

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.020

工频恒定电压下 SF₆ 气体中沿面放电发展过程研究

杨玥坪, 何聪, 李军浩

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 气体绝缘组合电器(GIS)中绝缘缺陷的存在会造成局部放电, 导致设备劣化, 进而危害到电力系统的稳定性。其中危害较严重的为绝缘子沿面放电缺陷, 为探究其在工频恒定电压作用下的放电发展过程及规律, 文中制作了“三结合”模型模拟 SF₆ 中沿面放电缺陷并展开试验。保持工频电压在模型闪络电压的 95% 不变, 每隔 5 min 记录一次局部放电信号, 直至模型频繁发生闪络, 分析各阶段放电统计参量的变化。结果表明沿面模型在闪络前的放电呈现放电重复率增加、放电量增加、放电间歇、放电再次增强的发展过程。放电间歇的产生与 SF₆ 的强电负性、电场均匀化等均有一定关系。因此, 需通过长时间放电检测以准确判定设备劣化阶段, 并采取相应措施。

关键词: 气体绝缘组合电器; 沿面放电缺陷; 放电发展过程; 工频恒定电压; “三结合”模型

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)01-0145-06

0 引言

SF₆ 气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是指将除了变压器之外的其他电器设备组装在一个密封的接地金属外壳内, 并充以一定气压的 SF₆ 气体作为绝缘介质^[1-3]。这种紧凑封闭的结构使 GIS 设备占地面积较小, 而且基本不受外界大气影响。从上世纪 60 年代起, GIS 在电力工程中的应用日益广泛^[4-6]。局部放电(partial discharge, PD)是 GIS 内部绝缘缺陷或损坏的外在表现, 如果 PD 得不到及时有效的处理, 会导致设备内部绝缘逐渐劣化, 甚至进一步引发电力故障, 通过检测 PD 来评估 GIS 绝缘状况具有重要意义^[7-10]。目前, 在现场主要通过特高频检测法、超声波检测法来获取 GIS 内部 PD 信息, 而在实验室主要通过脉冲电流法进行测量^[11-17]。

由于电力设备绝大部分时间工作于工频电压下, 因此考察工频电压下 GIS 的 PD 发展特征显得尤为重要。目前大多数研究采用阶梯升压法测量工频电压下的 GIS 绝缘劣化以使得实验现象更加明显, 从而更快得出结论, 而这并不符合实际中设备工作电压较稳定的情况^[18-19]。因此, 在工频恒定电压下检测 GIS 缺陷的放电发展及绝缘劣化规律具有更加重要的意义。目前常见的各种 GIS 设备缺陷中, GIS 内部盆式绝缘子发生沿面闪络的放电一般最为剧烈, 对设备危害程度较大。GIS 的运行经验和理论分析也表明, 沿支撑绝缘子表面闪络是 GIS 中常见的事故。对于 GIS 绝缘子不同类型电压波形

下沿面放电的机理和特性亦有很多研究^[20-25], 但尚缺乏针对 GIS 绝缘子沿面缺陷在工频恒定电压下放电过程及发展规律的总结性概括。

针对上述研究情况, 文中首先建立了模拟 GIS 沿面放电缺陷的实物模型, 并使用脉冲电流法监测模型在工频恒定电压作用下的放电发展过程, 对其规律进行了分析和总结。

1 试验平台及方法

1.1 试验回路

如图 1 所示, 试验电路包括工频高电压装置、试验模型和 PD 测量装置。工频高电压装置包括调压器、100 kV/50 kV·A 工频试验变压器、5 kΩ 保护电阻及 500 pF 电容分压器。试品模型为沿面缺陷模型, PD 测量装置包括高频电流传感器(high frequency current transformer, HFCT)和高分辨率数字示波器, HFCT 带宽为 0.8~102 MHz, 示波器最高采样率为 40 GS/s, 带宽为 1 GHz。用同轴电缆从电流传感器和电容分压器低压臂, 向示波器分别导入 PD 信号和工频电压参考波形, 便于测量与比较相位信息。

