

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.035

悬浮缺陷模型局部放电发展过程中分解产物的特征

王 琼, 车传强, 王慧君, 李 波

(内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘要: 悬浮放电是 GIS 的典型缺陷之一。通过对 GIS 设备局部放电的检测和分析, 可实现设备状态评估和故障诊断。文中利用脉冲电流法和分解物检测法, 研究了间断恒压法下 GIS 悬浮缺陷模型局部放电发展过程及其分解产物的特征, 并在局部放电已产生分解物的前提下, 探究了各分解气体的扩散特征。实验结果表明: 局部放电特征量不因外施电压间断而发生改变; 局部放电发展中 SF_6 气体水分体积分数呈增长趋势, 仅用 SF_6 气体微水含量偏高来推测 GIS 设备受潮存在一定局限; 若分解物检测试验中只检测到 SO_2 气体, 则 GIS 设备可能存在放电程度较严重的悬浮放电缺陷, 因此 SO_2 气体可用于判断悬浮放电发生与否; CO 气体扩散速度较快, 可作为判断设备故障严重程度的特征气体。

关键词: GIS; 悬浮缺陷模型; 局放发展过程; 间断恒压; 特征阶段; 分解产物

Decomposition Products Characteristics of Suspended Defect Model in Its Partial Discharge Revolution

WANG Qiong, CHE Chuanqiang, WANG Huijun, LI Bo

(Inner Mongolia Electric Power Science & Research Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract: Suspended discharge is one of the typical defects of GIS. Through the detection and analysis of partial discharge (PD), the state evaluation and fault diagnosis of GIS equipments can be realized. In this paper, pulse current method and decomposition detection method are used, in order to explore the characteristics of PD process and its decomposition products of GIS suspended defect model, which under discontinuous constant voltages. And after the SF_6 gas decomposition reaction during PD process, the diffusion characteristics of SO_2 , CO and H_2S gas are explored. The experimental results show that: although the applied constant voltage interrupted, the PD characteristic did not change. Along with the PD process, SF_6 gas moisture content is increasing, but there is a limit that equipment damp is inferred only by the high moisture content of the SF_6 gas in GIS. If only SO_2 gas is detected in the decomposition gas test, it is perhaps that a kind of serious suspended discharge defects may exist in GIS; CO gas diffusion rate is faster than others, so it can be used as a target gas to judge the severity failure of GIS.

Key words: GIS; suspension defect model; PD process; discontinuous constant voltage; characteristic stage; decomposition products

0 引言

局部放电是电气设备绝缘性能及其运行状态评估的有效手段^[1]。通过对局部放电发生和发展过程中伴随着的“声、光、电 和热”现象的检测和分析, 便可准确的判断设备运行状态和缺陷严重程度^[2-6]。

GIS 设备有固定或自由金属颗粒、接触不良、金属突出物和气泡等典型缺陷形式。常见检测手段有: 脉冲电流法、分解物检测法、超声波法、特高频法和光学成像法等^[5-8]。其中, 分解气体检测法因其受现场电磁干扰小、可以准确定位缺陷或故障气室等优势, 得到了广泛的关注和应用。

近年来, 国内科研机构和高校对 GIS 局部放电

收稿日期: 2016-06-22; 修回日期: 2016-07-26

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(201401039)。

Project Supported by Science and Technology Project of Inner Mongolia Power(Group) Co., Ltd.(201401039).

