison of mass attenuation coefficient of copper and mass attenuation coefficient of aluminum

在管电压为150 kV下,利用杜安—亨特公式对X射线最短波长进行计算^[22],见式(9)

$$\lambda_{\min} = 1.234/U = 0.00823 \text{ nm} \quad (9)$$

因此可知,X射线光子的最大能量为

$$E_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \approx 0.151 \text{ MeV} \quad (10)$$

根据图12可此X射线能量下,铜的质量衰减系数为0.2217 cm²/g,铝的质量衰减系数为0.1378 cm²/g。因此铜和铝的线衰减系数分别为

$$\mu_{\text{Cu}} = 0.2217 \times 8.96 = 1.986 \text{ cm}^{-1} \quad (11)$$

$$\mu_{\text{Al}} = 0.1378 \times 2.699 = 0.372 \text{ cm}^{-1} \quad (12)$$

由于微粒均设置在GIS罐体靠近底部的位置,取穿透厚度为30 mm,并不考虑空气对X射线的衰减,对于无微粒缺陷的情况,X射线强度衰减为

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.372 \times 3} = 32.76\% \quad (13)$$

对于1 mm的铜金属颗粒,X射线强度衰减为

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.372 \times 3} \cdot e^{-1.986 \times 0.1} = 26.86\% \quad (14)$$

对于1 mm的铝金属颗粒,X射线强度衰减为

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.372 \times 3.1} = 31.56\% \quad (15)$$

从计算结果可以看出,由于穿过铜金属微粒的X射线强度和其他区域的X射线强度差异较大,因此灰度差异明显,而对于铝金属微粒,强度差异很小,铝金属微粒如同被“淹没”在了GIS罐体的灰度中,因此X射线对铝金属微粒的对比度较铜微粒差。

4 结论

文中对GIS设备X射线检测基本理论和参数选择方法进行了研究,并对220 kV GIS设备内部异物缺陷进行了检测研究,结果表明:

1)对于X射线检测的参数选取,应当根据所需的检测灵敏度,确定焦距;其次根据GIS设备具体壁

厚情况确定管电压,最后通过试拍确定合适的曝光量以确定管电流和曝光时间;

2)利用双丝像质计可以对给定参数的X射线检测系统的不确定度进行确定。结果表明,X射线检测法可以实现对微小异物缺陷的检测;

3)X射线检测法能够有效检测1~2 mm的铜金属微粒缺陷,但对于1~2 mm的铝金属微粒,检测对比度较差。原因在于铝的线衰减系数远小于铜的线衰减系数,穿过铜金属微粒的X射线强度与其他区域的X射线强度差异很大,而铝金属微粒的差异则很小,因此铝金属微粒如同被“淹没”在了GIS罐体的灰度中,但是仍可通过调窗和着色手段实现检测。

参考文献:

- [1] 严璋,朱德恒.高电压绝缘技术[M].第2版.北京:中国电力出版社,2007.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [2] 刘振亚.中国特高压交流输电技术创新[J].电网技术, 2013, 37(3): 566-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 566-574.
- [3] ISTAD M, RUNDE M. Thirty-six years of service experience with a national population of gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2448-2454.
- [4] 胡泉伟,张亮,吴磊,等. GIS中自由金属颗粒缺陷局部放电特性的研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(1): 1-3.
HU Quanwei, ZHANG Liang, WU Lei, et al. Probe into the partial discharge characteristics of free metal particles in GIS[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(1): 1-3.
- [5] 李庆民,王健,李伯涛,等. GIS/GIL中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.
- [6] 李超,陶蓉.一起126 kV GIS设备故障后的检测实例分析[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 145-149.
LI Chao, TAO Rong. Fault detection example of 126 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 145-149.
- [7] 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.
- [8] 李凯. GIS母线连接结构非正常位移的X射线检测方法[C]//全国电力系统配电技术协作网第二届年会论文集. 福州:中国电力企业联合会, 2009: 364-379.
- LI Kai. X-ray detection method for abnormal displacement of GIS busbar connection structure[C]//National Power System Distribution Technology Collaborative Network Second Annual Meeting. Fuzhou, China: China Electricity Council, 2009: 364-379.
- [9] 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.
- [10] 王志惠,杨小库,邓大勇,等. 750 kV断路器合闸电阻X射线成像检测分析[J]. 青海电力, 2012, 31(4): 9-11.
WANG Zhihui, YANG Xiaoku, DENG Dayong, et al. Analysis X-ray imaging detection of closing resistors for 750 kV circuit breaker[J]. Qinghai Electric Power, 2012, 31(4): 9-11.
- [11] 王达达,魏杰,于虹,等. 基于X射线数字成像的GIS设备缺陷可视化无损检测方法[J]. 南方电网技术, 2011, 5(s2): 42-46.
WANG Dada, WEI Jie, YU Hong, et al. The visible nondestructive detection method for GIS equipments based on X-ray digital imaging technology[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(s2): 42-46.
- [12] YU H, WEI J, ZHAO X, et al. The perspective detection of the X-ray digital radiography for the electrical equipment[C]//International Conference on High Voltage Engineering & Application. Shanghai, China: IEEE, 2012: 591-599.
- [13] 郭涛涛,王达达,于虹,等. 曝光量在GIS设备X射线可视化无损检测中的选择应用[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(5): 573-577.
GUO Taotao, WANG Dada, YU Hong, et al. The application on X-ray focal length parameter selection in the visualization nondestructive testing[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(5): 573-577.
- [14] 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.
- [15] 庞先海,景皓,沈洋,等. X射线数字成像技术在GIS设备吸附剂罩材质识别中的应用[J]. 河北电力技术, 2014, 33(6): 4-5.
PANG Xianhai, JING Hao, SHEN Yang, et al. Application of X-ray digital imaging technology in GIS equipment adsorbent cover material identification[J]. Hebei Electric Power, 2014, 33(6): 4-5.
- [16] 庞先海,景皓,张玲玲. GIS设备X射线现场检测应用及防护[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 92-96.
PANG Xianhai, JING Hao, ZHANG Lingling. X-ray field de-