1.2 试验模型及试验方法

绝缘子表面放电的根本原因是绝缘子、高压导杆和 SF₆ 气体交界处存在的三结合点, 该处场强非常集中, 易导致 PD, 甚至沿面闪络。目前国内外都采用“三结合”模型模拟沿固体介质的表面放电^[26-27]。试验所制“三结合”模型如图 2 所示。高压电极尖端曲率半径 R 为 3.5 mm, 绝缘介质材料选用环氧板, 高 h 为 2 mm, 环氧介质与地电极的直径 D 为 38 mm, 整个模型处于 0.5 MPa 的 SF₆ 气体中。

收稿日期: 2019-08-09; 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877169)

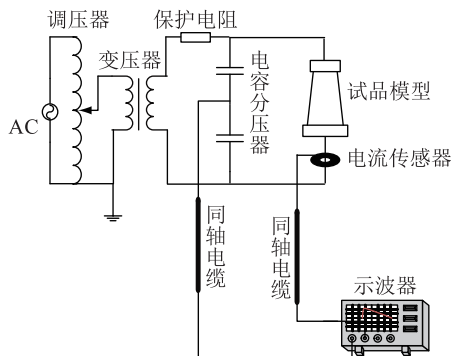


图1 试验电路

Fig.1 Circuit diagram of experimental apparatus

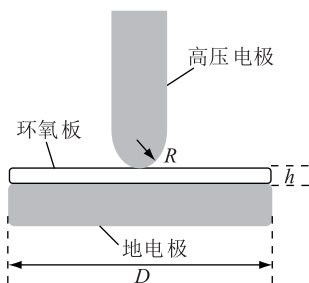


图2 沿面放电缺陷示意

Fig.2 Model diagram of surface discharge defects

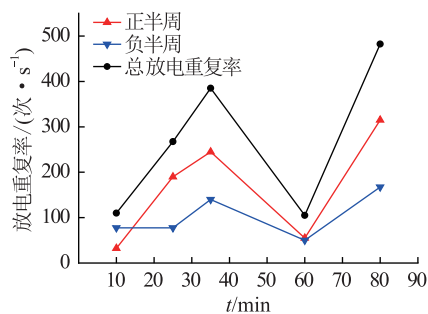
试验前同时制备多个相同的上述模型,首先对局部放电量标定,并测定沿面模型的闪络电压 U_b ; 长时间保持外施工频电压 U 恒定,进行试验。从电压作用开始,每 5 min 记录 4 组 PD 数据,直至模型发生频繁闪络。取外施电压值分别为 $80\%U_b$, $85\%U_b$, $90\%U_b$, $95\%U_b$, 每个电压值下分别更换模型重复进行 5 次试验,观察每次模型发生闪络的时间长短,最终根据发生闪络的时间以及劣化阶段性现象特征,选取有代表性的试验数据进行分析^[12]。

经过试验测定,标定的结果为 2.5 pC/mV ,模型的沿面闪络电压 U_b 为 24 kV ,当外施工频恒定电压值 $U=95\%U_b=22.8 \text{ kV}$ 时,模型的劣化特征较为明显,劣化时间约为 100 min 。

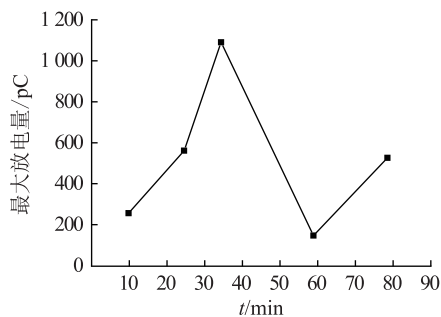
2 试验结果

根据采集到的时域波形,将沿面缺陷劣化过程的放电分为 6 个阶段(包含沿面闪络)。闪络前的 5 个阶段放电统计参量(放电重复率、最大放电量、平均放电量)的变化如图 3 所示,各阶段典型时域波形如图 4 所示。