及其分解产物做了全面而深入的研究。研究重点多集中于电极材料、吸附剂、气体压力和微水、微氧等不同试验条件下典型缺陷模型的放电特征,阶段升压法下 GIS 典型缺陷模型局部放电严重程度的判定,及借助新特征气体或者分解气体体积分数、产气率特征进行故障诊断或者模式识别等方面^[7-10]。结合实际需求,各电网公司借助典型事故案例及现场试验研究,总结出了宝贵的运行和诊断经验,对 GIS 设备安全稳定运行起到了不容小觑的指导作用^[19-21]。

总结研究成果发现:①实验室 GIS 局部放电发展过程的升压方式一般有恒压法和阶梯升压法两种。恒压法更符合电气设备的真实运行工况,但是局放发展过程采用恒压法耗时长、局限较大,所以实验室研究多采用阶段升压的方式^[7-9]。而生产实际中,恒压运行的电气设备需根据负荷大小、设备自身或上一级厂站设备故障和检修情况配合投退或停运,加之 GIS 设备检修周期长的优点也导致一般缺陷较难发现,因此 GIS 存在带缺陷操作、停运后再投运的情况;②部分文献中使用容积较小的密闭容器,选取 GIS 实体设备或者 GIS 实体模拟装置研究局放发展过程中分解气体的产生和扩散情况则更符合设备运行情况。

因此,文中借助 GIS 模拟装置,利用脉冲电流法和分解物检测法,研究了间断恒压法下悬浮缺陷模型局部放电发展过程及 SF_6 气体纯度、水分体积分数、 SO_2 、 CO 与 H_2S 等分解产物的特征,并在前一步实验已有分解气体产生的基础上,探究了各类分解气体在静置条件下的扩散特征。即文中验证了间断恒压法在实验室研究中的实用性,总结提炼了悬浮模型局放发展过程中分解产物的特征,结论对 SF_6 气体分解物检测及其 GIS 设备状态评估具有一定指导意义。

1 实验平台和方法

1.1 实验平台

实验平台见图 1。实验利用脉冲电流法和分解物检测法对悬浮缺陷模型局部放电的发展过程进行研究。如图 1 所示,试验变气室内配置有电压互感器(PT),可为脉冲电流法提供相位参考信号;缺陷模型气室固定有 GIS 典型缺陷模型,并内置摄像头;模型气室右侧设置有充放气孔,可用于气室内 SF_6 气体品质检测。

实验前测试充气静置 24 h 后的 SF_6 气体耐压水平,模型气室压力为 0.24 MPa、恒压 180 min 局放仪未检测到放电信号,即模型气室耐压水平可以满

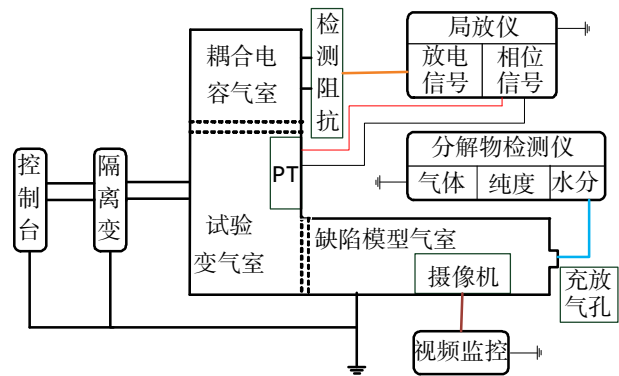


图 1 实验平台

Fig. 1 Experimental platform

足实验要求。此时,气室中 SF_6 气体纯度为 99.99%、水分体积分数 351 $\mu\text{L/L}$ 、无分解气体。

为探究 GIS 设备内部静电屏蔽体接触不良缺陷的局部放电特征,实验采用了圆柱形悬浮缺陷模型,通过缺陷模型气室外的调节螺杆调整模型下表面距母线 1 mm。实验腔内置摄像头拍摄的悬浮缺陷模型实物图见图 2。



图 2 悬浮缺陷模型

Fig. 2 Suspended defect model

1.2 实验方法

以 5 kV/min 升高外施电压值,直至局放仪采集到明显区别于背景噪声的放电量,并以该电压值为悬浮模型起始放电电压值。依据该方法,0.24 MPa 时 1 mm 间隙悬浮缺陷模型的起始放电电压为 110 kV。

