

GIS 盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述

韩 帅¹, 高 飞¹, 廖思卓¹, 郭 瑞², 王 健², 李庆民²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘 要:盆式绝缘子作为气体绝缘组合电器(GIS)最薄弱的绝缘环节,其表面缺陷是提高GIS设备绝缘强度研究中的关键问题。本文首先介绍了气泡缺陷、异物缺陷、表面脏污以及裂纹缺陷等盆式绝缘子常见表面缺陷的产生和发展机理;其次分析总结了盆式绝缘子表面缺陷诱发闪络的发生机制,明确了盆式绝缘子表面电场分布及表面电荷积聚是影响绝缘子沿面闪络的重要因素;此外,归纳了现有盆式绝缘子表面缺陷诊断方法的利弊;最后,鉴于工频电压激励下盆式绝缘子表面缺陷局部放电检测方法的不足,从激励局部放电的电压模式入手,研究并总结了不同电压激励下盆式绝缘子表面缺陷局部放电检测方法的现状。

关键词:盆式绝缘子;表面缺陷;闪络;局部放电;诊断方法

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)02-0012-11

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.02.002

Review on Surface Defects and Diagnosis Methods of Basin-type Insulator in GIS

HAN Shuai¹, GAO Fei¹, LIAO Sizhuo¹, GUO Rui², WANG Jian², LI Qingmin²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As the weakest insulation link of gas insulated substation (GIS), the surface defects of basin-type insulator are the key problems in the research of improving the insulation strength of GIS. This paper firstly introduced the generation and development mechanism of common surface defects of basin-type insulator, such as bubble defects, impurity defects, dirty surface, and crack defects. Secondly, the mechanism of flashover induced by surface defects of basin-type insulator was analyzed and summarized, it is explicit that the surface electric field distribution and surface charge accumulation of basin-type insulator are the important factors affecting the flashover of insulator; In addition, the advantages and disadvantages of the existing diagnosis methods of basin-type insulator surface defects were summarized. Finally, In view of the shortcomings of partial discharge detection methods for basin-type insulator surface defects under power frequency voltage excitation, starting with the voltage mode of partial discharge excitation, the current situation of partial discharge detection methods for basin-type insulator surface defects under different voltage excitation was studied and summarized.

Key words: basin-type insulator; surface defects; flashover; partial discharge; diagnosis methods

0 引言

气体绝缘组合电器(GIS)因其占地面积小、绝缘性能好、可靠性高、配置灵活、检修周期长、维护

工作量小等优点,被广泛应用于各种电压等级的电力系统中^[1-3]。随着电网电压等级和系统容量的不断增加,GIS对于保障电力系统的安全与稳定起着举足轻重的作用,对整个电网的稳定运行有着不可或缺的影响。然而,GIS结构复杂,内部不易观察,其生产运行过程中任何环节都有可能造成GIS绝缘缺陷,引发绝缘故障,给电网、社会、国家造成重大

收稿日期:2021-03-12 修回日期:2021-04-22

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5200-201955095A-0-0-00)

作者简介:韩帅(1986-),男(汉族),山东济南人,高级工程师,主要从事变电设备状态监测和故障诊断方面的研究。

损失。因此,必须对 GIS 诱发的绝缘故障予以高度重视。

GIS 的故障原因如图 1 所示。由图 1 可知,盆式绝缘子引起的 GIS 故障占比高达 11%,在所有故障原因中排名第 4 位^[4-6]。此外,盆式绝缘子安装在 GIS 内部,一旦发生故障,难以快速对其进行维修和更换,对变电站危害巨大。因此,揭示盆式绝缘子表面缺陷的产生和发展机理,进一步研究不同缺陷诱发盆式绝缘子闪络的发生机制对 GIS 的安全可靠运行至关重要。

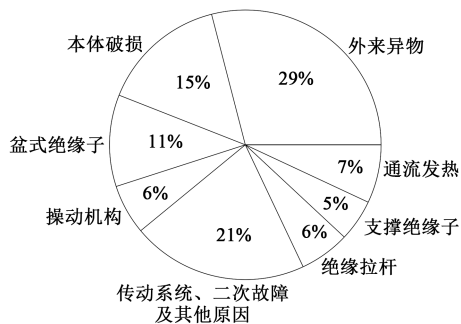


图 1 GIS 故障分布图

Fig.1 GIS fault distribution diagram

盆式绝缘子表面缺陷种类繁多,产生和发展机理复杂,涉及电、热、力等多场耦合^[7-10]。盆式绝缘子表面缺陷类型如表 1 所示。

表 1 盆式绝缘子表面缺陷类型

Tab.1 Type of surface defect of basin-type insulator

序号	缺陷类型
1	绝缘子环氧树脂中存在气泡或杂质
2	绝缘子表面出现裂缝
3	绝缘子表面脏污,存在粉尘和杂质
4	绝缘子与电极接触不良且存在气隙
5	绝缘子表面粗糙,存在毛刺或凸起等
6	绝缘子表面残留金属微粒

由表 1 可知,盆式绝缘子表面缺陷主要包括两个方面:①盆式绝缘子在材料固化过程中由于残余应力以及脱模产生的界面状态等所造成的盆式绝缘子自身缺陷;②盆式绝缘子在长期运行过程中由于材料老化、运行应力振动、气体分解物以及外部金属微粒影响等所导致的盆式绝缘子运行缺陷。盆式绝缘子表面缺陷对其电气性能、热性能以及力

学性能有很大的影响,且热性能、力学性能的下降又进一步加剧电气性能的劣化。因此,有必要提高盆式绝缘子表面缺陷的检出和识别效率,防止 GIS 设备的损坏以及重大事故的发生。