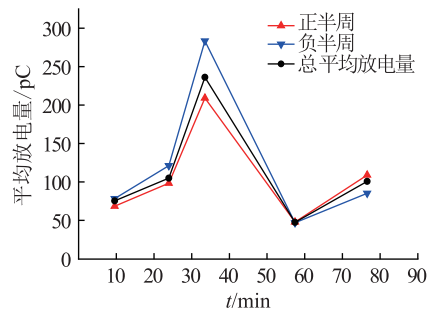
第一阶段:加压 10 min 时,模型放电较弱,负极性放电较多。第二阶段: 25 min 时,正极性放电明显增多并超过负极性,正负极性放电幅值明显增加,水平相当。第三阶段: 35 min 时,正负极性放电重复率和幅值同时显著增加,放电幅值基本相当。



(a) 每秒放电重复率



(b) 最大放电量



(c) 平均放电量

图3 沿面模型闪络前 5 个阶段放电统计参量

Fig.3 Statistical discharge parameters of the five stages before the flashover of the surface model

第四阶段: 60 min 时,放电短暂减弱呈现间歇特性,幅值和重复率陡然降低至与第一阶段相近的水平,负极性放电幅值稍大。第五阶段: 80 min 时,正负极性的放电幅值和重复率再次显著增大,与第三阶段相比,其放电重复率更高,放电幅值略有不及。第六阶段: 95 min 左右时,放电异常剧烈,示波器上可以观测到幅值极大的放电 ($>2 \text{ V}$),同时在模型上能看到明亮的沿面闪络通道,放电发展过程结束。总体而言,试验中沿面模型放电遵循放电重复率增加、放电量增加、放电间歇、放电再次增强而后闪络的发展过程。

为直观分析放电相位分布随各阶段的变化,绘制出 6 个阶段对应的相位统计谱图 (phase resolved partial discharge, PRPD),如图 5 所示。由图 5 可以看出,前三阶段,伴随如图 4 所示的放电持续增强,正负半周放电相位也逐步从一三象限扩展至交流电压峰值处以及二四象限,大幅值放电尤其明显;