实验采用间断恒压法,以 5 kV/min 步长于每日 9:00 升压至 110 kV 后,恒压 7.5 h 至 16:30 降压,静置 16.5 h 后次日重复该恒压过程。

根据实验需求气体取样检测划分为两部分。第 1 部分用于研究悬浮缺陷模型局部放发展过程与 SF_6 分解产物的关系。每日 16:30 取样检测 SF_6 气体纯度、水分和分解气体组分及其体积分数(SO_2 、 CO 和 H_2S 气体)。GIS 设备 SF_6 气体检测孔位置固定,分解气体扩散到取样口需要一定过程,所以第 2 部分注重气体扩散过程的探究;在确定有分解气体的前

提下,在未施压情况下于每日 9:00 和 16:30 对气体纯度、水分和分解气体组分及其体积分数进行检测。

2 悬浮模型局部放电发展过程

悬浮缺陷模型局部放电发展过程历时 16 日,各日电脉冲法所捕获的放电特征见表 1。根据放电波形形貌特征、放电量大小和相邻两次放电时间间隔等特征量的特点,文中将悬浮模型发展过程划分为表 1 所示的 3 个放电特征阶段,以表征放电发展过程的严重程度。

表 1 悬浮模型局放发展过程放电特征

Table 1 The characteristics of suspended defect model in its PD revolution

检测日期	放电特征			阶段
	放电量	放电频次	形貌特征	
第 1-2 日	<30 pC	偶见<30 pC 放电	单支	1
第 3-4 日	<30 pC 1 000 pC	少量<30 pC 放电、 偶见>1 000 pC 放电	单支	
第 5 日		间歇性持续放电、约 4~5 min	单支、双支、多 支交替出现	2
第 6 日		间歇性持续放电、约 5~10 min	单支、双支、多 支交替出现	
第 7 日	千 pC	间歇性持续放电、5~ 20 min 不等,最长 42 min	单支、双支及多 支交替出现,以 多支放电形式 为主	
第 8 日		间歇性持续放电未 完全变为连续放电	多支放电变为 簇状放电	
第 9-16 日	千~万 pC	连续放电	簇状放电	3

根据表 1 可知其放电规律如下:

1)放电量:悬浮模型局放发展过程初期放电量为数十 pC、最大放电量不超过 30 pC;间断恒压两日后,第 3 日出现大幅值放电,但其频次极低——7.5 h 恒压工况下仅见 2-3 次。随着放电的发展,第 5 日始放电量骤增、约为千 pC;随后的连续放电形式下,放电量高达数万 pC。

2)放电频次:放电初期放电主要以间歇性放电为主,随后放电出现短时连续状态,5 到 8 日的各次间歇性连续放电的持续时长逐渐增加,其中最大持续放电时间为 42 min;第 9 日后放电变成了连续放电。即放电发展过程存在间歇性单次放电、间歇性连续放电和完全连续放电 3 种状态。

3)形貌特性:发展过程初期放电仅存在单支放电形式;第 5 日出现间歇性连续放电后,放电依次出现了双支、多支和簇状放电形式,且该放电形式的转变存在逐步过渡过程。在单支、双支和多支放电交替

出现阶段,随着多支放电形式出现次数的增多,放电出现簇状形式,随后放电也由间歇性连续放电变成了完全连续放电。

实验采用间断恒压法,缺陷模型每日恒压 7.5 h 后降压静置 16.5 h,次日重复该过程。根据上文所述的局放发展过程各放电特征量的演化情况可知:每日重新升压至 110 kV 后,放电量并非从 30 pC 起始、逐渐增长至数千或数万 pC,而是从恒压过程开始放电量与前一日放电量水平相近;同时,第 5 到第 8 日放电频次也从 4~5 min 的间歇性短时放电开始,放电连续逐步加长直至放电完全连续;放电形貌特征也未出现往复情况,自第 9 日起电压值升至 110 kV 后,该日为连续簇状放电、未见单支或双支等放电形式。可见,独立气室中悬浮模型局放发展过程的放电严重程度并不会因为外施电压的间断发生改变,实验室研究可考虑使用间断恒压法代替长时间恒压法,以减轻长时间恒压法对时间和人力等条件的局限。