通常,盆式绝缘子表面缺陷在 GIS 运行过程中会引发局部放电。局部放电信号包含丰富的设备绝缘状态信息,通过对设备局部放电检测可以有效地发现潜伏性绝缘故障^[11]。近年来,国内外学者对不同工况下环氧绝缘表面绝缘特性进行了大量的理论分析与试验研究,取得了丰硕的研究成果。然而,当前采用的局部放电检测手段均有一定的局限性,尤其是:①缺乏对在实际运行工况下的盆式绝缘子表面亚毫米/毫米级微金属颗粒局部放电量的认识;②现有检测装置仅针对具有良好重复性的放电行为,导致对间歇性放电的忽视和漏判,最终造成盆式绝缘子的突发性击穿和闪络;③现有局部放电在线检测设备抗电磁干扰能力不足,无法满足工程现场的需要,致使现有局部放电在线检测装置出现大量的误报、漏报。

在此背景下,本文综述了近年来国内外有关盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法的主要研究成果。首先,总结盆式绝缘子自身缺陷和运行缺陷的产生和发展机理;其次,从早期研究基础和目前研究现状,分析不同盆式绝缘子表面缺陷诱发闪络的发生机制;最后,通过对目前盆式绝缘子表面缺陷诊断方法的梳理,指出当前盆式绝缘子表面缺陷的检测现状,并对未来的研究工作提出相关建议。

1 盆式绝缘子表面缺陷的产生和发展机理

盆式绝缘子表面缺陷是影响 GIS 绝缘性能的重要因素,而盆式绝缘子常常会出现气泡、异物、脏污以及裂纹缺陷。因而探究气泡、异物、脏污以及裂纹等缺陷的产生和发展机理是研究盆式绝缘子表面缺陷的重要内容。

1.1 气泡缺陷

盆式绝缘子气泡缺陷主要是盆式绝缘子在生产过程中由于生产操作不规范、工艺流程不完善,导致盆式绝缘子在浇注过程中混入微量气体,造成盆式绝缘子的气泡缺陷。再者,由于环氧树脂在固化过程中的收缩以及环氧树脂与金属电极热膨胀系数不同而产生空隙和层离^[12-14]。然而,环氧树脂介电常数大于空气介电常数,因此气泡附近会承担较高的电压,产生电场畸变,造成局部放电,严重时

会导致盆式绝缘子断裂^[15]。

张施令等^[16]指出,盆式绝缘子存在气泡缺陷时,其最大场强畸变系数如式(1)所示。周云峰等^[17]对盆式绝缘子气泡放电特性进行研究,搭建如图2所示实验平台。通过对其进行实验研究发现,盆式绝缘子内部气泡放电的PRPD谱图呈现双峰模式,幅值约为2 mV。当电压幅值增加到20 kV左右时,PRPD谱图出现“兔耳状”,其示意图如图3所示。随着外施电压继续增加,放电量增大,且“兔耳状”部分变得更加明显。其原因在于交流电压过零点处,外施电场极性反转,与气泡内部感应电荷所产生的场强为同一方向,两者叠加使得气隙内部场强急剧增加,放电更加剧烈。因而,PRPD谱图呈现“兔耳状”放电。

$$m = \frac{3\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \quad (1)$$

式(1)中: m 为最大电场强度畸变系数; ε_1 、 ε_2 分别为空气介电常数、环氧树脂介电常数。

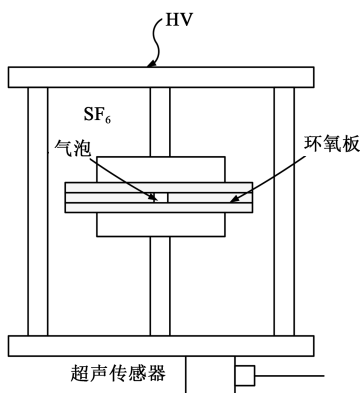


图2 气泡缺陷实验平台

Fig.2 Experiment platform of bubble defect

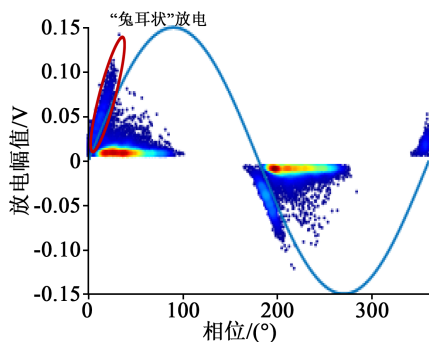


图3 兔耳状放电示意图

Fig.3 Schematic diagram of rabbit auricular discharge

1.2 异物缺陷

盆式绝缘子表面残留金属微粒是GIS最为常见

的绝缘缺陷^[18]。在外施交流电场作用下,静电力会使金属微粒在GIS腔体内做直立旋转、舞动运动。这一过程与外施电压及微粒特性有关。金属微粒在跳动过程中容易散射至盆式绝缘子表面。吴旭涛等^[19]指出金属微粒受雷电冲击电压影响小,但在工频交流电压下会使盆式绝缘子交流耐压水平大幅下降,其下降程度与微粒形状及其位置有关,越靠近高电位,其危害程度越大。

盆式绝缘子表面残留金属微粒包括自由金属微粒群、固定金属微粒对以及单个金属微粒^[20]。盆式绝缘子表面存在自由金属微粒群时,局部放电发生在金属微粒之间,放电脉冲密集且随机性较大。随着加压时间的延长,在电场作用下金属微粒沿电场线方向排列,放电间隙基本固定且放电电压有所下降;固定金属微粒对之间的放电跟自由金属微粒群的放电特征有所相似,但放电发生在工频交流电压正、负半周的上升沿,且正、负半轴对称,幅值相等;单个金属微粒放电发生在金属微粒和盆式绝缘子表面之间,但在较大电场作用下才会发生局部放电,且放电过程有很大的不稳定性和随机性。

