

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201904017



# GIS 模拟装置的设计与测试

史志明<sup>1</sup>, 黄诚惕<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 信息与通信工程学院, 四川 成都 611731;  
2. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 针对封闭式气体绝缘组合电器(GIS)设备长期运行出现局部放电的现象,设计一种 GIS 模拟装置. 通过现场试验,模拟不同气压、材质、结构尺寸下的 5 种绝缘缺陷,并分析其局部放电类型和量值影响程度. 试验结果表明:该设备能够较好地反映真实的 GIS 放电情况.

**关键词:** 封闭式气体绝缘组合电器; 局部放电; 带电检测; 绝缘缺陷

**中图分类号:** TM 246.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)06-0793-06

## Design and Measurement of GIS Simulation Device

SHI Zhiming<sup>1</sup>, HUANG Chengti<sup>2</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 611731, China;  
2. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Aiming at the phenomenon of partial discharge in enclosed gas insulated switchgear (GIS) which runs long time, a GIS simulation device is designed. By the field test, five kinds of insulation defects with different air pressure, materials and structural sizes are simulated to analyze the kinds of partial discharge and the magnitude of impact. The experimental results show that this equipment can reflect the partial discharge of reality GIS device better.

**Keywords:** enclosed gas insulated switchgear; partial discharge; charge detection; insulation defects

封闭式气体绝缘组合电器(GIS)已广泛应用于高压输变电系统中<sup>[1-2]</sup>,然而,GIS 绝缘劣化会导致局部放电,常伴有发光、发声、电脉冲和 SF<sub>6</sub> 气体发生化学变化等现象<sup>[3-4]</sup>,从而引起设备故障,影响电网的安全可靠运行.局部放电检测是检验 GIS 设备的有效方法<sup>[5-6]</sup>,该方法能发现设备内部的绝缘缺陷,及时处理问题,提高设备的检修率,保障电网的稳定运行<sup>[7-9]</sup>.目前,国内外对 GIS 局部放电检测技术开展了大量研究<sup>[10-12]</sup>.段大鹏等<sup>[13]</sup>研究特高频与超声波局部放电方法检测 SF<sub>6</sub> 气体绝缘开关设备的典型缺陷,并对一个典型的 GIS 局部放电案例进行分析.田妍等<sup>[14]</sup>分析了 GIS 局部放电缺陷,并采用超高频、超声波检测方法对放电位置进行精确定位.王琼等<sup>[15]</sup>利用脉冲电流法和分解物检测法,研究 GIS 悬浮缺陷模型局部放电和它的分解产物特征.文献<sup>[16-17]</sup>设计了 GIS 局部放电特高频传感器,用于检测设备内部的放电情况.芦竹茂等<sup>[18]</sup>综合研究多种带电检测方法在 GIS 局部放电诊断中的应用.国外也有多家研究机构通过设计不同材料的导体观察局部放电现象,然而,真实的 GIS 装置能够模拟的放电模型有限,且不易观察,放电量不好测量,放电模型也不易调整、更换.因此,有必要对真实的 GIS 装置进

行模拟,设计一套 GIS 模拟装置. 本文针对 GIS 局部放电的缺陷,设计 GIS 模拟装置,并对不同气压、材质、结构尺寸下 5 种绝缘缺陷的现场试验进行分析,测试其局部放电类型和量值影响程度.

## 1 GIS 模拟设计原理及功能

针对目前 GIS 内部绝缘缺陷研究存在的问题,设计的 GIS 局部放电装置能够模拟各种类型的放电现场. 它采用铸铁外壳、铝制母线,内部填充了 0.3~0.5 MPa 的 SF<sub>6</sub> 绝缘气体. 因此,在设计过程中需要考虑最高承受 0.6 MPa 的 SF<sub>6</sub> 绝缘气体,但是,壳体需要同时承受内外压力. 当壳体承受内压力时,接地壳体厚度 S<sub>i</sub> 为

$$S_i = \frac{pD}{2|\sigma|} + C. \tag{1}$$

式(1)中: $p$  为理论设计的压力; $D$  为接地壳体内直径; $|\sigma|$  为使用材料的许用应力; $C$  为附加厚度. 当壳体承受外压力时,接地壳体厚度 S<sub>o</sub> 为

