

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.019

复合绝缘子陡波击穿原因可视化分析

闫文斌¹, 王达达², 李卫国³, 于虹², 屠幼萍³, 郭涛涛⁴

(1. 清远蓄能发电有限公司, 广东 清远 511853; 2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 昆明 650217; 3. 华北电力大学, 北京 102206; 4. 内蒙古呼和浩特供电局, 呼和浩特 010050)

摘要: 南方电网某线路在雷击跳闸后,对线路雷击区域用 ± 500 kV直流复合绝缘子按照标准DL/T 810—2002进行例行试验中,有两串复合绝缘子高压端金具护套在陡波试验中发生击穿,但击穿区域现场目测未发现明显致因。为了确定陡波击穿的原因,笔者运用X射线DR检测技术,周详设计实验方案,对被陡波击穿的复合绝缘子金具区段进行多参数、多角度的拍摄,确定了最优拍摄参数,并运用相似原理在所拍摄的X射线结果图中测量了该区段护套厚度,最终确认了陡波击穿原因为复合绝缘护套与金具胶接处有明显间隙和金具尾部复合绝缘覆盖层厚度不均导致,同时发现了金具端部与第1伞裙之间护套内部靠近金具端部约3 mm处环绕芯棒内部三角气道的缺陷。笔者所确定的最优拍摄参数及检测流程可为X射线对复合绝缘子进行内部结构可视化检测提供依据,而X射线DR检测技术为复合绝缘子不解体、高效率检测提供了方法上的创新。

关键词: 复合绝缘子; X射线; 陡波

Visualization Analysis of Steep-wave Breakdown of Composite Insulator

YAN Wenbin¹, WANG Dada², LI Weiguo³, YU Hong², TU Youping³, GUO Taotao⁴

(1. Qingyuan Energy Storage Power Generation Co., Ltd., Guangdong Qingyuan 511853, China; 2. Yunnan Electric Power Test & Research Group Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. Hohhot Power Supply Bureau, Hohhot 010050, China)

Abstract: A trip accident happened due to lightning strike in the Southern Grid. Then the line in struck area was tested with ± 500 kV DC composite insulator strings according to the standard DL/T 810—2002. In the steep-wave test, the end-fitting sheaths at high-voltage ends of two composite insulator strings were broken down. To understand the cause of the breakdown, this study adopts the X-ray DR detection technology to detect the broken-down sheaths area with multiple parameters and angles to determine the optimal shooting parameters. The sheath thickness is measured on the X-ray images with the similarity principle. As a result, the breakdown is confirmed to be due to the obvious gap between the sheath and the end-fitting and due to the nonuniform thickness of the insulation layer on the end-fitting tail. Moreover, an internal triangle airway defect is found in the sheath between the end-fitting and the first umbrella skirt. All the optimal parameters and testing procedure in this study may provide a basis for X-ray detection of internal structure of composite insulators, and the X-ray DR testing technology can be taken as an innovative method for highly efficient detection of composite insulators without disassembly.

Key words: composite insulator; X-ray; steep-wave

0 引言

复合绝缘子(composite insulator)又被称作合成绝缘子,一般至少由两种聚合物绝缘材料构成,其通常由伞套(housing and shed)、玻璃钢芯棒(FRP

core)和端部金具(end-fitting)3部分构成。而在复合绝缘子家族中,使用量最多、增长最快的是棒形悬式复合绝缘子^[1]。

目前复合绝缘子制造工艺逐渐成熟,复合绝缘子芯棒与护套界面已逐渐采用连续挤压、整体注塑,端部金具与芯棒连接工艺逐渐采用压接式^[1]。

但在生产过程中还是会存在一些薄弱环节,如硅橡胶伞裙、护套一次浇注成形中可能出现夹杂、气泡、厚度不均等缺陷,这些都为复合绝缘子日后正常工作埋下了隐患,虽然现在可以通过超声波检测来发现以上的问题,但是超声波方法要求检测位置为光滑的表面,同时由于耦合、衰减以及超声换能器性能问题,该方法现主要作为部分生产厂家的出厂检测和实验室研究,而对现场使用过的外表面由于环境原因已极不光滑的复合绝缘子检测乏力^[2],而复合绝缘子运行性能得不到定性或者定量检测,也为复合绝缘子建立定期检修制度和推广应用埋下了疑惑^[3-7]。

