

DOI: 10.7667/PSPC201782

1100 kV GIS 现场交流耐压试验放电定位技术研究

李天辉, 贾伯岩, 顾朝敏, 潘瑾, 李晓峰, 庞先海, 谷丽娜, 古海峰, 朱思旭

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 在 1100 kV GIS 设备现场交流耐压试验中, 放电定位是其中的一项关键问题和技术保证。为确保设备缺陷检查、处理以及故障隐患排除的顺利进行, 针对 1100 kV GIS 交流耐压试验中放电的定位技术展开研究。首先介绍了特高压交流耐压试验流程。随后结合耐压试验放电的特性, 对现有放电定位方法的特点及适用性进行了分析。结合放电定位的实际案例, 提出了综合多方信息对放电位置进行准确定位的方法。最后对超声检测信号所包含的信息进行了讨论, 证实了依据信号强弱和震荡持续时间进行定位具有较高的准确度。研究内容为后续特高压工程建设以及设备厂家提供了一定参考。

关键词: 特高压; 气体绝缘组合电器; 耐压试验; 放电定位

Study on discharge location technology for 1100 kV GIS field AC withstand voltage test

LI Tianhui, JIA Boyan, GU Chaomin, PAN Jin, LI Xiaofeng, PANG Xianhai, GU Lina, GU Haifeng, ZHU Sixu
(State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Discharge location is a key issue and technical guarantee for field AC withstand voltage test of 1100 kV Gas Insulated Metal-enclosed Switchgear (GIS). In order to ensure the smooth processing of equipment defect inspection as well as the elimination of hidden fault, the discharge location technique for AC withstand voltage test of 1100 kV GIS is studied in this research. Firstly, the process of Ultra-High Voltage (UHV) withstand voltage test is introduced. Then concerning the characteristics of the discharge in the withstand voltage test, the feature and applicability of the existing discharge location methods are analyzed. A technique for accurate discharge location by considering comprehensive multi-information is proposed according to the actual location cases. Finally, the information contained in the ultrasonic detection signal is discussed emphatically, which proves that the location based on the signal strength and the oscillation duration has higher accuracy. This research provides some reference to the subsequent UHV project construction and the equipment manufacturers.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51221005).

Key words: UHV; gas insulated metal-enclosed switchgear; withstand voltage test; discharge location

0 引言

特高压变电站是国家特高压骨干网架上的重要枢纽。开关设备作为变电站内关键电力设备之一, 承载着控制和保护输电通道的作用, 是特高压变电站的重要组成部分。当前 1100 kV 开关设备普遍采用气体绝缘金属封闭开关设备(Gas Insulated metal-enclosed Switchgear, GIS)^[1-2]。由于设备体积大、占地面积广, GIS 需要将断路器、母线等各个功能模块单独运输至变电站后, 在现场进行组装, 因此 GIS

设备质量受现场安装环境与安装施工工艺的影响很大, 容易产生威胁绝缘性能的缺陷, 成为特高压骨干电网安全运行的故障隐患^[3-5]。1100 kV GIS 交流耐压试验作为特高压设备交接试验中的关键试验, 主要考核 1100 kV GIS 设备安装后主回路的绝缘性能, 检查设备制造、运输和安装质量, 能够有效发现由于发生冲撞、操作不当或工艺控制不严导致的机械或绝缘缺陷, 成为把控 GIS 设备质量的最后一道关口^[6-9]。

在 1100 kV GIS 设备交流耐压试验中, 故障定位是其中的一个关键问题和技术保证。试验中一旦发生设备击穿性放电, 仅靠分段重复加压、人耳听

觉辨别等传统方法进行放电定位具有较大的困难。在放电发生后, 采用合理的技术手段快速、准确地定位放电位置, 对于现场设备绝缘缺陷和放电部件检查、及时采取处理措施、保障试验顺利进行等都是十分必要的。因此, 在 1100 kV GIS 耐压试验过程中需运用有效的放电定位监视系统, 对试验放电情况进行全程检测和监督, 为设备故障隐患的排除提供有利条件, 也为特高压变电站 1100 kV GIS 设备的顺利投运奠定坚实的基础。