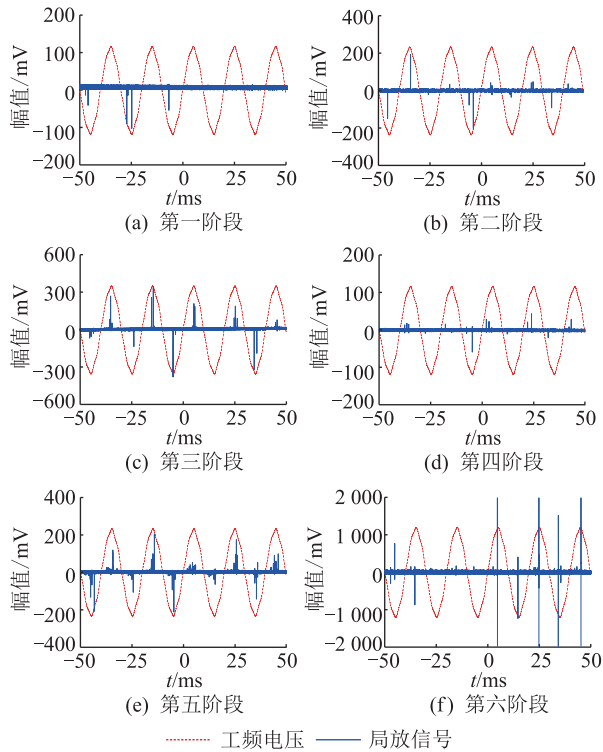


图4 沿面模型放电6个阶段典型时域波形

Fig. 4 Typical time domain waveforms of six discharge stages of surface model

而当第四阶段放电突然变弱时,放电相位又重新回到以一三象限为主。第五阶段,放电再次增强,放电相位范围再次变宽,大幅值放电集中于二四象限。

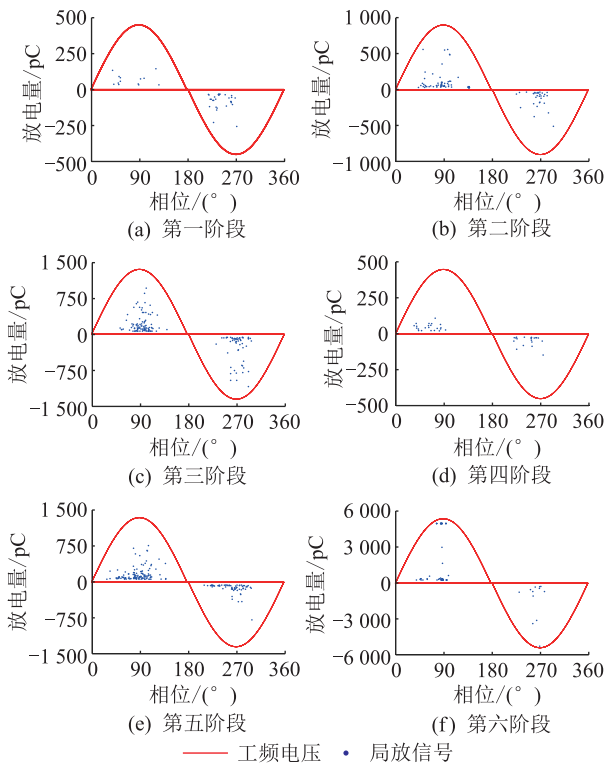


图5 沿面模型放电6个阶段典型 PRPD 谱图

Fig.5 Typical PRPD patterns of six discharge stages of surface model

因此,放电严重程度和相位分布有如下关系:放电较弱时,放电相位值和相位跨度较小,以一三象限分布为主;放电变强时,放电相位逐渐向交流电压峰值和二四象限扩张,对于较大幅值放电,此现象尤为明显。

3 分析与讨论

上述结果表明,沿面缺陷的放电在工频恒定电压的作用下先有所增大,而后迅速降低至初始水平,形成放电间歇,随后又迅速增大,剧烈放电并导致沿面闪络。沿面模型放电发展过程如图6所示,其中实线框示意各阶段各粒子的最终位置,虚线框示意粒子途径的轨迹。

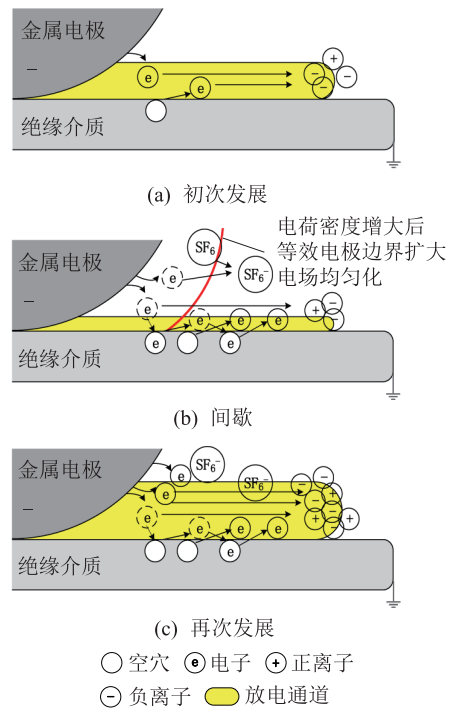


图6 沿面模型放电发展过程微观示意

Fig.6 Microscopic schematic diagram for the development process of the discharge of the surface model

瞬时电压为正极性时,放电初始电子主要来源为绝缘介质的表面电离,而负极性时还来源于高压金属电极的表面发射。电压施加初期(第一至第三阶段),如图6(a)所示(以负极性为例,以放电通道宽度代表放电强弱),随着电压作用时间增加,模型高压电极附近电荷积聚增多,导致放电逐渐强烈,PD通道随放电的增大、增多逐渐扩张和升温,致使前三阶段放电程度逐步增大。

放电达到第三阶段时,电极附近产生的电荷已足够多,电荷密度增大会导致:(1) 电荷浓度增大,电子与绝缘介质表面电离空穴的复合增多;(2) 电

荷碰撞增多,强电负性气体 SF₆更易捕捉和吸附电子;(3) 电极周围电荷密度达到饱和,继续增大的可能性较小^[28];(4) 产生的大量电荷相当于扩大了电极表面,均匀化了因加压导致畸变的电场。如图 6(b)所示,上述过程共同作用,致使此时的电场和电荷情况与未加电压时较为类似,因此第四阶段放电减弱,并接近第一阶段的水平。