针对上述问题,笔者采用 X 射线数字平板成像技术(DR)对某两串挂网运行 3 年的复合绝缘子高压端金具护套进行陡波击穿原因分析,并在检测和分析的过程中,发现了金具护套覆盖层厚度不足、金具护套与金具之间存在间隙和护套内部存在气道等内部缺陷,也充分肯定了 X 射线 DR 检测技术对上述问题的解决能力。

1 X 射线数字平板成像系统简介

传统 X 射线检测采用胶片来感应记录透射 X 射线强度的变化,而新型技术——X 射线数字平板成像技术(DR)则使用闪烁晶体与光电倍增器构成的平板型探测器拾取信号,直接在电脑上呈现 X 射线数字图像,现场工作效率得到了极大的提高,且检测结果便于保存和传输^[8-10]。

DR 是一种 X 射线直接转换技术,它使用不可弯曲的硬质平板探测器接收 X 光,再由平板探测器上覆盖的晶体电路把 X 线光子直接转换成数字化电流后,直接将图像信息呈现在计算机上。与 CR 和线阵列扫描成像技术(LDA)相比,DR 技术所用设备体积小;在两次照射期间,不需更换图像板,故只需 30 s 左右就可以观察到信噪比、分辨率均高于 CR 技术的 X 射线成像图;平板探测器可做成大面积平板以一次曝光形成更大区域的图像,不需移动被检工件,检测速度和效率远远高于 CR 和 LDA 技术^[11-12]。

文中采用由云南电力试验研究院自主开发研制的基于 X 射线的电力设备数字成像透视检测系统对复合绝缘子进行透视检测,该系统由便携式 X 射线机(0.3 MeV,焦点尺寸为 1.0 mm(IEC336))、数字平板探测器(非晶硅,成像面积为 410 mm×410 mm,图像分辨率 2.5 Lp/mm)、移动工作站、远程控制箱、附件等组成,见图 1^[11]。

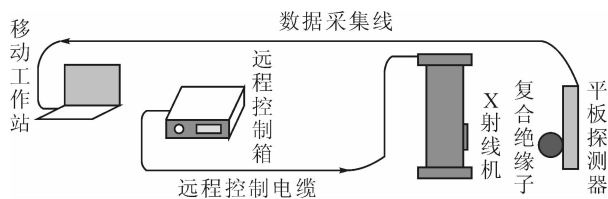


图 1 基于 X 射线的电力设备数字成像透视检测系统示意图

Fig. 1 Based on X-ray of the electric power equipment digital imaging perspective drawing detection system

现场工作时,远程控制箱通过远程控制电缆控制 X 射线机,平板探测器通过数据收集线接收移动工作站的控制指令,并将图像数据回传,专业人员随即在移动工作站上对图像进行处理、显示后即可得出检测结果。远程控制箱发出指令到移动工作站显示最终清晰的 X 射线数字图像仅需 30 s,极大地提高了 X 射线在现场检测的效率^[13]。

2 检测方法

2.1 参数选择

在 X 射线透照工艺中参数的选择是至关重要的,这里所说的参数主要指发射 X 射线所用的电压 U 、电流 I 、焦距 F 和曝光时间 t ,这些参数直接影响到所成 X 射线结果图中影像的对比度和清晰度,进而可能影响到专业人员的诊断结果^[14-16]。