(下转第53页)

- UHFPartial discharge detection system in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3348-3354.
- [14] 幸琳, 姚陈果, 孙才新. GIS局部放电定位的频域时差读取方法[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 13-18.
XING Lin, YAO Chenguo, SUN Caixin. Method of time difference reading based on frequency domain for PD location in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 13-18.
- [15] 周云锋, 杨景刚, 张子阳. 组合电器盆式绝缘子内部气隙缺陷的带电检测与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 112-116.
ZHOU Yunfeng, YANG Jinggang, ZHANG Ziyang. On-line detection and analysis of gas cavity in insulator of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 112-116.
- [16] 邵涛, 周文俊, 朱宜飞, 等. 特高频法检测GIS局部放电的试验研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 15-16.
SHAO Tao, ZHOU Wenjun, ZHU Yifei, et al. Experimental research of UHF method for the detection of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 15-16.
- [17] 丁登伟, 唐诚, 高文胜, 等. GIS中典型局局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3243-3251.
DING Dengwei, TANG Cheng, GAO Wensheng, et al. Frequency attributes and propagation of typical partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3243-3251.
- [18] 刘双宝, 吕超, 于继来, 等. 希尔伯特-黄变换在变压器局部放电脉冲识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 114-119.
LIU Shuangbao, LYU Chao, YU Jilai, et al. Application of Hilbert-Huang transform in pattern recognition for partial discharge of transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 114-119.
- [19] 张宇辉, 刘梦婕, 黄南天, 等. 频率切片小波变换在局部放电信号分析中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2283-2293.
ZHANG Yuhui, LIU Mengjie, HUANG Nantian, et al. Application of frequency slice wavelet transform in partial discharge signal analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2283-2293.

廖新征(1978—), 女, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态监测及故障诊断。

(上接第46页)

- tection applications and protection measures for GIS equipment[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 92-96.
- [17] 无损检测 射线照相底片像质 第5部分: 双丝型像质计图像不确定度的确定: GB/T 23901.5—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Non-destructive testing-image quality of radiographs- Part 5: Image quality indicators(duplex wire type)- Determination of image unsharpness value: GB/T 23901.5—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [18] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LI Jiawei, CHEN Jimao. Non-destructive testing manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [19] 承压设备无损检测 第2部分: 射线检测: JB/T 4730.2—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Nondestructive testing of pressure equipments- Part 2: Radiographic testing: JB/T 4730.2—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [20] 李亚洲. 射线检测中最高管电压优化公式的探讨[J]. 无损探伤, 2010, 34(6): 41-42.
LI Yazhou. Discussion on optimization formula of highest tube voltage in radiation detection[J]. Nondestructive Inspection, 2010, 34(6): 41-42.
- [21] HUBBELL J H, SELTZER S M. Tables of X-Ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest[EB/OL]. [2018-11-02]. <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>.
- [22] 闫斌, 王志惠, 何喜梅. 电气设备X射线数字成像检测与诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
YAN Bin, WANG Zhihui, HE Ximei. Detection and diagnosis of X-ray digital imaging for electrical equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- 周艺环(1984—), 女, 工程师, 主要研究方向为智能电网研究管理。
- 王嘉琛(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事电力设备X射线诊断、六氟化硫分解产物等方面相关研究。
- 丁卫东(1976—), 男, 工学博士, 博士生导师, 主要从事脉冲功率技术、气体绝缘与气体放电、高电压测量技术等方面相关研究。