虽然金属微粒放电不可能直接造成贯穿性的沿面闪络,但会使盆式绝缘子表面积聚表面电荷。邵先军等^[21]指出,当外施电压在工频交流电压正半周时,如图4(a)所示,金属微粒B端相对于高压导体呈现负极性,而金属微粒A端相对于腔体底部呈现正极性。由于负极性电压更容易起晕,B端将先于A端发生电晕放电。在B端附近空间积聚大量正电荷,使得B端附近同时产生大量的电子崩,这些电子崩的存在造成了较为弥散分布的等离子体层,削弱了等离子体前方电场,对电晕放电的发展造成了阻碍,从而在放电路径上积聚一定的负电荷。当A端局部电场超过其临界起始电场时,A端产生正电晕放电,因而在A端附近盆式绝缘子表面积聚少量的正表面电荷;当外施电压在工频交流电压负半周时(如图4(b)所示),跟正半周类似,首先A端发生电晕放电,并在A端附近积聚大量的负电荷。当外施电压足够高时,B端发生正电晕放电,在B端附近积聚正电荷。因为负极性电压更容易起晕,且SF₆气体为电负性气体,容易吸附电子形成负离子,所以在工频交流电压下,盆式绝缘子所积聚的表面电荷为负电荷。表面电荷的积聚不仅会影响周围电场分布,引起局部电场畸变,造成局部放电,还会为沿面放电提供其通道发展所需的电荷,使得放电通道贯

穿,造成盆式绝缘子沿面闪络。

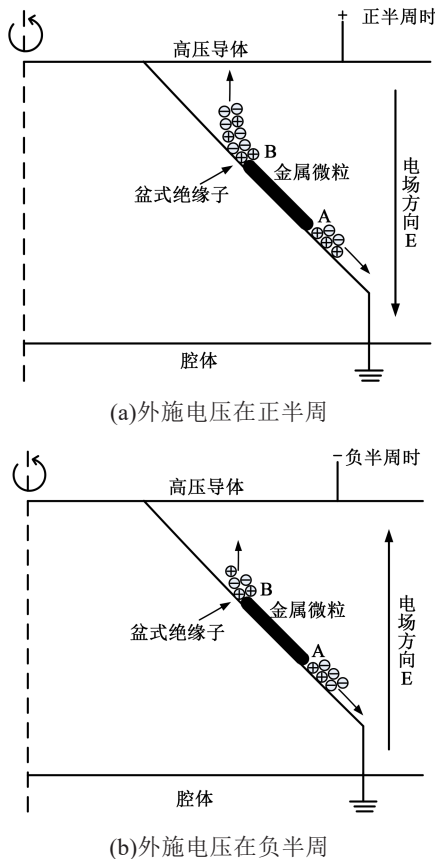


图4 盆式绝缘子放电与表面电荷运输

Fig.4 Discharge and surface charge transport of insulator

再者, GIS在生产、安装过程中,由于金属零部件表面加工精度不足或设备制造和组装工艺不完善,导致金属毛刺的产生。和金属微粒类似,金属毛刺在交流电场作用下发生移动,附着于盆式绝缘子表面。甚至在某些情况下(例如被油脂粘住)长期固定在盆式绝缘子表面。蒋建玲^[22]指出,这些毛刺异常尖锐,当凸起表面场强两倍于无缺陷时的表面电场,且电场畸变范围为凸起尺寸的两倍时,极易引发电晕放电。此外,冯婷娜等^[23]指出,这类缺陷受工频电压影响较小,而在雷电冲击或操作过程中所产生的快速暂态冲击电压下,这类缺陷会导致绝缘故障。其主要原因在于,交流电压变化比较慢,因而尖端电晕有足够时间建立空间电荷,从而对尖端产生保护作用;而在冲击电压作用下,尖端电晕没有足够的时间建立空间电荷,无法有效对尖端产生屏蔽保护作用。王闯等^[24]研究表明,超过1~2 mm的凸起对盆式绝缘子绝缘水平有重大影响。

1.3 裂纹缺陷

盆式绝缘子是由环氧树脂和氧化铝组成的复

合材料。受温度和固化工艺的影响,若两种组成材料分布不均匀,将形成密度差异,使得绝缘子内部产生内应力,造成隐形的轻微损伤点。在长时间运行振动力的作用下,损伤点开裂,并向上延伸。当裂纹扩展到盆式绝缘子表面时,靠近盆式绝缘子边缘方向尖角处先行放电。在多次局部放电下,该区域形成严重的灼伤。随着放电和电弧热所产生的材料热应力不断扩展,诱发表面裂纹发展。当裂纹扩展到一定程度时,材料结合度降低,产生局部脱落物,造成盆式绝缘子损坏。

目前,大多数学者对盆式绝缘子裂纹缺陷的研究集中在两个方面:①裂纹缺陷对电场分布特性、局部放电特性的影响。苑维琦^[25]在综合考虑裂纹厚度、方向、位置等影响因素后,对盆式绝缘子裂纹缺陷放电特性进行研究,得到盆式绝缘子表面最大场强位于凹面侧以及随机长裂纹会导致盆式绝缘子直接闪络;②裂纹缺陷的检测方法。张施令等^[26]采用水压破坏实验,发现盆式绝缘子产生裂纹的临界压力;张梦岑^[27]采用X射线DR成像技术对盆式绝缘子进行可视化检测,节省了拆卸GIS设备的时间。然而,对盆式绝缘子裂纹缺陷的应力特性研究较少。ZHANG Anan^[28]对存在小孔缺陷的盆式绝缘子进行应力分析,发现在小孔缺陷处出现明显的应力集中,但仿真建模的缺陷仅为圆柱形贯穿小孔,而非实际的盆式绝缘子裂纹缺陷;张广兴等^[29]对GIS腔体不同气室压力下,存在不同大小、位置裂缝的盆式绝缘子进行应力分析,发现盆式绝缘子存在裂纹时,裂纹附近会出现应力集中,裂纹端部比中间部分应力明显增加更多。但所采用的盆式绝缘子缺陷模型为二维简化模型,在应力分析上存在较大的误差。