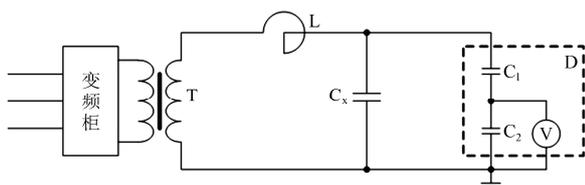
基于此背景, 本文对特高压交接试验中放电定位技术展开研究。首先介绍了特高压交流耐压试验流程。随后结合耐压试验放电的特性, 对现有放电定位技术的原理、特点及适用性进行了分析。最后通过放电后成功定位缺陷的案例, 对现场试验中的放电定位过程和技术进行了研究。重点分析了超声定位系统的信号特点以及定位有效性, 并通过案例分析, 讨论了超声信号中所包含的放电信息。

1 1100 kV GIS 交流耐压试验

1.1 试验原理

试验电压从 GIS 的出线套管处施压, 将电压施加到每相导体和外壳之间, 非被试相应可靠接地。每个部件至少加一次试验电压。

耐压试验采用串联谐振电路^[10-13], 试验接线原理如图 1。试验中, 加压部分连接引线使用 $\phi 500$ mm 金属波纹管, 以减小电晕损耗。



(C_x 为试品主回路等效对地电容; L 为电抗器; D 为分压器; T 为试验变压器)

图 1 GIS 主回路交流耐压试验接线原理图

Fig. 1 Wiring schematic of GIS main circuit withstand voltage test

1.2 试验程序

特高压 1100 kV GIS 一般采用分阶段试验的方式进行交流耐压试验。根据 GIS 的规模和安装进度, 试验分为分段 1100 kV 耐压试验和投运前全站 762 kV 带电试验。

1.2.1 分段试验

交流耐压试验的加压程序如图 2 所示: 从零电压升至 $U_m / \sqrt{3}$ (635 kV), 持续 10 min(T_1), 然后升至 $1.2U_m / \sqrt{3}$ (762 kV), 持续 20 min(T_2), 完成设

备老练; 最后升至 U_m (1100 kV), 持续 1 min(T_3), 进行设备耐压。耐压试验结束后, 将电压降到 $1.2U_m / \sqrt{3}$ (762 kV), 持续 30 min(T_4), 进行局部放电测量。局部放电测试结束后, 电压降至零。

1.2.2 投运前全站 762 kV 带电试验

设备投运前, 在所有传动试验完成、开关基本不再动作的情况下进行 GIS 母线(包括母线电压互感器)通电试验, 试验电压为 $1.2U_m / \sqrt{3}$ (762 kV, 零起直接升到)、加压时间 1 h。

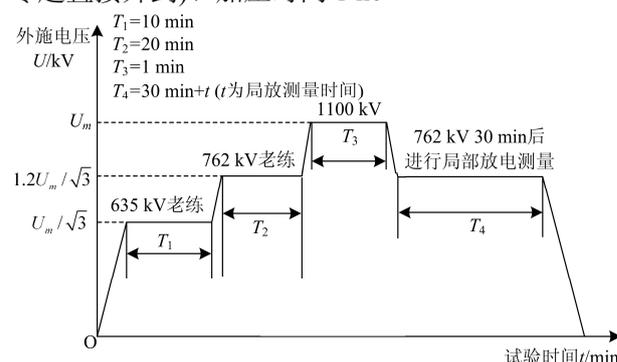


图 2 主回路绝缘试验加压程序示意图

Fig. 2 Diagram of applying voltage procedure of the main circuit insulation test

1.3 试验结果判断

在试验中, 如果 GIS 的每一个部件在整个试验过程中未发生击穿放电现象且未检测到异常局部放电信号, 则认为 GIS 通过试验。

在试验过程中如果发生击穿放电, 应进行放电位置定位(为确定放电位置和类型, 必要时也可再次耐压, 但即便通过也不视为产品通过试验)。采取开盖检查和处理措施后, 方可重新试验。

2 放电定位技术原理及方法

由于耐压试验中发生的放电和局部放电相似, 是一个包括物理、化学和电气过程, 伴有一系列声、光、电、热、机械等效应, 产生多种生成物的混合物理过程^[14-16]。原则上, 它们中的任何一种效应都可用来进行放电定位。然而不同的是, 局部放电产生后, 往往在一段时间内会一直存在, 可以持续接收到因放电效应而产生的信号; 而耐压试验中一旦发生放电, 会立即导致串联谐振试验系统失谐, 从而使电压迅速下降, 伴随放电产生的信号也会立即消失。可见, 因两者信号的差异性和检测要求的区别, 使得并非所有的局部放电定位方法都适用于耐压试验放电定位, 这一点需要特别注意。