3 悬浮缺陷模型局部放电分解产物的特征

局部放电发展过程历时 16 日,每日取样一次,样气编号依次为 1-16,用于探究悬浮模型局部放电发展过程及其分解物的特征。各次样气检测结果见表 2。表 2 中“—”为样气中未检测到该类分解气体。

表 2 局放发展过程样气检测结果

Table 2 The decomposition products in PD revolution

编号	纯度/%	水分含量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	分解物体积分数/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)		
			SO ₂	CO	H ₂ S
实验前	99.99	351.06	0	0	0
阶段 1 1-4	99.98	366.70	—	—	—
	99.96	377.43	—	—	—
	99.93	401.10	—	—	—
	99.90	463.78	—	—	—
阶段 2 5-8	99.84	558.26	—	—	—
	99.86	615.21	—	—	—
	99.85	852.32	—	—	—
	99.79	771.70	—	—	—
阶段 3 9-16	99.88	759.10	—	—	—
	99.86	910.01	0.62	—	—
	99.75	803.82	1.18	—	—
	99.86	795.04	2.44	—	—
	99.85	965.93	3.69	—	—
	99.74	888.74	5.64	—	—
	99.68	938.00	7.48	—	—
	99.74	915.29	11.31	4.7	—

表 2 结果表明:

1) 表征缺陷模型气室内 SF_6 气体品质的 3 项现场常用指标中, 纯度和水分含量较分解气体更为敏感: 纯度和水分含量在实验施压 7.5 h 后已有明显变化, 且在发展过程的第 1 特征阶段, 随着施压时间的增加随之增大, 而在发展过程的第 1、2 阶段特征并未检测到气解气体。

2) 悬浮模型局部放电发展过程中, 模型气室内水分含量变化明显, 该结果说明目前现场检测中, 单纯地用 GIS 或者 SF_6 断路器的气体微水含量来推测其本体受潮存在一定的局限性。

3) 文[17]中提到: 断路器发生悬浮电位放电时, SF_6 气体分解组分中会含有 SO_2 气体。该次实验中悬浮模型局部放电分解气体的生成顺序依次为 SO_2 、 CO 和 H_2S 气体, 且 SO_2 伴随局放发展过程产气量最大、也最早被检测到—— SO_2 气体于第 10 次被检测到、体积分数为 $0.62 \mu\text{L/L}$, 恒压实验结束时 SO_2 气体体积分数为 $11.31 \mu\text{L/L}$, CO 气体于第 16 次检测到、体积分数为 $4.7 \mu\text{L/L}$, 未检测到 H_2S 气体。结合现场事故分析结果和实验室研究结论可知: GIS 本体发生悬浮放电时, SF_6 分解产物中可检测到 SO_2 气体, 且相较 CO 、 H_2S 等现场常规检测气体, SO_2 气体最先被检测到。其次, SO_2 气体于放电第 3 特征阶段被检测到, 该阶段放电量约为千~万 pC, 放电刚变为连续簇状放电; 即分解物检测试验中若只检测到 SO_2 气体, 那么 GIS 本体可能存在放电程度较为严重的悬浮放电缺陷, 因该阶段放电特征明显(表 1), 现场可借助特高频、超声波等带电检测仪的实时放电谱图特征, 辅助分析和判断[2-3]。

根据 1.2 所述的实验方法, 从第 17 日起, 实验分别于 9:00 和 16:30 对腔内气体取样分析, 则第 17 日上午、下午样气编号分别为 17、18; 该阶段共计取样 9 次, 样气编号依次为 17-25。各次样气检测结果见表 3。表 3 中, “—”为样气中未检测到该类分解气体。