$$S_o = D\sqrt{\frac{p_a}{2.2E}}. \tag{2}$$

式(2)中: $p_a$  为临界外压力; $E$  为材料的弹性模量,对于不锈钢取 172~200 GPa(临界外压力). 设计装置时,还需考虑 SF<sub>6</sub> 气体分解物会对壳体内壁造成一定的腐蚀,故在理论计算的基础上,应加上一定的强度裕度,GIS 接地壳厚度设计为 3 mm. 另外,接地壳体和支撑绝缘子,以及放电模型与母线距离的调节杆,都会产生缝隙,因此,在设计时选用了“O”形橡胶圈进行密封处理.

GIS 模拟装置主要用于现场构建 GIS 运行环境,模拟各种不同局部放电故障. GIS 局部放电装置结构,如图 1 所示. 装置的主要组成部分有:放电模块存储室,用于放置典型曲线放电模块,并可手动调节相关放电模块;内置超高频传感器,用于检测设备内部信号、放电量大;内置升压变压器,可以模拟电压的变化;内置耦合电容器,可以配合局部放电测试,检测内部放电;内置视频监测系统,采用红外探测模式实时监测装置内部放电情况,包括放电模块位置;母线是装置内部的高压部分,调节母线支架与放电模块之间的距离,实现放电强度的控制;装置本体及支架,提供了一个封闭的 GIS 现场试验环境,使用中只要保证接地良好就无高压风险;电源控制箱,主要是与变压器输入链接,控制电压输出. 该装置支持数据同步传输,可将检测数据、图谱等试验结果,通过有线或无线高速网口,交换到投影机上播放. 它可在实验室内模拟 GIS 内部各种单一缺陷和不同组合缺陷,获得现场测试数据,并对局部放电模式进行识别,能够有效地应用于科研、教学,并为电力电网设备检修提供重要依据.

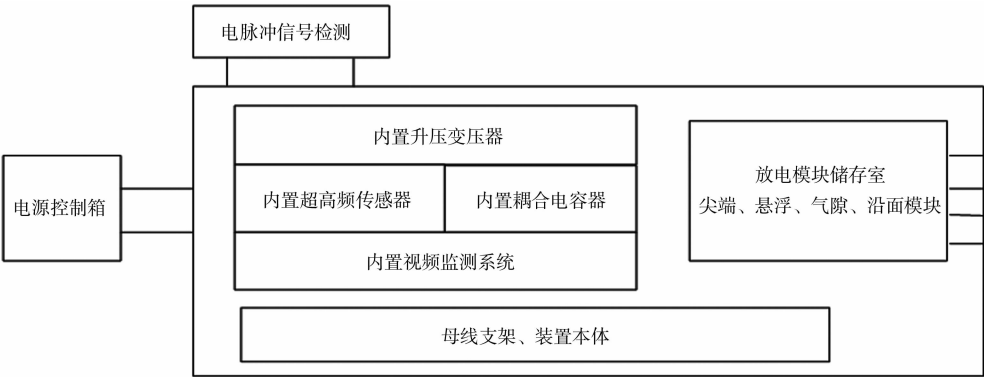


图 1 GIS 局部放电装置结构

Fig. 1 GIS partial discharge device structure

## 2 缺陷放电试验

### 2.1 气隙放电试验

在气隙放电模型中,研究气隙材质与母线接触面之间的关系,设计 4 种不同组合的气隙放电缺陷模型,如图 2 所示. 图 2 中:从左往右依次是环氧树脂(无金属底端)、环氧树脂(有金属底端)、聚甲醛(无金

属底端)、聚甲醛(有金属底端). 将它们植入 GIS 缺陷模拟装置中,在相同电压下,重复进行 3 次测试,观察它们的一致性,结果如表 1 所示. 表 1 中: $Q_{21}$ , $Q_{25}$  分别为在 21,25 kV 下的局部放电量.

由表 1 可知:无金属底端的环氧树脂模型 3 次局部放电数据差异较大;装有金属底端的环氧树脂模型局部放电水平相对较好;但对于聚甲醛材质模型,无论是否装有金属底端,其局部放电水平均差异不大. 因此,从整体考虑,为了保证环氧树脂模型与高压部分接触良好,最好加装金属底座.