随着放电减弱,电荷密度逐渐下降,之前的放电通道逐渐缩小。经过第四阶段的短暂间歇后,类似于第一阶段,电荷重新积聚。但与第一阶段的状态不同的是:(1) 放电通道虽小但仍然存在,再次发展较容易;(2) 电极周围的 SF₆气体已基本吸附负离子达到饱和,其阻止放电发生的能力较弱;(3) 长时放电导致此时绝缘介质表面劣化程度已较严重,绝缘能力大大减弱。因此,即便放电的增加仍会导致电荷复合的增多及电场的均匀化,但放电通道仍会快速增长,如图 6(c)所示,并最终导致沿面闪络。

文中试验所制沿面缺陷模型的高压电极为半球形电极,与高压导体尖刺缺陷相比,电场不均匀度较低,同时由于外施电压值没有变化,无法为放电提供更大的电压动力,放电不易持续稳定发展,这亦是放电间歇出现的可能原因^[22]。

该结果说明,沿面缺陷在工频恒定电压下的放电大体上呈逐步增强的趋势,但期间并非持续增强,放电较弱时有可能是处于文中所述的间歇阶段。试验中,第一阶段和第四阶段的放电情况基本相同,但其后一阶段的放电具有很大的差别。实际运行中电压稍低,各阶段持续时间更长,因此检测到设备 PD 水平较低时,并不绝对代表其劣化水平不严重,需要看此前是否发生过较为剧烈的放电,若有则意味着放电已发展到一定阶段并正处于间歇,此时要加强监测。

4 结论

经过上述分析,总结出沿面模型放电发展规律如下:

(1) 总体而言,试验中沿面模型放电呈现放电重复率增加、放电量增加、放电间歇、放电再次增强的发展过程,最后发生闪络。

(2) 放电较弱时,放电相位值和相位跨度较小,以一三象限分布为主;放电变强时,放电相位逐渐向交流电压峰值和二四象限扩张,对于较大幅值放电,此现象尤为明显。

(3) 放电存在一次间歇性减弱的原因,与强电负性 SF₆气体容易吸附电子、电荷密度增大导致电

场均匀化以及电子与空穴复合增多、外施交流电压值在此过程保持恒定不变、沿面缺陷“三结合”模型电极附近不均匀程度较其余缺陷稍低均有一定关系,从而使得放电不易持续性增强。

(4) 随电压持续时间的增长,放电总体呈现增强的趋势,因此检测 PD 程度及其统计量的大小,对于判断在恒定工频电压下长时间运行的 GIS 设备的绝缘劣化状态具有一定的参考作用,但同时又不能单以检测时得到的结果作为判断的唯一指标,还需要结合以往的长时 PD 在线监测数据,更加准确地评判放电所处的阶段和劣化情况,有针对性地采取相应措施。

参考文献:

- [1] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and diagnosis for power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.
- [3] BOLIN P, KOCH H. Introduction and applications of gas insulated substation (GIS) [J]. Power Engineering Society General Meeting, 2005, 12(7): 920-926.
- [4] 张乔根,文韬,赵军平,等. 大容量 GIS 现场冲击试验问题探讨[J]. 广东电力, 2018, 31(8): 37-43.
ZHANG Qiaogen, WEN Tao, ZHAO Junping, et al. Discussion on problems of on-site impulse test for GIS with large capacity [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 37-43.
- [5] 陈侯,张子谦,张艳燕. 基于三维 GIS 的变电站辅助决策平台设计与研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(2): 46-51.
CHEN Yu, ZHANG Ziqian, ZHANG Yanyan. Design and research of substation auxiliary decision platform based on 3D GIS [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(2): 46-51.
- [6] 王继业,朱欣焰,赵光,等. 基于深度神经网络和 GIS 数据的最优停电模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 58-63.
WANG Jiye, ZHU Xinyan, ZHAO Guang, et al. Research on optimal outage model based on deep artificial neural network and GIS data [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 58-63.
- [7] 李军浩,司文荣,姚秀,等. 油纸绝缘内部气隙缺陷电劣化过程中局部放电的测量与模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 128-134.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Measurement and simulation of partial discharge in disc-void of oil-pressboard insulation with electrical degradation progress [J]. Proceedings of