表 3 静置过程中样气检测结果

检测日期	编号	纯度/%	水分含量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	分解物体积分数/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)		
				SO_2	CO	H_2S
第 17 日	17	99.77	1 132.27	12.93	5.2	—
	18	99.77	1 180.24	13.85	5.7	0.10
第 18 日	19	99.75	1 156.02	15.09	6.4	0.12
	20	99.72	1 034.20	15.71	6.5	0.25
第 19 日	21	99.72	1 179.25	16.47	6.8	0.27
	22	99.67	1 119.40	17.45	7.6	0.31
第 20 日	23	99.68	1 441.33	17.78	7.8	0.36
	24	99.68	1 256.28	18.12	7.7	0.37
第 21 日	25	99.67	1 427.29	18.55	7.8	0.45

由表 3 可知: 在外施电压降至零后, SF_6 纯度和水分含量两个较为敏感的特征量中, 纯度基本逐步趋于稳定($99.67\sim 99.68 \mu\text{L/L}$), 而水分含量仍呈现波动上涨的趋势, 可见, 水分含量是检测悬浮缺陷模型局部放电发生与否的有效特征量。

根据表 2、3 的分解物检测结果绘制 SO_2 、 CO 和 H_2S 气体体积分数变化曲线, 见图 3。按照取样时间间隔, 16、17、18 号样气的间隔时间为 16.5/24 天和 7.5/24 天。

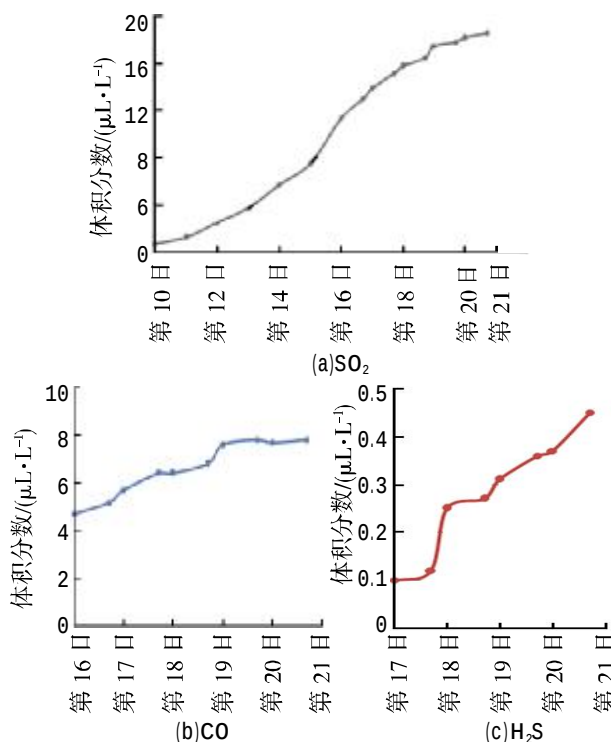


图 3 分解气体体积分数曲线

Fig. 3 The curve of decomposition products

由表 2、3 和图 3 可知: 截止到间断恒压下局部放电发展过程实验降压结束, 第 16 次 CO 气体检测体积分数为 $4.7 \mu\text{L/L}$; 第 22-25 次 CO 气体体积分数 $7.6\sim 7.8 \mu\text{L/L}$, 说明经过缓慢的扩散过程 CO 的体积分数趋于稳定, 即气室内 CO 扩散已接近均匀。而 SO_2 和 H_2S 气体变化曲线成上扬形式, 说明气体仍在逐步扩散。对比可知, CO 从产气到扩散均匀的过程最快。结合局放发展过程, CO 气体在放电发展达到一定严重程度后被检测到, 表明 CO 气体可表征悬浮模型局放过程已劣化到一定程度; 其次, 实验降压后气室内产生的分解产物总量一定, 对于取样孔固定的设备而言, 扩散过程越快的分解气体越能快速的反馈 SF_6 绝缘介质的劣化程度。因此, CO 气体是一种可以较快反应设备故障严重程度的分解气体。