1.4 表面脏污缺陷

GIS在运输、存储和安装过程中,由于工艺流程不严格或处理措施不完善,灰尘、发丝、纸屑、微粒以及硅脂等极易进入GIS内部。这些异物在电场中受力,向盆式绝缘子聚集,改变绝缘子表面电场分布,引起电荷积聚,造成局部放电。在长期放电过程中导致盆式绝缘子劣化,产生电树枝,破坏盆式绝缘子本体。当洁净绝缘子表面积聚异物后,其表面属性如吸附力、粗糙度、摩擦系数等将发生改变,从而致使异物在盆式绝缘子表面的附着特性发生变化。一般较小粒度(50 μm以内)的异物因具有黏性而极易附着。异物的黏性源于异物间接触表面的复杂应力,表面接触应力主要有范德华力、静电

力、表面张力和液桥力。这些力在颗粒间相互作用,使异物聚团。但是如碰撞力、曳力、重力等产生的能量超过界面能,聚团将破碎,使得异物弹离绝缘子表面,图5为外来异物与非洁净粗糙材质表面碰撞示意图。张东东等^[30]研究得出聚团准则为式(2),他们认为异物碰撞到非洁净粗糙绝缘子表面时,如果满足式(2),则异物直接附着;如果不满足式(2),则异物将离开绝缘子表面。

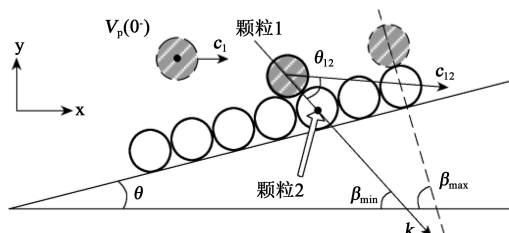


图5 污秽颗粒在非清洁粗糙表面的碰撞

Fig.5 Collision of pollution particles on polluted rough surface

$$\begin{cases} c_{12} = \sqrt{V_{py}^2(0) + V_{px}^2(0)} \cos \theta_{12} \leq V_J \\ V_J = \sqrt{\frac{2E_c}{me^2}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: c_{12} 为颗粒1和颗粒2的碰前速度差; $V_{py}(0)$ 、 $V_{px}(0)$ 分别为污秽颗粒碰撞绝缘子壁面污层瞬间的y、x方向的速度; θ_{12} 为两颗粒的速度差矢量与碰撞方向的夹角; V_J 实质上为发生破碎所需最小速度; E_c 为界面能; m 为颗粒质量。

盆式绝缘子表面脏污容易造成表面电荷积聚,引发局部放电,严重时导致绝缘子沿面闪络。因而,对盆式绝缘子表面脏污进行带电检测具有重要意义。当前主要通过模态分析对盆式绝缘子表面脏污进行检测。研究表明,使用模态分析法诊断机械故障具有高灵敏度、无损检测等优点。李渊等^[31]在用模态分析法对盆式绝缘子表面脏污检测研究中提出将相关系数 r 、污秽累加值 s 以及污秽指数 p 定义为衡量盆式绝缘子表面脏污状态的3个指标,并将频率在4 000 Hz以下的振动信号分为4个频段,对其进行单独分析。研究发现盆式绝缘子存在表面脏污缺陷时,其频响函数曲线与无污秽情况下频响函数曲线的相关系数会随着污秽质量的增加明显减小,当 $0.90 \leq r < 0.95$ 时,可认为表面脏污程度为轻;当 $0.80 \leq r < 0.90$ 时,可认为表面脏污程度为中;当 $r < 0.80$ 时,可认为表面脏污程度为重。表面脏污对频响函数曲线的影响主要集中在2 000~4 000 Hz频

段,污秽累加值 s 随着污秽质量的增加在2 000~3 000 Hz信号频段显著增大,污秽指数 p 随着污秽质量的增加在2 000~4 000 Hz信号频段从1.5增大到4.0。对于0~2 000 Hz频段,表面脏污缺陷对频响函数曲线影响较小,相关系数 r 、污秽累加值 s 、污秽指数 p 均无明显变化。此外,GIS整体振动信号频率在100 Hz附近。即使GIS运行出现机械故障,其异常频率信号也在1 000 Hz以下,因而模态分析法可以对盆式绝缘子表面脏污缺陷进行有效检测。

盆式绝缘子表面缺陷是影响GIS绝缘强度的关键因素。对于盆式绝缘子典型表面缺陷的产生机制,许多学者有详尽的描述;利用不同的检测方法对盆式绝缘子不同类型的表面缺陷放电特性也获得了一定的认识。然而,盆式绝缘子表面缺陷所造成的电场畸变及其动态变化异常复杂;此外,整个放电发展过程中绝缘子表面电荷的演化情况也不明确;再者,当前针对同一检测方法进行盆式绝缘子不同类型表面缺陷放电特性的研究较少,不便于特征参量的统一提取。综上所述,还需进一步探究电场畸变及其电荷积聚的动态演化过程以及同一检测手段下较为成熟的盆式绝缘子表面缺陷诊断方法,以便能够通过局部放电测试结果表征盆式绝缘子表面缺陷类型。