文中选取 $U=40\sim 100\text{ kV}$, $I=3\sim 5\text{ mA}$, $t=4\sim 8\text{ s}$, $F=400\sim 1\,000\text{ mm}$ 为范围对同一复合绝缘子的不同区段进行不同参数组合透照试验,配合像质计灵敏度评定和图像细节评定确定该系统对直流用复合绝缘子透照检测参数为: $U=70\text{ kV}$, $I=5\text{ mA}$, $t=8\text{ s}$, $F=850\text{ mm}$ 。

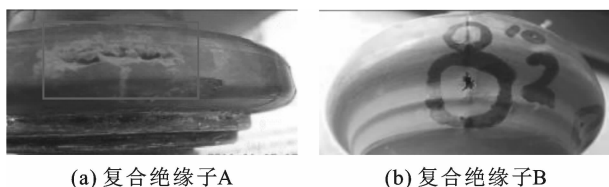
在下文中对复合绝缘子进行 X 射线透照检测均采用该参数。

2.2 检测过程

南网两串已挂网运行 5 年的 $\pm 500\text{ kV}$ 直流复合绝缘子在雷击跳闸后的例行检测中,其高压端金具护套在按照 DL/T 810—2002^[15]进行陡波试验中被击穿,分别编号为 A 和 B。复合绝缘子高压端金具护套陡波击穿图见图 2。

射线机发射出来的 X 射线发射呈锥台状,故检测角度极大地影响依据 X 射线结果图诊断缺陷性质、位置、大小等的正确性,笔者结合机械领域射线探伤经验的基础上,综合考虑、反复试验总结了 X 射线对复合绝缘子的检测流程,并对 A 和 B 复合绝缘子陡波击穿区域进行了多角度的 X 射线检测,得到了陡波击穿的原因。

以 A 复合绝缘子陡波击穿区域 X 射线检测为



(a) 复合绝缘子A

(b) 复合绝缘子B

图2 复合绝缘子高压端金具护套陡波击穿图

Fig. 2 Composite insulator hardware sheaths' steep-wave breakdown results

例,检测流程如下:

1)结合陡波试验结果将复合绝缘子击穿区域裁制作为被检对象,清除其表面污秽。这一步注意在裁制时应留有余量,A被检对象长度为25 cm,包括了高压端金属附件至高压端第1伞裙之间区段。

2)对被检对象击穿区域标定、测量、记录,作为重点检测部位。A被检对象所标定的击穿孔长约15 mm,深约3.5 mm,且已接触被包覆金具表面。

3)依据DL/T 810—2002将被检对象护套表面较大、较明显的蚀损、裂纹及接缝等不对复合绝缘子内外绝缘构成威胁或损坏的区域标定、测量、记录,以避免干扰X射线结果诊断。A被检对象共标出9处此类区域。

4)结合2)和3)标定区域,在被检对象端部安装金属基准丝,作为射线检测定位所用,并对基准丝长度测量记录。这一步中应当注意:①基准丝要与重点检测部位保证轴向对齐关系;②至少2根基准丝之间要有确定的角度关系以为照射位置的标定;③基准丝务必垂直于芯棒轴线且不易弯曲。

A被检对象共安装3根基准丝,见图3,1号基准丝轴向对齐于1)标定的击穿孔,其实际长度为31.5 mm;2号基准丝与1号基准丝夹角约60°,其实际长度为23.0 mm;3号基准丝垂直于1号基准丝,其实际长度为27.0 mm。

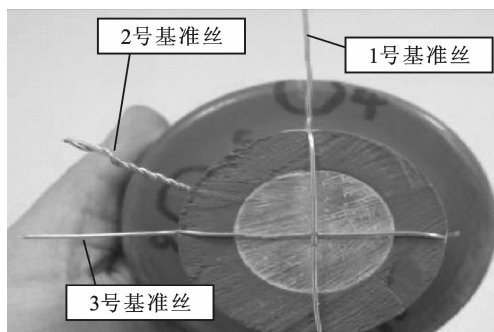


图3 金属基准丝

Fig. 3 The benchmark silks

5)依据推荐参数中的焦距,如图1所示布置检测系统和被检对象,取照记录。此步中应当注意:①被检对象应平行、紧贴数字平板探测器;②保证

被检对象某一根基准丝垂直于地面;③利用系统自带红外瞄准仪进行基准丝根部定位;④将金属双丝像质计垂直于地、紧贴在成像板上,并保证其尽量靠近垂直于地的基准丝。A被检对象现场布置情况见图4。