当前在现场试验中主要采用的定位方法有如下几种: 特高频法、化学法和超声法。

2.1 特高频法

特高频法(Ultra High Frequency, UHF)是利用特高频电磁波信号对局部放电进行监测和诊断的一种方法,因其灵敏度高、抗干扰性强等优点得到了广泛的认可和应用。在放电定位方面,因电磁波传播速度近似为光速,故能够实现放电位置的精确定位,理论上误差可达到厘米级。

然而在实际应用中,该方法对示波器等硬件的要求很高。为了达到 10 cm 以内的定位准确度,需要高达 0.1 ns 的时间分辨率。此外,传感器接收信号波形中对第一个明显峰值上升沿的读取与辨识直接关系到特高频信号到达传感器时刻的确定。而由于 GIS 内部复杂的谐振以及电磁波的折反射,信号起始点往往很模糊,常难以读取,故要得到准确的时间差是很困难的。当时间差较大时,在时域内想要高准确度地处理信号非常困难。因此,利用特高频法定位在实际应用中存在一定的限制。

2.2 化学法

化学法(Dissolved Gas Analysis, DGA)通过采用碳纳米管等设备对 SF₆ 气体进行分解物分析,判断气体分解成分,或用气相色谱分析确定分解气体的组成和浓度,来诊断内部 SF₆ 的状态和放电是否发生。另外,由于 SF₆ 放电往往伴随生成具有臭鸡蛋气味的 H₂S,而纯净的 SF₆ 是无色无味的。因此,在现场经常采用将疑似气室内少量气体排出的方法,通过判别气味来实现对放电位置的简单定位。

事实上,对于交流耐压试验中发生的放电,由于能量较小,导致分解的 SF₆ 也较少。考虑到特高压等级的 GIS 气室体积通常较大,产生的 SF₆ 分解物往往需要一定时间才能扩散开从而被检测到。由此可见,化学法精确度较低,仅能大致判断出放电发生在哪个气室,且时效性较差,不能在放电发生后立即对放电位置进行定位。通常在实际中并不单独使用化学法,而是在现场结合其他方法进行定位,或用来进行其他方法定位后的二次确认。

2.3 超声法

超声法(Ultrasonic Method, UM)是通过检测腔体机械振动和内部超声波信号,来实现对放电位置的定位。现场可利用信号到达时差法以及幅值比较法对放电位置进行分析。

超声信号传播速度远低于特高频信号,因此由信号起始时刻读取而造成的距离误差较小,能够实现精确度较高的放电定位。然而,因超声信号在 GIS 腔内和外壳上传播衰减很快,所以需要在试验设备上布置较多的传感器进行定位。尽管如此,超声法仍以其较高的灵敏度、不受现场电信号干扰等优点

在众多定位方法中脱颖而出,得到了非常广泛的应用。

2.3.1 超声定位系统

图 3 给出了一种基于超声法的开关设备耐压试验放电故障定位测试系统,检测频带为 20 kHz~300 kHz,包含超声波传感器、信号调理器、信号处理服务器等部件。该系统利用多传感联合检测的方式对耐压测试中的 GIS 设备进行实时监测,将 GIS 内部故障放电信号进行放大和采集,通过无线通信将数据结果传输到信号处理服务器进行分析,提取放电脉冲判断击穿点的大致位置。

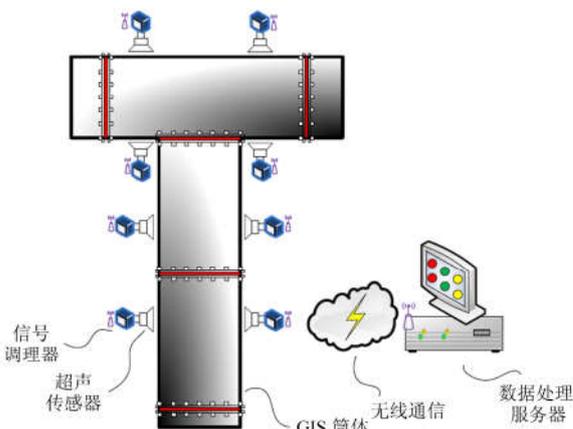


图 3 超声定位系统

Fig. 3 Ultrasonic location system

2.3.2 应用流程

耐压试验前,在加压范围内的 GIS 上加装击穿定位传感器和测试仪,合理布置探头,保证定位监测无死角。实际试验时,根据临近传感器检测到放电超声波信号的幅值比较和接收顺序综合判断和查找放电部位,同时结合 SF₆ 气体成分分析予以确定,从而实现现场 GIS 设备交流耐压试验下绝缘击穿故障点的有效定位。