2 盆式绝缘子表面缺陷诱发闪络的发生机制

在GIS运行过程中,盆式绝缘子表面缺陷会引起表面电场分布不均,致使局部场强过大,降低沿面闪络的临界条件。此外,盆式绝缘子表面缺陷还会造成表面电荷积聚。表面电荷积聚一方面会影响表面电场分布,另一方面会为沿面闪络提供大量的源电荷,从而诱发沿面闪络。基于此,从表面电场分布和表面电荷积聚两方面对盆式绝缘子沿面闪络的影响进行分析。

2.1 表面电场分布

盆式绝缘子表面缺陷所造成的局部电场集中是其发生沿面闪络的主要因素。王彩云^[32]采用有限元法对800 kV盆式绝缘子三维结构模型进行电场分析。探究了工频交流电压、雷电冲击电压以及快速暂态过电压作用下,不同位置、不同大小的金属微粒对盆式绝缘子表面电场分布的影响。研究发现盆式绝缘子表面电场强度最大值位于金属微粒附近,不仅随着金属微粒所在位置场强的增大而增

大,而且随着金属微粒粒径的增大呈现先增大后减小的趋势。在同一位置,工频交流电压作用下,盆式绝缘子表面最大场强(13.578 kV/mm)是不存在微粒缺陷时最大场强(3.666 kV/mm)的3.70倍;雷电冲击电压作用下,盆式绝缘子表面最大场强(21.542 kV/mm)是不存在微粒缺陷时最大场强(5.683 kV/mm)的3.79倍;快速暂态过电压作用下,盆式绝缘子表面最大场强(48.616 kV/mm)是不存在微粒缺陷时最大场强(6.732 kV/mm)的7.22倍,由此可见所施加的电压类型对盆式绝缘子表面电场分布有很大的影响。

再者,石广文^[33]依据实际110 kV盆式绝缘子的结构,搭建了110 kV盆式绝缘子三维结构计算模型,分析了工频交流电压作用下,不同位置、不同大小的气泡缺陷对盆式绝缘子电场强度的影响。探究发现气泡缺陷会使自身及其相邻部分的电场发生畸变,越靠近内屏蔽环和中心导体端,其电场强度增幅越大。虽然气泡所处位置对盆式绝缘子整体场强影响不大,但它是决定气泡最大电场强度大小的关键因素;此外气泡缺陷的大小对盆式绝缘子整体场强也无影响。一般情况下,气泡最大电场强度会随着气泡半径的增大先增大后减小,且幅值变化较小。总之,盆式绝缘子表面缺陷的存在会改变盆式绝缘子表面电场分布,使得局部电场集中,造成盆式绝缘子闪络电压下降,对盆式绝缘子的绝缘特性产生不利影响。

2.2 表面电荷积聚

在外施电场作用下,盆式绝缘子表面缺陷的存在会使固体与气体交界面处形成表面电荷,不仅使得盆式绝缘子的工作电场发生畸变,而且为沿面闪络提供大量的电荷,造成盆式绝缘子绝缘强度降低,导致沿面闪络的发生。盆式绝缘子表面形状复杂,且GIS内部充有SF₆气体,使得盆式绝缘子表面电荷测量难度较大。基于此,齐波等^[34]研制了一套基于静电容探头法的高分辨率表面电荷测量系统。该系统配以高输入阻抗的防泄露装置,使其能有效防止感应电荷沿测量系统的泄露,增加测量的可靠性和精确性,整体功能结构示意图如图6所示。

为了探究不同外施电压作用下,盆式绝缘子表面缺陷处表面电荷的积聚情况。齐波等^[34]研究发现,交、直流电压下均存在电荷积聚现象。交流工况下,盆式绝缘子表面缺陷会积聚大量的负电荷。由于电压极性周期性变化,电荷整体分布比较均

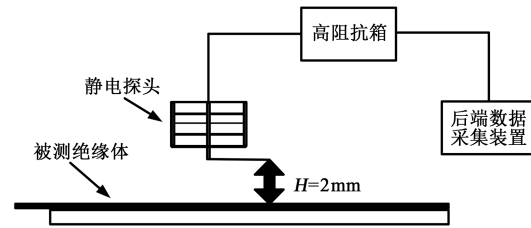


图6 电荷测量系统结构图

Fig.6 Structure diagram of charge measurement system

匀,先后出现较为稳定的电荷峰值区域。随着盆式绝缘子所存在的表面电荷的增加,沿面闪络电压逐渐减小并趋于饱和,沿面闪络电压最大可以减小10.3%;而在直流工况下,表面电荷积聚严重。随着盆式绝缘子表面负极性电荷积聚的增多,盆式绝缘子沿面闪络电压明显减小,最大可以减小22.8%,威胁GIS的安全运行。

盆式绝缘子表面缺陷诱发闪络的发生机制跟表面电场分布和表面电荷积聚相关。当盆式绝缘子存在表面缺陷时会导致局部电场畸变并引起电荷积聚,造成盆式绝缘子闪络电压下降,进而引发盆式绝缘子沿面闪络。但不同缺陷类型以及不同劣化程度的盆式绝缘子表面缺陷引起表面电场分布及表面电荷积聚的变化缺乏对应的量化关系,对盆式绝缘子沿面闪络的影响规律有待进一步解释。