4 结论

结合悬浮模型局部放电发展过程及其分解产物

的特征,实验结论为:

1)放电发展过程中,放电量、放电时间间隔和波形特征表明,独立气室中放电严重程度并不会因为外施电压的间断发生改变。

2)水分含量是检测悬浮缺陷模型局部放电发生与否的有效特征量;现场检测中仅用 SF_6 气体微水含量来推测设备本体受潮存在一定的局限性,需要结合其他检测手段进行复核。

3)GIS 设备分解物检测试验中若只检测到 SO_2 气体,则其本体可能存在放电程度较严重的悬浮放电缺陷;现场可借助特高频、超声波等带电检测手段的实时放电谱图特征辅助判断。

4) CO 气体在 SF_6 气体中扩散速度较快,现场分解物检测中可将其作为判断设备故障严重程度的特征气体。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 7354—2003 局部放电测量[S].北京:中国标准出版社,2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 7354—2003 Partial discharge measurements[S]. Beijing: China Standard Press,2004.
- [2] 国家电网公司.Q/GDW 11059.1—2013 气体绝缘金属封闭开关设备局部放电带电测试技术现场应用导则:第1部分 超声波法[S].2014.
State Grid Corporation of China(SGCC).Q/GDW11059.1—2013 Field application guide for partial discharge on-site testing technology of gas insulated switchgear Part1: Ultrasonic[S].2014.
- [3] 国家电网公司.Q/GDW 11059.2—2013 气体绝缘金属封闭开关设备局部放电带电测试技术现场应用导则:第2部分 特高频法[S].2014.
State Grid Corporation of China(SGCC). Q/GDW11059.2—2013 Field application guide for partial discharge on-site testing technology of gas insulated switchgear Part 2:Ultra high frequency[S].2014.
- [4] 国家能源局.DL/T 1359—2014 六氟化硫电气设备故障气体分析和判断方法[S].北京:中国电力出版社,2015.
National Energy Administration. DL/T 1359—2014 The method for analysis and judgment of SF_6 mal-function gas in electrical equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press,2015.
- [5] 颜湘莲,王承玉,宋 昊,等.气体绝缘开关设备中 SF_6 气体分解产物检测与设备故障诊断的研究进展[J]. 高压电器,2013,49(6):1-9.
YAN Xianglian,WANG Chengyu,SONG Gao,et al. Recent progress in detection of SF_6 decomposition products and fault diagnosis for gas insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(6): 1-9.
- [6] 汲胜昌,钟理鹏,刘 凯,等. SF_6 放电分解组分分析及其应用的研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2318-2332.
JI Shengchang,ZHONG Lipeng,LIU Kai,et al. Research status and development of SF_6 decomposition components analysis under discharge and its application[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(9): 2318-2332.
- [7] 齐 波,李成榕,耿弼博,等.GIS 设备绝缘子高压电极故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]. 高电压技术,2011,37(7):1719-1727.
QI Bo,LI Chengrong,GENG Bibo,et al. Severity diagnosis and assessment of the partial discharge provoked by high-voltage electrode defect on GIS insulator surface[J]. High Voltage Engineering,2011,37(7): 1719-1727.
- [8] 齐 波,李成榕,郝 震,等.GIS 绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):101-108.
QI Bo,LI Chengrong,HAO Zhen,et al. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):101-108.
- [9] 唐 炬,任晓龙,谭志红,等.针—板缺陷模型下局部放电量与 SF_6 分解组分的关联特性[J]. 高电压技术,2012,38(3):527-5349.
TANG Ju,REN Xiaolong,TAN Zhihong,et al. Correlation character between partial discharge quantity and SF_6 decomposition components under needle-plate defect model [J]. High Voltage Engineering,2012,38(3):527-5349.
- [10] WANG Yuanyuan,JI Shengchang,LI Jinyu,et al.investigations on discharge and decomposition characteristics of SF_6 under various experimental conditions[J]. High Voltage Engineering,2013,39(8):1952-1959.
- [11] 龚尚昆,陈绍艺,周 舟,等.局部放电中的 SF_6 分解产物及其影响因素研究[J]. 高压电器,2011,47(8):48-52.
GONG Shangkun,CHEN Shaoyi,ZHOU Zhou,et al. Study on SF_6 decomposition products of partial discharge and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(8): 48-52.
- [12] 唐 炬,梁 鑫,姚 强,等.微水微氧对 PD 下 SF_6 分解特征组分比值的影响规律[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):78-84.
TANG Ju,LIANG Xin,YAO Qiang,et al. Influence of Oxygen and moisture on feature concentration ratios of SF_6 decomposition products under partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31): 78-84.
- [13] 唐 炬,胡 瑶,姚 强,等.不同气压下 SF_6 的局部放电分解特性[J]. 高电压技术,2014,40(8):2257-2263.