表 1 不同材质的局部放电试验结果

Tab. 1 Partial discharge test results of different materials

材料	编号	$Q_{25}/\text{pC}$	材料	编号	$Q_{21}/\text{pC}$
环氧树脂 (无金属底端)	1	57.40	聚甲醛 (无金属底端)	1	7.34
	2	12.30		2	11.20
	3	36.70		3	5.71
环氧树脂 (有金属底端)	1	22.50	聚甲醛 (有金属底端)	1	12.20
	2	14.60		2	16.80
	3	16.70		3	11.50

2.2 悬浮放电试验

设计 6 种不同体积的铝制悬浮局部放电模型,如图 3 所示. 将设计的铝制悬浮局部放电模型放入 GIS 缺陷模拟装置中,并使装置内气压从 0.3 MPa 升高至 0.4 MPa,观察其起始放电电压和局部放电量,试验结果如表 2 所示. 表 2 中: $P$  为气压; $U_0$  为起始放电电压; $Q_0$  为起始放电量.

由表 2 可知:当 GIS 模型装置内的试验气压由 0.3 MPa 升高至 0.4 MPa 时,起始放电电压均有所增加,但起始放电量基本不变,不同体积的模型也会影响放电电压.

表 2 不同气压的悬浮局部放电试验结果

Tab. 2 Suspension partial discharge test results of different pressures

模型编号	$P=0.3\text{ MPa}$		$P=0.4\text{ MPa}$	
	$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$	$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$
1	56.64	>5 000(溢出)	65.45	>5 000(溢出)
2	50.08	>5 000(溢出)	57.86	>5 000(溢出)
3	51.22	>5 000(溢出)	57.93	>5 000(溢出)
4	56.00	>5 000(溢出)	63.75	>5 000(溢出)
5	45.61	>5 000(溢出)	50.02	>5 000(溢出)
6	38.76	>5 000(溢出)	49.10	>5 000(溢出)

2.3 颗粒放电试验

不同金属颗粒的放电模型,如图 4 所示. 4 组模型从左往右分别为 20 颗直径为 1 mm 的小铝球装入完好的玻璃罩中,20 颗直径为 1 mm 的小铝球装入破碎的玻璃罩中,20 颗直径为 1 mm 的小铝球再加 1 颗直径为 3 mm 的大铝球装入完好的玻璃罩中,20 颗直径为 1 mm 的小铝球再加 1 颗直径为 3 mm 的大铝球装入破碎的玻璃罩中.

当试验气压为 0.3 MPa 时,将不同金属颗粒的放电模型放入 GIS 模拟装置中,研究破碎玻璃罩对金属颗粒放电



图 2 不同材质的气隙放电模型  
Fig. 2 Different materials of air gap discharge model



图 3 6 种体积的悬浮放电模型  
Fig. 3 Six size of suspension discharge model



图 4 金属颗粒放电模型  
Fig. 4 Metal particle discharge model

的影响,结果如表 3 所示.

由表 3 可知:玻璃罩破碎对颗粒放电无影响,但是会导致颗粒及玻璃碎片掉落,从而使颗粒持续放电,且玻璃碎片和颗粒粘结在一起无法脱离,因此,玻璃罩如有破碎应及时更换.

表 3 不同金属颗粒模型局部放电试验结果

Tab. 3 Partial discharge test results of different metal particle models

模型编号	模型	$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$	放电特征
1	20 小(完好的玻璃罩)	47.90	0.47	玻璃罩是否破碎,对局部放电波形无影响
2	20 小(破碎的玻璃罩)	46.76	0.49	玻璃罩是否破碎,对局部放电波形无影响
3	20 小 1 大(完好的玻璃罩)	50.48	10.06	玻璃罩是否破碎,对局部放电波形无影响
4	20 小 1 大(破碎的玻璃罩)	51.20	9.11	玻璃罩是否破碎,对局部放电波形无影响

2.4 尖端放电试验

不同曲率尖端的放电模型,如图 5 所示.将 8 个不同曲率尖端(模型曲率大小为  $2>3>5>6>4>1>7>8$ )的放电模型分 2 次装进 GIS 模拟装置中,分别充入 0.3,0.4 MPa 的  $\text{SF}_6$  气体,施加不同气压,观察其起始放电电压和起始局部放电量,结果如表 4 所示.