3 盆式绝缘子表面缺陷诊断方法

GIS典型缺陷的存在必然导致局部电场畸变,引发局部放电。当前GIS局部放电类型主要包括尖端放电、悬浮放电、自由颗粒放电、沿面放电、气孔放电,放电特征图谱与放电类型有明显的对应关系。如尖端放电的放电信号极性效应非常明显,通常在工频相位的负半周或正半周出现,放电次数较多且相位分布较宽;悬浮放电的放电信号在工频相位的正、负半轴均会出现,且具有一定的对称性,局部放电特征图谱具有“内八字”或“外八字”的分布特征;自由颗粒放电极性效应不明显,任意相位均有分布,放电次数少,放电信号时间间隔不稳定;沿面放电信号通常在工频相位的正、负半周均有出现,且有一定的对称性,放电幅值分散性较大,放电时间间隔不稳定;气孔放电的放电次数少,周期重复性低,局部放电特征图谱呈现“兔耳状”的分布特征。因而通过局部放电特征图谱可以表征GIS典型缺陷,盆式绝缘子表面缺陷诊断方法由此而生。然而,当前针对同一检测方法进行盆式绝缘子不同类

型表面缺陷放电特性的研究较少,不便于特征参量的统一提取。因而,缺乏较为成熟的盆式绝缘子表面缺陷诊断方法,致使通过局部放电结果表征盆式绝缘子表面缺陷类型还需继续进行深入研究。当然也有一些较为特殊的局部放电现象能够表征表面缺陷类型,如“兔耳状”放电能够表征盆式绝缘子的气泡缺陷。

盆式绝缘子表面缺陷的存在必然导致盆式绝缘子表面发生局部电场畸变,产生局部放电^[35-37]。局部放电是一种强烈的能量释放,其放电脉冲具有非常快的上升前沿,所激发的电磁能量在GIS气室内来回传播;同时,微小的火花放电或电晕放电会使电离气体通道发生扩散,产生超声压力波,出现被激励的原子发光致使 SF_6 气体产生化学分解物。因此,电气设备内产生的局部放电所诱发的物理和化学效应均有对应的检测方法。现阶段传统局部放电检测方法有常规脉冲电流法、特高频法、超声波检测法、化学检测法。脉冲电流法现场测试抗干扰能力差、灵敏度低,其推广易受到限制^[38-41]。超声波法也存在对盆式绝缘子表面缺陷不敏感、受机械振动干扰强度大以及检测范围小等缺点^[42-43]。化学检测法虽然在较大的闪络事故后,能检测到 SF_6 气体的分解产物,但受干燥剂、吸附剂以及 SF_6 气体强烈稀释的影响,正常运行中的局部放电产生的分解产物不易检出,只能作为故障检测的辅助手段^[44-48]。特高频法虽然具有灵敏度高、监测范围大、抗干扰能力强、可识别故障类型以及进行故障定位等优点,但该方法进行缺陷检测时不能定量描述^[49-51]。再者,特高频传感器只能安装在盆式绝缘子等非金属处或者使用内置传感器^[52]。因而,这对天线设计与信号采集系统设计要求极高,目前在GIS设备中应用有一定的限制。为了弥补GIS局部放电传统监测方法的不足,许渊等^[53]提出了灵敏度高达0.02 pC的脉冲电流分布测量法,任重等^[54]采用光学检测法,显示出巨大的发展潜力和广阔的应用前景。为此,对脉冲电流分布测量法和光学检测法进行重点分析。

3.1 脉冲电流分布测量法

图7为常规脉冲电流法典型试验回路。其中, C_x 为被测试品,U为工频试验电压,Z为保护电阻, C_0 为工装电容, C_k 为耦合电容, Z_m 为检测阻抗,A为放大器,M为局放仪。当被测试品发生局部放电时,由于保护电阻Z的存在, C_x 所产生的局部放电流

流被 C_0 和 C_k 支路分流。为了提高局部放电检测的灵敏度,使 Z_m 流过更多的局部放电电流,常常要使 C_k 远大于 C_0 。 C_k 越大,局部放电检测仪灵敏度越高。然而,在实际应用中,试验电压源U跟保护电阻Z不可避免会产生局部放电干扰信号。首先,当产生局部放电干扰信号后,其会被 C_0 支路、 C_x 支路、 C_k 支路分流,由于 C_k 远大于 C_0 和 C_x ,局部放电干扰信号大部分也从 Z_m 流过。因此无论增大 C_k 还是减小 C_k ,局部放电测量信噪比都会受到影响,导致局部放电识别灵敏度难以提升。其次,检测阻抗无法对局部放电信号及干扰信号进行区分,因而在局部放电检测中,只有在检测阻抗 Z_m 上检测到稳定的、远高于局放干扰信号的局部放电时,才能认定为是被测试品所产生的局部放电信号。而当被测试品局部放电较弱时,常规脉冲电流法难以分辨该信号为局放信号还是干扰信号。最后,在盆式绝缘子出厂局部放电检测中,通常多个盆式绝缘子同时进行试验,当其中任何一个盆式绝缘子存在缺陷时,脉冲电流法都能够检测到局部放电信号,但无法确认是哪个盆式绝缘子存在缺陷。

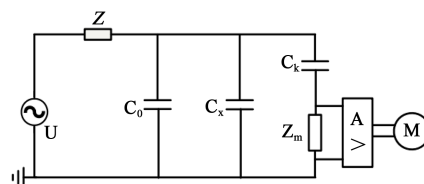


图7 常规脉冲电流法典型试验回路图

Fig.7 Typical expert ment circuit diagram of conventional pulse current method

针对上述问题,许渊等^[53]提出了脉冲电流分布测量法,其原理如图8所示。其中, Z_1 、 Z_2 为检测阻抗; Z_s 为保护电阻; C_0 为工装电容; C_1 、 C_2 为被测试品,且二者电容大小相当,远小于 C_0 。如图8(a)所示,当被测试品 C_1 发生局部放电时,局部放电电流将从 Z_1 全部流过,并被 C_0 和 C_2 支路分流。因为 C_0 远大于 C_1 、 C_2 ,所以流过 Z_2 的电流很小且与 Z_1 方向相反。同理,当被测试品 C_2 发生局部放电时, Z_2 所流过的局部放电电流远大于 Z_1 所流过的局部放电电流且方向相反。如图8(b)所示,当试验电压源U跟保护电阻 Z_s 产生局部放电干扰信号时,干扰信号被 C_1 、 C_2 、 C_0 支路分流。由于 C_1 、 C_2 远小于 C_0 ,局部放电干扰信号大部分流经 C_0 支路,有效抑制了流经 C_1 、 C_2 的干扰信号,且流经 Z_1 、 Z_2 的局部放电干扰信号方向相同、幅值相等。因此,脉冲电流分布测量