3 放电定位分析案例

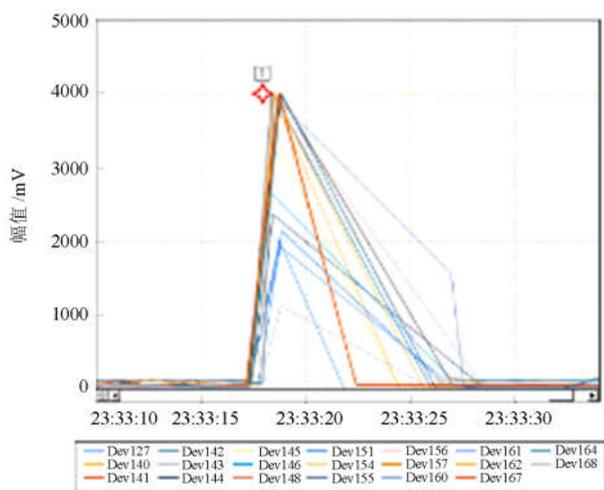
3.1 放电现象

某变电站在进行一串 1100 kV GIS 耐压试验时,当电压升至 1100 kV 几秒后,设备传出异响声,初步判断发生放电。放电发生后,串谱试验系统失谐,试验电压迅速降至零。

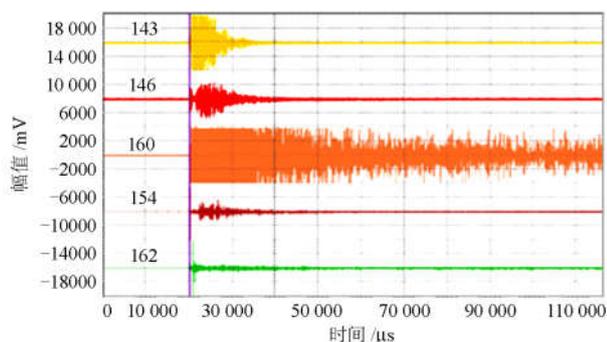
3.2 放电定位分析

定位装置的监测结果见图 4(传感器位置布置如图 5 所示)。信号幅值监测曲线显示,有传感器接收到高幅值超声波信号,触发 4000 mV 预设阈值,如图 4(a)所示。同时,串谱系统失谐,确认发生被试设备放电。由于放电信号较大,放电对布置的大多

数传感器都产生了影响, 信号幅值几乎都有明显的抬升, 但不同位置上信号幅值升高的幅度并不相同。143、146、160、154 和 162 号传感器位置的信号更大且特征更加明显。将传感器接收信号波形进行展开对比, 如图 4(b)。可见, 不同传感器触发信号波形的特征有明显差异。160 号传感器位置的信号波形幅值最大、振荡最为剧烈且持续时间最长。143 和 146 位置的信号波形相似且与 160 特征不同, 在信号起始时刻存在有一定幅值的陡脉冲并很快衰减消失, 随后紧跟一簇更密集的脉冲序列, 经约 20 ms 后衰减至零, 振荡时间短于 160。而 154 和 162 位置的信号较前面三个弱很多, 但信号起始时刻的短时陡脉冲更加明显。根据超声信号特点, 距离放电电源越近, 信号越强, 且振荡越剧烈, 衰减也越慢。故从波形特征上看, 推断放电发生在 160 位置附近。



(a) 监测曲线



(b) 触发信号波形

图 4 放电定位结果

Fig. 4 Result of discharge location

放电后, 现场人员首先通过闻气室 SF₆ 气体, 发现疑似放电腔体内断路器合闸电阻气室气体气味异常。随后, 利用气体综合检测仪对罐体内 SF₆ 分解物进行了检测分析和对比, 发现疑似放电腔体内

的 SO₂ 和 H₂S 含量存在异常, 较周围气室内的数值存在较大波动。这也进一步证实了上述定位分析的结论。

3.3 确认检查

依据上述定位分析以及 GIS 生产厂家的意见, 于试验次日对故障相的疑似放电位置进行了解体。发现 II 号出线水平分支母线拐角处屏蔽罩发生对地放电。放电位置如图 5 所示, 与超声和化学法定位结果相符。