由表 4 可知:当 GIS 装置的  $\text{SF}_6$  气压由 0.3 MPa 升高至 0.4 MPa 时,起始放电电压均有所升高,但局部放电量基本不变,不同曲率尖端的放电模型会影响放电电压.



图 5 不同曲率尖端放电模型

Fig. 5 Different curvature tip discharge models

表 4 不同曲率尖端的放电试验结果

Tab. 4 Tip discharge test results of different curvature

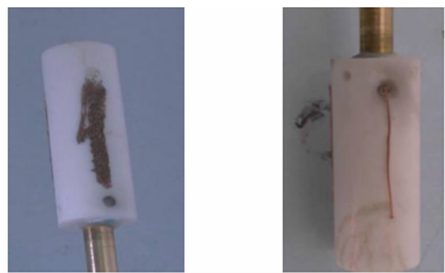
模型编号	$P=0.3\text{ MPa}$		$P=0.4\text{ MPa}$		模型编号	$P=0.3\text{ MPa}$		$P=0.4\text{ MPa}$	
	$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$	$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$		$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$	$U_0/\text{kV}$	$Q_0/\text{pC}$
1	45.30	33.10	56.70	32.30	5	30.90	8.77	36.40	9.15
2	26.60	8.07	35.30	10.00	6	36.70	24.90	48.10	28.70
3	29.60	9.54	39.20	11.30	7	70.50	放电即击穿	85.00	放电即击穿
4	43.00	34.60	50.10	33.30	8	—	—	—	—

2.5 沿面放电试验

不同的沿面放电模型,如图 6 所示.根据沿面放电的原理与实际测试波形,制作了 2 种沿面放电模型,如图 6 所示.图 6 中:模型 1 为环氧树脂层,且表面涂有金属颗粒;模型 2 为环氧树脂层,表面为金属丝.

在不同气压(选择  $\text{SF}_6$  气压环境分别为 0.1,0.2,0.3 MPa)下,采用脉冲电流法,分别测试 2 个模型的放电量,测试数据及图谱如表 5,6 所示.表 5,6 中: $U$  为试验电压; $Q$  为局部放电量.