- the CSEE, 2009, 29(31):128-134.
- [8] 王先培,肖伟,胡明宇,等. 基于 SF₆分解产物融合判断的 GIS 绝缘劣化趋势划分[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1834-1840.
WANG Xianpei, XIAO Wei, HU Mingyu, et al. GIS insulation deterioration trend division based on SF₆ decomposition products fusion judgment[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(6): 1834-1840.
- [9] KIM J B, KIM M S, PARK K S, et al. Development of monitoring and diagnostic system for SF₆ gas insulated switchgear [C]//Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316). Boston, MA, USA:2002.
- [10] 施景奎,宋云翔,杨景刚,等. 一起 252 kV 组合电器局放异常信号分析处理[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6):127-131.
SHI Jinglei, SONG Yunxiang, YANG Jinggang, et al. Analysis and treatment of partial discharge abnormal signal in 252 kV GIS equipment [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):127-131.
- [11] CHOU Chinju, CHEN Chienhsun. Measurement and analysis of partial discharge of high and medium voltage power equipment [C]//2018 7th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE), Taipei:2018.
- [12] 李智敏,张文元,冯允平. GIS 局部放电的检测方法[J]. 高压电器, 1997, 33(3):43-46.
LI Zhimin, ZHANG Wenyuan, FENG Yunping. Detection method of GIS partial discharge [J]. High Voltage Apparatus, 1997, 33(3):43-46.
- [13] 巴文祥. 电气设备局部放电检测与波形分析[J]. 电池工业, 2017, 21(5):22-24.
BA Wenxing. Partial discharge detection and waveform analysis of electrical equipment[J]. Chinese Battery Industry, 2017, 21(5):22-24.
- [14] 王国利,高超,杨芸,等. GIS 绝缘缺陷局部放电检测的有效性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11):62-72.
WANG Guoli, GAO Chao, YANG Yun, et al. Partial discharge detection effectiveness of typical insulation defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11):62-72.
- [15] 张薇. GIS 设备局部放电检测技术的试验研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012:1-39.
ZHANG Wei. The experimental study of partial discharge detection technology in GIS equipments [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012:1-39.
- [16] 李玉杰,李洪涛,宋思齐,等. 基于红外的 GIS 内部导体温度检测技术研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2):142-146.
LI Yujie, LI Hongtao, SONG Siqi, et al. Temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 142-146.
- [17] 韩旭涛,张亮,张芊,等. 基于特高频法的雷电冲击电压下实体 GIS 导杆尖刺缺陷局部放电检测和分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(1):45-50.
HAN Xutao, ZHANG Liang, ZHANG Qian, et al. Detection and analysis of partial discharge excited by protrusion defect in gis under oscillating lightning impulse voltage based on UHF method[J]. Smart Power, 2018, 46(1):45-50.
- [18] 金虎. 基于多参量的 GIS 局部放电发展过程研究及严重程度评估[D]. 北京:华北电力大学, 2015:1-40.
JIN Hu. GIS partial discharge development process research and its severity evaluation based on the multiple parameters [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 1-40.
- [19] 刁常晋,程养春,邓春,等. 阶梯升压试验和恒定电压试验中油纸绝缘局部放电发展规律的对比[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):365-373.
DIAO Changjin, CHENG Yangchun, DENG Chun, et al. Contrast of the developing regularity of partial discharge of oil-paper insulation using step-stress test and constant-stress test [J]. High Voltage Technology, 2013, 39(2):365-373.
- [20] 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, 12(6):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, 12(6):101-108.
- [21] 王琦,汪泓,邱毓昌. 表面电荷积聚对冲击电压下绝缘子沿面放电的影响[J]. 电力设备, 2004, 5(7):19-22.
WANG Qi, WANG Feng, QIU Yuchang. Effect of surface charge accumulation on creeping discharge of insulator under impulse voltage[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(7):19-22.
- [22] 王红梅,丁登伟,贾志杰,等. 恒压下 GIS 盆式绝缘子表面缺陷的长间歇性放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20):6188-6194.
WANG Hongmei, DING Dengwei, JIA Zhijie. Research on intermittent discharge characteristics of defects on the surface of disc-insulators of gis under long-time constant voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20):6188-6194.
- [23] 孙秋芹,罗宸江,汪泓,等. 特高压 GIS 盆式绝缘子沿面闪络特性研究综述[J]. 高压电器, 2018, 54(5):17-25, 32.
SUN Qiuqin, LUO Chenjiang, WANG Feng, et al. Overview on the surface flashover of basin-type insulator in UHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):17-25, 32.
- [24] 牛勃,丁培,马飞越,等. 粒子群优化算法在电气设备特高频局部放电源定位中的应用[J]. 智慧电力, 2018, 46(9):95-102.
NIU Bo, DING Pei, MA Feiyue, et al. Application of particle swarm optimization algorithm in electrical equipment UHF PD source positioning[J]. Smart Power, 2018, 46(9):95-102.
- [25] 王增彬,陈义龙,孙帅,等. 基于特征光谱的 GIS 尖端放电特性研究[J]. 广东电力, 2019, 32(4):112-118.
WANG Zengbin, CHEN Yilong, SUN Shuai, et al. Study on GIS tip discharge characteristics based on characteristic spectrum [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4):112-118.