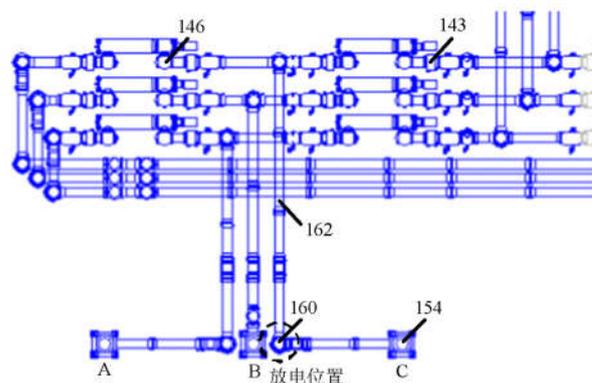


图 5 耐压试验中放电发生位置

Fig. 5 Discharge position of the withstand voltage test

放电位置和部件确定后, 由设备厂家在现场对故障设备部件进行更换, 重新进行清理和抽充气。完成其他相关常规试验后, 再次对故障相设备进行交流耐压试验, 设备顺利通过。

4 关于超声信号包含信息的讨论

为分析前端短时陡脉冲的信号到达时刻, 将波形图进一步展开, 得到图 6。

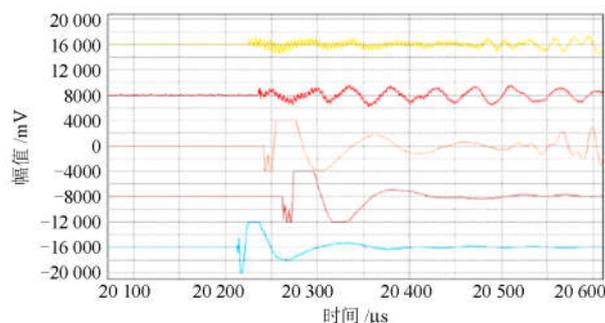


图 6 信号放大波形

Fig. 6 Amplified signal waveform

可以看出, 最先接收到信号的是 162 位置传感器, 而非 160 位置。实际上, 如前面所述, 在放电发生后, 除了产生超声信号外, 还伴随有特高频信号生成。这种特高频信号通过盆式绝缘子浇铸孔

等位置从 GIS 内部辐射出来,也能够被超声传感器感应到一部分,特别是位于放电源附近位置上的传感器,如 162 和 154 位置。由于频率较高,这部分信号上升沿远陡于超声信号,又因放电瞬间发生后立即消失,故持续时间很短。而放电产生的超声信号引发机械振动波向外传播,持续时间较长,所以两者容易区分。但由于特高频信号产生到接收位置的传输路径复杂无法确定,因此其到达时刻并不能完全作为放电位置定位的依据,仅能作为判断位置的参考。

以另外一起耐压试验中的放电为例,放电定位结果如图 7 所示。从起始时刻上看,在前两个传感器 164 和 110 上最早感应到了特高频信号的陡前沿脉冲,此时其他位置上信号基本没有变化。紧接着超声振荡信号传播到达各个位置,特别是在 148 传感器位置上,信号持续的时间明显更长。因此,怀疑该位置距离放电最近。经检查证实了此推断,放电位置如图 7(b)中 148 传感器位置。可见,实际中依据信号强弱和振荡持续时间判断放电位置具有较高的准确度。