由表 5,6 可知:随着气压的升高,2 个模型的起始放电电压都有所提高,起始放电量也随之提高,因此,气压是影响放电电压与量值的一个重要因素.对比 2 种



(a) 模型 1

(b) 模型 2

图 6 沿面放电模型

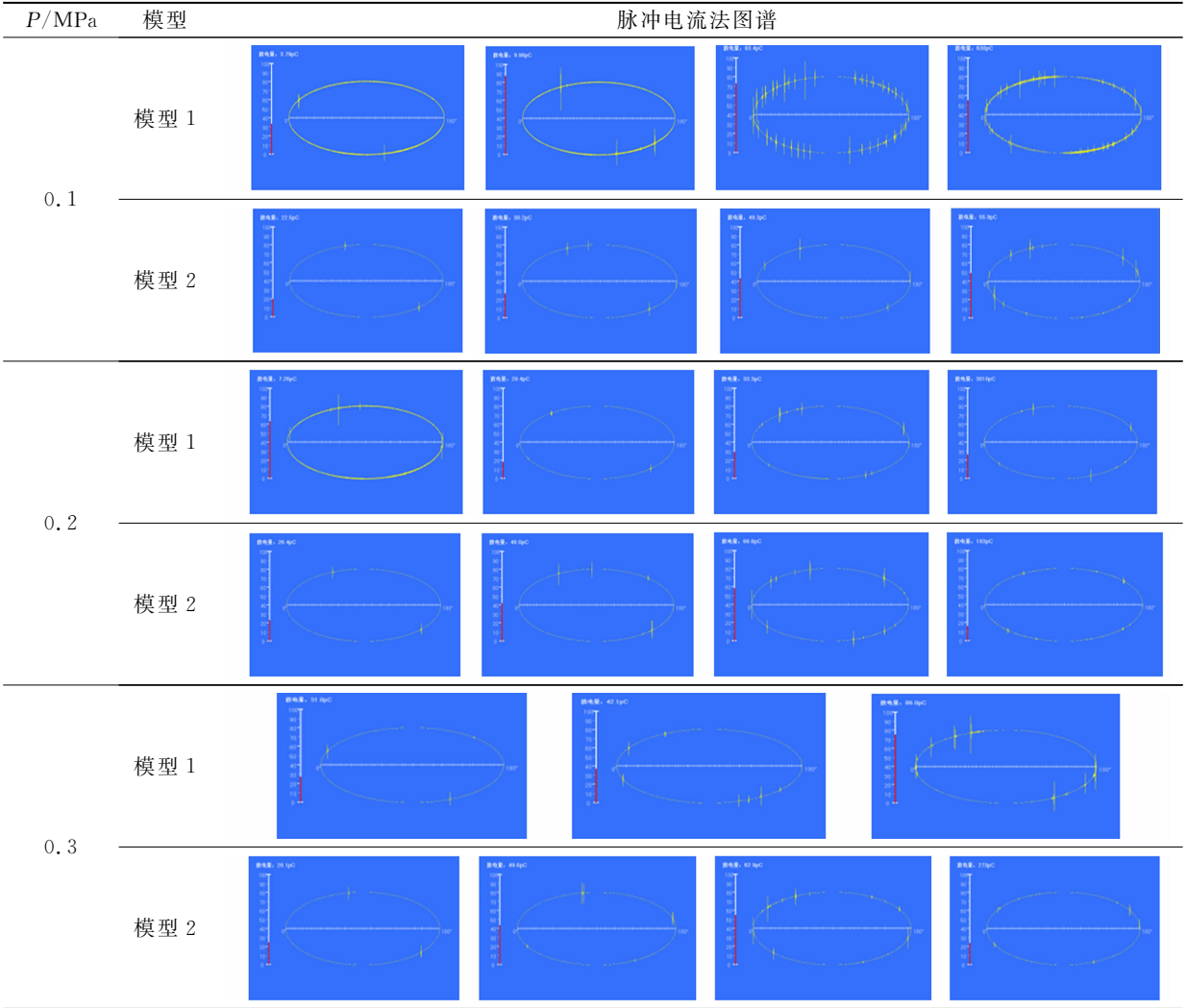
Fig. 6 Surface discharge model

表 5 沿面放电模型测试数据

Tab. 5 Measured data of surface discharge model

$P/\text{MPa}$	模型 1		模型 2		$P/\text{MPa}$	模型 1		模型 2		$P/\text{MPa}$	模型 1		模型 2	
	$U/\text{kV}$	$Q/\text{pC}$	$U/\text{kV}$	$Q/\text{pC}$		$U/\text{kV}$	$Q/\text{pC}$	$U/\text{kV}$	$Q/\text{pC}$		$U/\text{kV}$	$Q/\text{pC}$	$U/\text{kV}$	$Q/\text{pC}$
0.1	1.00	3.79	13.27	22.50	0.2	16.55	20.40	13.40	28.10	0.3	22.75	31.00	14.70	26.40
	1.30	9.98	15.10	30.20		29.20	33.30	17.30	49.60		29.52	42.10	17.45	48.00
	17.55	83.40	17.60	49.30		62.40	3010.00	30.40	62.90		37.40	86.00	31.40	66.60
	62.40	630.00	31.30	55.90										

表 6 沿面放电模型图谱  
Tab.6 Model map of surface discharge



模型,模型 1 的放电量值变化范围更大,更加不容易控制其量值变化,而模型 2 的放电量值变化范围相对较小,容易通过调节电压来控制其放电量值.

3 结论

针对现有 GIS 设备的缺陷,设计了一种 GIS 局部放电模拟装置,并介绍了其主要功能. 为了证实设备的适用性,分别对 5 种放电模型进行测试,即在气隙放电研究中,进行了无金属底端和有金属底端的环氧树脂试验;在悬浮放电、尖端放电、沿面放电研究中,分别进行了不同气压的测试;在颗粒放电研究中,对完整、破碎玻璃罩的放电情况进行测试. 综合上述试验得到如下 3 点结论:1) 当外部施加电压升高时,局部放电量会上升;2) 局部放电量与放电模型关系密切,不同放电模型的放电量有所不同;3) 当 GIS 装置内的气压升高时,起始放电电压升高,起始放电量基本不变.