法可以有效提高局放测量的信噪比,此外通过比较 Z_1 、 Z_2 所测量的脉冲电流信号幅值和方向,可区分 C_1 产生的局部放电、 C_2 产生的局部放电和外部干扰信号,进而将存在缺陷的盆式绝缘子识别出来。将该方法应用于盆式绝缘子缺陷局部放电检测,结果表明,脉冲电流分布测量法的局放识别灵敏度高达 0.02 pC 。然而该方法对于多个单元构成的整体设备,需要分别检测,测量极不方便,因此主要适用于实验室或停电环境的测量。

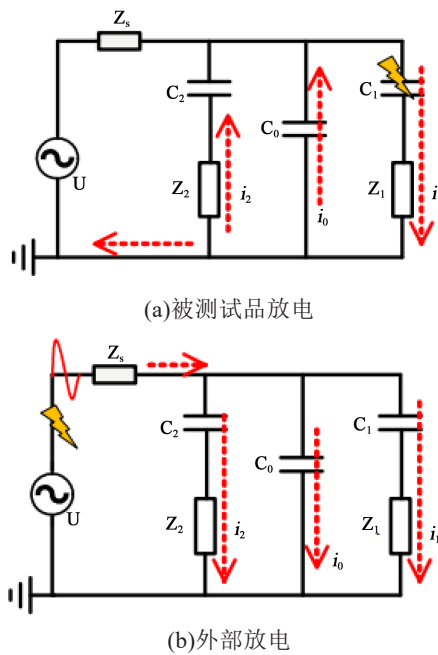


图8 脉冲电流分布测量法原理图

Fig.8 Schematic diagram of pulse current distribution measurement method

3.2 光学检测法

当GIS设备出现绝缘缺陷时,会产生电晕、电弧或闪络等不同类型的放电。放电过程中,空气中的电子不断获得和释放能量。除了伴随着电荷的转移和电能的损耗外,电离过程中还会产生光辐射现象。陆宇航^[55]研究表明,局部放电光谱多集中在紫外波段,且紫外光辐射强度随着放电量的增加而增大。基于此,欧阳有鹏^[56]搭建基于光学检测法的局部放电检测系统,如图9所示。通过检测局部放电所产生的紫外光功率得到盆式绝缘子表面缺陷产生的局部放电量。该检测系统由紫外光纤探头、紫外探测器和信号采集处理单元组成。为了提高检测的灵敏度,光纤探头采用球状结构,增加入射光通量;探测器通过光电倍增管放大微弱光信号;此外,布置多个紫外光纤探头形成局部放电检测矩

阵,结合多个探头的不同检测结果以此确定局放位置。刘钰等^[57]采用该方法进行盆式绝缘子表面缺陷局部放电研究。结果表明该方法检测到的放电点位置与实际放电点位置的最大误差为7.8%。

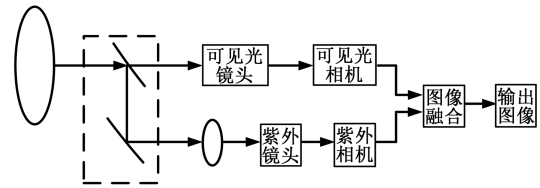


图9 基于光学检测法的局部放电检测系统

Fig.9 Partial discharge detection system based on optical detection method

光检测法具有检测局部放电直观、不受电磁干扰、灵敏度高、且能检测放电发生位置等优点,但其要求视距可见,不能有遮挡,否则会出现检测“死角”。且 SF_6 气体的光吸收能力随气体密度的增大而提高,加上设备内壁光滑而引起的折反射等原因,往往对检测结果有一定的影响。再者由于光检测法的技术复杂,电气设备的生产厂家一般不配备故障诊断的光检测系统,用户不可能在运行的电气设备内部加装光检测传感器。因此,该方法不适用于现场检测。

虽然盆式绝缘子传统局部放电检测方法有着各自独特的优点,但由于环氧绝缘子具有初期局部放电微弱、局部放电间歇周期长等问题,现有盆式绝缘子表面缺陷局部放电检测方法对盆式绝缘子表面缺陷检出和识别效率较低;此外,对于灵敏度较高的脉冲电流分布测量法和光学检测法也不适用于现场检测。鉴于环氧绝缘子具有电压模式敏感的特点,可从激励局部放电的电压模式入手,对盆式绝缘子表面缺陷的局部放电检测方法进行进一步探究。

4 基于不同电压激励的盆式绝缘子表面缺陷诊断方法

虽然工频电压下,盆式绝缘子表面缺陷局部放电检测方法有着各自独特的优势,但环氧材料具有初期局部放电微弱、局部放电间歇周期长等问题,导致这些检测方法的灵敏度不足,远远无法满足工程现场的需要,致使现有局部放电在线检测装置出现大量误报、漏报。基于此,许多学者从激励局部放电的电压模式入手,当前主要通过标准型雷电冲击电压、振荡型雷电冲击电压以及高频电压等激励下进行局部放电特性及其缺陷诊断研究^[58-61]。