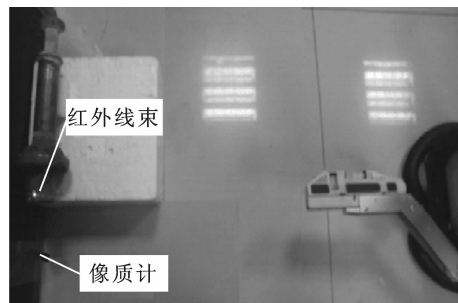


图4 现场布置图

Fig. 4 The site layout situation

6)利用推荐参数进行X射线照射,观察所得X射线结果图中标定基准丝是否明显不垂直于地、被检对象是否明显与地不平行,以决定是否进行位置调整。

7)记录该基准丝至数字平板探测器表面的最近距离,并依据下面所列公式计算出该基准丝的理论影像长度。该步所对应的相似原理尺寸测量示意图见图5。

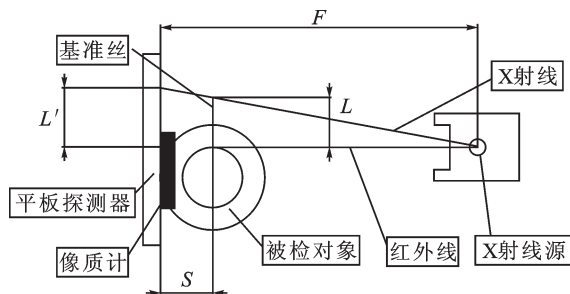


图5 示意图

Fig. 5 The size measurement diagram

图5中,

$$L' = \frac{FL}{F-S} \quad (1)$$

式(1)中: L 为基准丝的实际长度,mm; L' 为基准丝的影像长度,mm; S 为基准丝至平板探测器的最短距离,mm; F 为焦距,mm。

8)在X射线成像结果图上标定像质计宽度的影像长度为实际长度13 mm,以此标定所照基准丝的影像长度,若影像长度与理论长度之差小于实际长度的10%,则判定该基准丝完全垂直于地,该张X射线结果图可用于观察。焦点不易对准复合绝缘子轴线,且在计算时要考虑复合绝缘子的尺寸,所以选择将焦点对准基准丝根部。这一步注意:像质计紧贴数字平板探测器,极靠近垂直于地的基准丝,

且厚度与焦距相比可予以忽略,由于呈锥状散射的X射线对像质计宽度的放大效应可以忽略,故认为像质计影像长度即实际宽度,以作为X射线结果图上尺寸测量基准。

A被检对象1号基准丝所标定的X射线结果图见图6,同时该宽度测量处应尽量与基准丝根部共线,如图6中虚线所示。

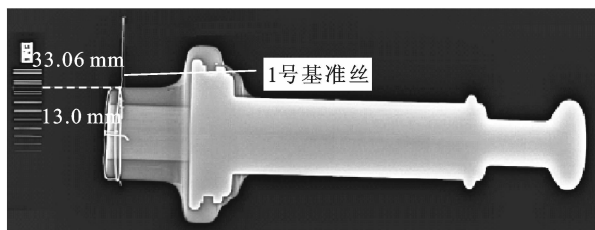


图6 A被检对象X射线结果图尺寸标定示意

Fig. 6 The X-ray result figure of A used to measure the benchmark silk's actual image length