- [26] 孙大陆,汲胜昌,何丹东. 带电检测缺陷模拟装置中沿面放电缺陷的设计[J]. 华电技术,2016,38(7):4-7,76.
SUN Dalu, JI Shengchang, HE Dandong. Design of fault discharge along surface in live detection faultiness simulation device[J]. Huadian Technology, 2016, 38(7): 4-7, 76.
- [27] 贾志杰. SF₆沿面绝缘的工程计算[J]. 高压电器, 2011, 47(10):48-52.
JIA Zhijie. Engineering calculation of surface insulation in SF₆ gas[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 48-52.
- [28] 耿弼博. 220 kV GIS 盆式绝缘子表面电荷累积与消散特性的研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
GENG Bibo. Study of charge accumulation and dissipation on-

cone-type spacer for 220 kV GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

作者简介:



杨玥坪

杨玥坪(1997),男,硕士在读,研究方向为电气设备局部放电检测技术(E-mail:y792906-351@stu.xjtu.edu.cn);

何聪(1990),男,博士在读,研究方向为电气设备局部放电检测技术;

李军浩(1980),男,博士,副教授,研究方向为电力设备在线监测技术、障诊断与绝缘故障状态评估技术以及新型试验技术等。

Development process of surface discharge in the SF₆ gas under constant voltage of power frequency

YANG Yueping, HE Cong, LI Junhao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the gas insulated switchgear (GIS), the existence of insulation defects will cause partial discharge, which results in degradation of the equipment and endangers the stability of the power system. The defect of surface discharge along the insulator is relatively severe among all kinds of insulation defects. In order to study the discharge development process and regularity of this kind of defect under constant power frequency voltage, this paper sets up a "triple-combination" model to simulate the surface discharge in SF₆. With the power frequency voltage kept unchanged at 95% of the flashover voltage, a set of partial discharge signal is recorded every 5 minutes until the flashover occurs frequently, and the statistical parameters of each stage is calculated. The results show that before flashover, the discharge development process of the surface model follows the sequence of the increase of discharge repetition rate, the increase of the discharge quantity, the intermittence of discharge and the rising of discharge again, and at last the flashover happens. The occurrence of discharge intermittence may have relationship with the strong electronegativity of SF₆, the uniformity of the electric field and so on. Therefore, long-term discharge detection is required to accurately determine the stage of equipment degradation, and measures should be taken accordingly.

Keywords: gas insulated switchgear; surface discharge defects; development process of discharge; constant voltage of the power frequency; "triple-combination" model

(编辑 方晶)