- TANG Ju, HU Yao, YAO Qiang, et al. Decomposition characteristics of SF_6 under partial discharge at different gas pressures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2257-2263.
- [14] 唐 炬, 曾福平, 孙慧娟, 等. 电极材料对 SF_6 局放分解特征组分生成的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 100-105.
- TANG Ju, ZENG Fuping, SUN Huijuan, et al. Influences of electrode materials on SF_6 decomposition characteristics under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 100-105.
- [15] 唐 炬, 陈长杰, 刘 帆, 等. 局部放电下 SF_6 分解组分检测与绝缘缺陷编码识别[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 110-116.
- TANG Ju, CHEN Changjie, LIU Fan, et al. Detection of constituents from SF_6 decomposition under partial discharge and recognition of insulation defect coding[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 110-116.
- [16] 周永言, 乔胜亚, 李 丽, 等. GIS 中 S_2OF_{10} 作为局部放电特征气体的有效性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 871-878.
- ZHOU Yongyan, QIAO Shengya, LI Li, et al. Validity analysis of S_2OF_{10} as a target gas of partial discharge in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 871-878.
- [17] 周文俊, 乔胜亚, 李 丽, 等. GIS 中盆式绝缘子沿面放电的新特征气体 CS_2 [J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 848-856.
- ZHOU Wenjun, QIAO Shengya, LI Li, et al. Creeping discharge monitoring of epoxy spacers in GIS using a new target gas CS_2 [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 848-856.
- [18] 唐 炬, 王 悠, 孙慧娟, 等. H_2O 对局部放电下 SF_6 分解生成特征组分的影响[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 787-794.
- TANG Ju, WANG You, SUN Huijuan, et al. Influence of moisture on SF_6 decomposition characteristics induced by partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 50(3): 787-794.
- [19] 杨 韧, 吴水锋, 薛 军, 等. SF_6 断路器内部悬浮电位放电产生的分解产物分析[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 17-21.
- YANG Ren, WU Shuifeng, XUE Jun, et al. Analysis of decomposition products due to floating potential discharge in SF_6 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 17-21.
- [20] 杨彦博, 董 明, 陈晓清, 等. GIS 中 SF_6 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 SF_6 decomposition mechanism and maintenance strategies of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 18-23.
- [21] 刘 欢, 邓 科, 付汉江, 等. SF_6 气体分解物与 GIS 设备运行状态关系的探讨[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 127-132.
- LIU Huan, DENG Ke, FU Hanjiang, et al. Investigation on the relationship between SF_6 gas decomposition and GIS equipment operating status[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 127-132.
- 王 琼(1986—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断方面工作。
- 车传强(1976—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事高压电气试验、电气设备在线监测与故障诊断方面工作。