9)以每根基准丝为参考物重复6)~10)进行多角度拍摄,在所得合适的X射线成像结果图上标示需分析的区域。

10)借助图像处理对需分析的区域深入观察,并注意与3)记录结果比对以提高缺陷判断准确性,必要时配合以实物解剖,取得诊断结果。

笔者确定A被检对象最佳射线检测位置应为1号基准丝垂直于地,该位置所得X射线结果图局部放大图见图7,图7中右框所示区域即为陡波击穿区域,该处复合绝缘护套与金具胶接处有明显间隙,该间隙最宽处经测量约为1.33 mm;上框区域在金具端部与第1伞裙之间护套内部靠近金具端部约3 mm处,经与3)标定区域比对,判定为非表面接缝等缺损区域,疑为绝缘护套内部非正常通道。

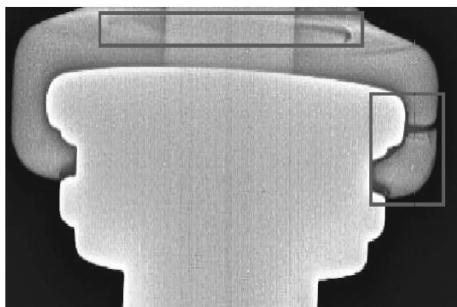


图7 A被检对象陡波击穿区域X射线成像结果图

Fig. 7 The X-ray result figure of A steep-wave breakdown area

为验证复合绝缘护套与金具胶接处有明显间隙及确定图7上框区域缺陷类型,笔者将A被检对象解剖,见图8。图8(a)、(b)中,陡波击穿区域可轻易掀起,且护套与金具台阶面胶接界面无橡胶粘结痕迹和残留,而有黑灰色电蚀痕迹,据此判定,该区域

陡波击穿是该处护套与金具之间存在间隙;图8(c)、(d)对应图7上框区域,为金具端部与第1伞裙之间护套内部靠近金具端部约3 mm处环绕芯棒约3/4周的一条内部三角气道,因该处护套厚达3.5 cm而未在陡波试验中发生击穿。

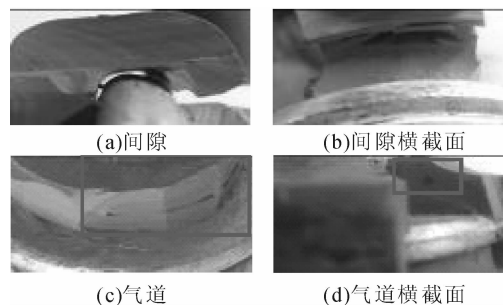


图8 A被检对象解剖图

Fig. 8 The anatomy figure of A

而针对B被检对象,其所标定的两个陡波击穿孔直径分别为4 mm和3.5 mm,见图9中标示2、3所示。采用同样的检测流程所得结果如下。



图9 B被检对象的2个陡波击穿孔

Fig. 9 The two demarcated steep breakdown holes of B

B被检对象标示为2的陡波击穿孔区域X射线成像结果图的局部放大图见图10,图10中明显反映出(图10中左框区域)护套厚度明显比正常区域(图中右框区域)护套厚度薄,在图10中两个区域选取5个相互对应的位置(如图中虚线所示)进行尺寸测量,由下至上依次测量数值见表1。

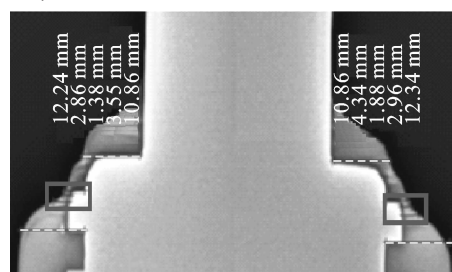


图10 B被检对象X射线成像结果图

Fig. 10 The X-ray result figure of B wave breakdown area

表1 B被检对象X射线成像结果图尺寸测量数值

Table 1 The actual image thicknesses of B's X-ray

		figure		mm	
项目		数值			
正常区域	12.34	2.96	1.88	4.34	10.86
击穿区域	12.24	2.86	1.38	3.55	10.86
差值	0.10	0.10	0.50	0.79	0.00