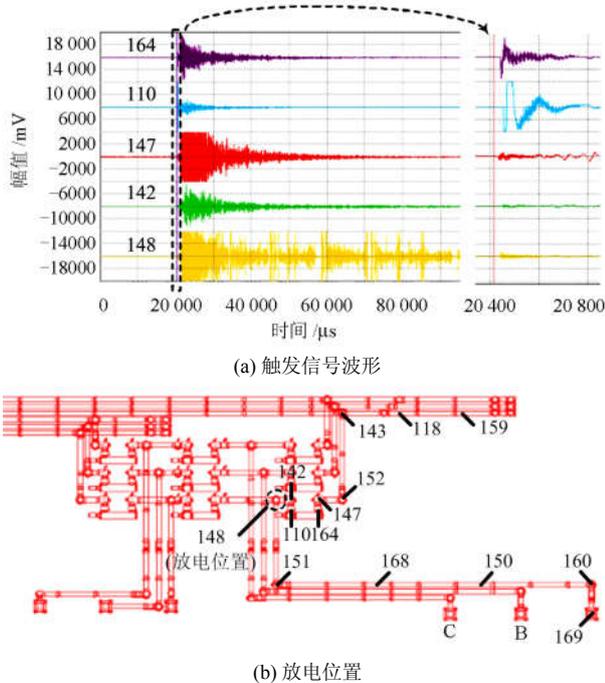


图 7 另一起放电案例的定位结果

Fig. 7 Discharge location result of another case

5 结论

本文通过对放电定位技术原理、特点及适用性的分析,结合特高压 1100 kV GIS 在耐压试验中发生的放电实例,对交接试验中放电定位技术的实际

应用展开研究。提出了综合放电引起的各种效应及耐压试验过程中各种诊断技术信息,实现对现场 GIS 交流耐压试验中放电位置的有效定位。讨论了超声检测信号的特征及所包含信息,证实了依据信号强弱和振荡持续时间进行定位具有较高的准确度。本文为后续特高压工程建设以及设备厂家提供了一定参考。

参考文献

[1] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.

[2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.

[3] CHAN T M, HEIL F, KOPEJTKOVA D, et al. Report on the second international survey on high voltage gas insulated substations (GIS) service experience[C] // International Conference on Large High Voltage Electric Systems CIGRE'98 Session Papers, Paris, France: CIGRE, 2000: 102.

[4] NEUMANN C, HUBERR, MEURER D, et al. The impact of insulation monitoring and diagnostics on reliability and exploitation of service life[C] // Session 2006, 2006: 1-9.

[5] 金李鸣. 550 kV GIS 现场交流耐压试验和放电故障分析[J]. 浙江电力, 2006(2): 53-57.
JIN Liming. AC voltage withstanding test on site and analysis of discharge failures in 550 kV GIS[J]. Zhejiang Electric Power, 2006(2): 53-57.

[6] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[7] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

[8] 1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB/T 50832—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Standard for acceptance test of electric equipment of 1000 kV system electric equipment installation engineering: GB/T 50832—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

[9] 侍海军, 王光前, 张少炎. GIS 现场绝缘试验技术[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 55-58.
SHI Haijun, WANG Guangqian, ZHANG Shaoyan.

- Analysis of gas insulated switchgear test methods on site[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 55-58.
- [10] 全朝春, 关根志, 袁用武. 变频串联谐振在 GIS 绝缘试验中的应用[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 199-200.
QUAN Zhaochun, GUAN Genzhi, YUAN Yongwu, et al. Application of frequency tuned series resonance in dielectric testing of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 199-200.
- [11] 局部放电测量: GB/T 7354—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Partial discharge measurements: GB/T 7354—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [12] 1000 kV 交流系统电力设备现场试验实施导则: DL/T309—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Execution guide for field test of 1000 kV AC system power equipment: DL/T309—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [13] 气体绝缘金属封闭开关设备现场交流耐压及绝缘试验导则: DL/T555—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
Guide for withstand voltage and insulated test of gas-insulated metal-enclosure switchgear on site: DL/T555—2004[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [14] 叶海峰, 钱勇, 王江, 等. 用于变电站放电源空间定位的特高频传感器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 54-60.
YE Haifeng, QIAN Yong, WANG Jiang, et al. Research on UHF sensor for partial discharge spatial location in substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 54-60.
- [15] 杜晓平, 李涛, 陈瑞林. 一起 220 kV GIS 闪络故障分析及建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 128-129.
DU Xiaoping, LI Tao, CHEN Ruilin. Analysis and suggestions for flashover fault of 220 kV gas insulated switchgear[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 128-129.
- [16] 魏云冰, 王东晖, 韩立峰, 等. 一种基于 MIA 的油浸式变压器放电性故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 41-47.
WEI Yunbing, WANG Donghui, HAN Lifeng, et al. A novel method for discharging fault diagnosis and location of oil-immersed power transformers based on MIA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 41-47.

收稿日期: 2017-06-18; 修回日期: 2017-10-12

作者简介:

李天辉(1984—), 男, 通信作者, 工学博士, 高级工程师, 主要从事高电压试验技术、电力设备状态监测与故障诊断技术方面的研究工作; E-mail: wdlth826@gmail.com

贾伯岩(1978—), 男, 工学学士, 高级工程师, 主要从事电力系统外绝缘、电气设备状态监测与故障诊断方面的研究工作;

顾朝敏(1985—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事开关电器技术、电气设备状态监测与评估等方面研究。

(编辑 张爱琴)