通过对 GIS 局部放电检测试验模型的研究,模拟了多种绝缘缺陷,加强了对 GIS 设备局部放电的了解;同时,对模拟试验与现场实际试验数据、图谱进行对比,可以确切地了解 GIS 的运行状况,并能识别存在的故障,从而采取必要的预防措施以满足实际生产、试验研究的需要,为电网 GIS 设备检修提供依据,提高检修效率.

参考文献:

[1] 王增彬,吕鸿,李兴旺,等. 基于网络分析仪的 GIS 局部放电在线监测特高频传感器现场校核技术[J]. 广东电力, <http://www.hdxh.hqu.edu.cn>

2014,27(11):90-96. DOI:10.3969/j.issn.1007-290X.2014.11.019.

[2] 贾志杰,张斌,等. GIS 回路电阻超标缺陷定位分析[J]. 中国电力,2015,48(5):46-50.

[3] 夏飞,罗志疆,张浩,等. 混合神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(1):118-124. DOI:10.13382/j.jemi.2017.01.017.

[4] 谷强,金鑫,苑婷,等. GIS 不停电交流耐压装置的研制及现场应用[J]. 中国电力,2017,50(10):83-88. DOI:10.11930/j.issn.1004-9649.20160039.

[5] 李通,谢庆,张宏伟,等. 基于信号稀疏分解的局放超声阵列定位法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1301-1310.

[6] 张高潮,徐洋,刘卫东,等. GIS 内置局部放电 UHF 耦合器的灵敏度[J]. 高电压技术,2016,42(11):3683-3688. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.201610311028.

[7] 刑雅,姜纪宁,丁旭元,等. 基于四通道 TEV 传感器的开关柜局部放电定位方法的研究[J]. 电子测量技术,2017,40(1):164-169. DOI:10.3969/j.issn.1002-7300.2017.01.035.

[8] 丁然,聂鹏飞,李意. 内置式特高频传感器在 GIS 设备上安装布点方案研究[J]. 高压电器,2017,53(9):78-84. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.013.

[9] 雷卫平,郭荣斌,杨志兴,等. 微波部件的微放电效应检测系统[J]. 国外电子测量技术,2017,36(12):52-56.

[10] 路俊勇,张婷,司刚全,等. GIS 悬浮电极缺陷局部放电测量与分析[J]. 高压电器,2015,51(5):151-156. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.05.028.

[11] QI Bo, LI Chengrong, GENG Bibo, *et al.* Severity diagnosis and assessment of the partial discharge provoked by high voltage electrode protrusion on GIS insulator surface[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2363-2369. DOI:10.1109/tpwrd.2011.2162753.

[12] CHUONG T T. Voltage stability investigation of grid connected wind farm[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology,2009(42):379-393.

[13] 段大鹏,王彦卿,江阳,等. SF<sub>6</sub> 气体绝缘开关设备典型绝缘缺陷的局部放电发展规律与诊断方法研究[J]. 电测与仪表,2017,54(8):114-122. DOI:10.3969/j.issn.1001-1390.2017.08.021.

[14] 田妍,张锐健,董志雯,等. GIS 局部放电缺陷定位分析[J]. 高压电器,2017,53(6):182-190. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.06.031.

[15] 王琼,车传强,王慧君,等. 悬浮缺陷模型局部放电发展过程中分解产物的特征[J]. 高压电器,2016,52(12):215-220. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.035.

[16] 舒胜文,陈金祥,陈彬,等. GIS 局部放电特高频传感器有效高度的比对测试[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):166-170. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.025.

[17] 李天辉,荣命哲,王小华,等. GIS 内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(18):5483-5493.

[18] 芦竹茂,刘庆,王天正,等. 多种带电检测方法在 GIS 局部放电诊断中的综合应用于研究[J]. 高压电器,2017,53(10):222-226. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.036.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)