表1中第3、4组数值相差较大。将该区域解剖后,实际测量值为:陡波区域实际长度为1.31 mm

和 3.30 mm,正常区域则为 1.75 mm 和 4.00 mm。

据此得出结论:标示为 2 的陡波击穿区域护套厚度不足,是导致该区域被击穿的主要原因。标示为 3 的陡波击穿区域所得结果也验证了此结论。

3 结论

笔者提出利用 X 射线数字成像技术在复合绝缘子进行可视化无损检测,验证了 X 射线数字成像技术对复合绝缘子进行无损检测是可行且有效的。所得结论如下:

1)A 被检对象发现的复合绝缘护套与金具胶接处有明显间隙和金具端部与第 1 伞裙之间护套内部靠近金具端部约 3 mm 处环绕芯棒内部三角气道为制作工艺问题。

2)陡波试验目的主要在于检验伞裙与芯棒界面、金具端部护套界面内绝缘水平,而对于金具尾部复合绝缘覆盖层厚度不作为考察重点^[17-21],且该处设计厚度呈阶梯状递减,故 B 被检对象由于金具尾部复合绝缘覆盖层厚度不匀可不列为缺陷。

3)运用 X 射线对 ± 500 kV 直流复合绝缘子进行透照检测推荐参数为 $U=70$ kV、 $I=5$ mA、 $t=8$ s 和 $F=850$ mm,而对其他电压等级复合绝缘子透照检测的推荐参数可采用文中所示方法获得。

4)运用 X 射线 DR 检测技术对复合绝缘子进行检测时,清晰准确的 X 射线成像结果图的获得与拍摄角度有密切关系,故在现场运用中要进行基准定位和多角度拍摄。

5)运用相似原理可在 X 射线成像结果图上对复合绝缘子护套厚度、芯棒直径等进行直观观察和尺寸测量,可作为复合绝缘子入网检测手段之一。

6)X 射线技术对复合绝缘子进行检测是可行的,但是由于其所用系统设备较不便于移动,且有现场安全防护的要求,所以现阶段 X 射线检测技术宜于与红外、局放、陡波等检测手段相结合,利用红外成像、陡波试验、局部放电等确认出大致有异区域,再利用 X 射线透视内部以最终定性、定量、定位缺陷,提高了现场检测效率和准确性,同时也为复合绝缘子运行性能定性或者定量检测创新方法。

参考文献:

- [1] 关志成,刘瑛岩,周远翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulator and external insulation of electric transmission

and transformation equipment[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006.

- [2] 魏强华,张海兵. 超声检测在复合绝缘子护套测厚中的应用[J]. 中国电力教育,2011(3):148-149.
- WEI Qianghua, ZHANG Haibing. The supersonic examination applied in the compound insulator protective covering thickness measuring[J]. China Electric Power Education,2011(3):148-149.
- [3] 程养春,李成榕,沈小军,等. 几种合成绝缘子带电检测方法的比较[J]. 高电压技术,2004,30(6):35-37.
- CHENG Yangchun, LI Chengrong, SHEN Xiaojun, et al. Comparison along some methods on online detecting of composite insulator[J]. High Voltage Engineering,2004,30(6):35-37.
- [4] 程养春,刘斌,李成榕,等. 超高压直流线路复合绝缘子检测方法的研究[J]. 电网技术,2006,30(12):47-52.
- CHENG Yangchun, LIU Bin, LI Chengrong, et al. Detection method of composite insulators for DC EHV transmission lines[J]. Power System Technology,2006,30(12):47-52.
- [5] 陈豪,陈原,赵雪松,等. 红外测温技术在复合绝缘子检测中的应用[J]. 电力设备,2006,7(9):42-43.
- CHEN Hao, CHEN Yuan, ZHAO Xuesong, et al. Application of infrared temperature measurement technology in detection of composite insulator[J]. Electrical Equipment,2006,7(9):42-43.
- [6] 窦振宇. 超声波探伤在高压支柱瓷绝缘子内部缺陷检测中的应用[J]. 电瓷避雷器,2011(1):15-18.
- DOU Zhenyu. Application of ultrasonic testing in high voltage post porcelain insulator internal defects detection[J]. Insulators and Surge Arresters,2011(1):15-18.
- [7] 蔡炜,罗兵,孟刚,等. 基于光传感复合绝缘子智能监测技术探讨[J]. 电瓷避雷器,2011(3):1-5.
- CAI Wei, LUO Bing, MENG Gang, et al. Discuss on the intelligent monitoring technology of composite insulator with the optic fiber sensors[J]. Insulators and Surge Arresters,2011(3):1-5.
- [8] 艾维平. DXR250RT 平板探测器 X 射线实时成像检测系统的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2007.
- AI Weiping. Study of X-ray real-time imaging inspection system based on DXR250RT flat-panel detector[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2007.
- [9] 程耀瑜. 工业射线实时成像检测技术研究及高性能数字成像系统研制[D]. 南京:南京理工大学,2003.
- CHENG Yaoyu. Study on industrial radiation real-time imaging testing technology and development of high performance digital radiography system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2003.
- [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] 赵军建, 袁端鹏, 王玉杰. X 射线实时成像系统在柱式绝缘子上的应用[J]. 无损探伤, 2003, 27(4): 8-9.
- ZHAO Junjian, YUAN Duanpeng, WANG Yujie. The X-ray real-time imaging system in the application of post insulator[J]. Nondestructive Test, 2003, 27(4): 8-9.
- [13] 王达达, 魏 杰, 于 虹, 等. 基于 X 射线数字成像技术对 GIS 设备典型缺陷的可视化无损检测方法[J]. 南方电网技术, 2011, 5(增刊 2): 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.
- [14] 李 光, 王成江, 黄 进, 等. 基于声发射技术的输电线路绝缘子放电模式识别[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 25-30.
- LI Guang, WANG Chengjiang, HUANG Jin, et al. Discharge mode recognition of transmission line insulator discharge based on acoustic emission[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6): 25-30.
- [15] DL/T 810—2002 ± 500 kV 直流棒形悬式复合绝缘子技术条件[S]. 2002.
- DL/T 810—2002 Technical specification for ± 500 kV DC long rod composite insulators[S]. 2002.
- [16] 王青霞. 合成绝缘子陡波试验有效性的试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.
- WANG Qingxia. Study on the effectiveness of steep-front impulse test of composite insulator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.
- [17] 朱旭东, 孙 伟, 陈文针. 高压线路绝缘子陡波试验技术探讨[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 48-49.
- ZHU Xudong, SUN Wei, CHEN Wenzhen. Study on testing technique of steep wave impulse voltage for insulators on HV lines[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 48-49.
- [18] 李小建, 王 赋, 梅忠恕. 高海拔绝缘子陡波耐受特性试验研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 68-71.
- LI Xiaojian, WANG Fu, MEI Zhongshu. Steep front impulse withstand test of insulator at high altitude[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2): 68-71.
- [19] GB/T 19519—2004 标称电压高于 1 000 V 的交流架空线路用复合绝缘子——定义、试验方法及验收准则[S]. 2004.
- GB/T 19519—2004 Composite insulators for A C overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V—definitions, test methods and acceptance criteria[S]. 2004.
- [20] IEC 61109—1992 标称电压高于 1 000 V 的交流架空线路用复合绝缘子——定义、试验方法及验收准则[S]. 1992.
- IEC 61109—1992 Composite insulators for A C overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V—definitions, test methods and acceptance criteria[S]. 1992.
- [21] GB/T 20142—2006 标称电压高于 1 000 V 的交流架空线路用线路柱式复合绝缘子——定义、试验方法及接收准则[S]. 2006.
- GB/T 20142—2006 Overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V—definitions, test methods and acceptance criteria[S]. 2006.
- 闫文斌(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备在线监测及其故障诊断、X 射线实时成像技术在电网设备中的应用等。