4.1 标准型雷电冲击电压下盆式绝缘子局部放电检测

频率较低的工频交流电压(AC)、直流电压(DC)与频率较高的冲击电压对放电时延、放电量、放电统计分布以及放电发展模式的影响存在明显的不同。相比工频电压,冲击电压能够有效限制局部放电电晕的稳定性,促进放电的产生和发展。从绝缘诊断角度而言,在冲击耐压试验的同时进行局部放电检测,能够更有效地发现盆式绝缘子中电场异常等绝缘缺陷,从而更好地了解盆式绝缘子的绝缘状态。

陈庆国等^[62]研究发现,冲击电压比工频电压高,波形也更为陡峭,更容易激发绝缘缺陷产生局部放电。冲击电压下的局部放电测量能够发现更微小的绝缘缺陷,也能更早地发现设备潜伏性的绝缘故障。此外,对于某些缺陷而言,工频电压虽然可以激发、暴露缺陷,但其持续性的特点也会使缺陷进一步扩大,从而给设备造成更大的损伤。冲击电压由于其“一过性”的特点,在激发、暴露缺陷的同时,不会扩大缺陷。然而,当前用于现场冲击电压试验的试验装置普遍存在质量和体积较大、部分设备高度较高的问题,导致试验设备运输难度大、成本高,现场安装工作强度大、效率低下。再者,对于GIS设备来说,其入口电容相比其他设备较大。若试品电容过大,冲击电压发生器产生冲击电压波形时会使得波前时间过长,导致无法产生标准的雷电冲击波形。最后,冲击回路火花间隙在点燃瞬间所产生的较强空间电磁脉冲干扰和测量回路在冲击电压施加时刻从接地端耦合的瞬间电压脉冲干扰,均会对局部放电测量结果的有效性产生影响。前者主要对信号传输过程产生影响,后者则对接地类传感器及测量回路器件工作性能产生影响。并且因为冲击电压施加时间较短,此过程中产生的局部放电次数也相对较少,能够获得的局部放电信息有限,所以冲击电压局部放电检测对测量系统的准确性要求很高。这些局限性的存在使得冲击电压激励下的盆式绝缘子局部放电试验并不完全适用于现场检测。

4.2 振荡型雷电冲击电压下盆式绝缘子局部放电检测

当前,业内已多次成功利用振荡型雷电冲击电压开展超高压、特高压GIS设备的现场冲击耐压试验,推广和普及该试验对降低设备故障率、提高设备运行可靠性具有重要意义。刘蓉等^[63]采用振荡型雷电冲击电压进行盆式绝缘子局部放电检测。根据试验数据可知,振荡型雷电冲击电压下局部放电

信号最先出现在振荡电压的第一个周期的波峰处(电压绝对值出现极大值处)。随着电压的升高,放电信号依次出现在后面周期的波峰处。且前一波峰处的放电幅值和放电数量都大于后一波峰处的放电。当电压继续增大时,放电会出现在电压的波谷处(电压绝对值出现极小值处)。相比于工频交流电压和标准雷电冲击电压,振荡型雷电冲击电压放电更为激烈,放电数多且放电起始电压低。

虽然相较于标准型雷电冲击电压,振荡型雷电冲击电压具有显著的优点,然而振荡型雷电冲击电压也有一定的不足:①随着波头时间的延长,检测出缺陷的可能性降低。当波前时间大于 $10\ \mu\text{s}$ 时,振荡型雷电冲击电压比标准型雷电冲击电压下的击穿电压高 $10\%\sim 20\%$,从而电压等级越高,击穿电压相差越大;②振荡型雷电波形受到回路参数和负载特性影响很大。当负载不同时,产生的振荡雷电波形差别也较大;③由于振荡的原因,还会使冲击电压发生器球隙多次隙弧重燃,这些球隙导通的过程中产生的电磁信号会进一步对局放信号产生干扰,使得各种局部放电检测方法受到振荡型雷电冲击电压发生器的干扰更大。因而现场也不适合采用振荡型雷电冲击电压激励对盆式绝缘子表面缺陷进行局部放电检测。

4.3 高频电压下盆式绝缘子局部放电检测

基于上述检测方法的不足,结合实验过程中发现当频率 $\geq 1\ \text{kHz}$ 时,高频正弦电压具有的优势包括:①激励残余电荷效应,激励局放;②周波数成倍增加,局放更加集中和剧烈;③既具有短时的冲击作用,又有更好的重复性和稳定性,笔者采用高频正弦电压激励下进行盆式绝缘子表面缺陷局部放电检测。其高频电压激励下,盆式绝缘子局部放电检测实验平台如图10所示。该实验平台以脉冲电流法、超声波法和光学检测法作为绝缘缺陷检测手段。综合利用3种缺陷检测方法的优势互补,进一步提高环氧树脂界面绝缘缺陷检出和识别效率。

通过实验发现,局部放电主要集中在电压上升沿和下降沿处。此外,随着频率的提升,局部放电越来越剧烈。当频率 $\geq 1\ \text{kHz}$ 时,高频正弦电压对局部放电的激励作用逐渐显现。当频率 $\geq 5\ \text{kHz}$ 时,出现“兔耳状”放电,且“兔耳状”放电幅值高于主放电丛。其主要原因在于在快速极性反转时刻,由于气隙中空间电荷的驻留效应,叠加的电场使得气隙空间场强短时间内较大。因此,在高频电压波形的上升/下降沿处局部放电活动剧烈。此外,极性反转时刻外施电压和空间电场的叠加效应是“兔耳状”放电产生的原因。因而通过高频正弦电压激励可以

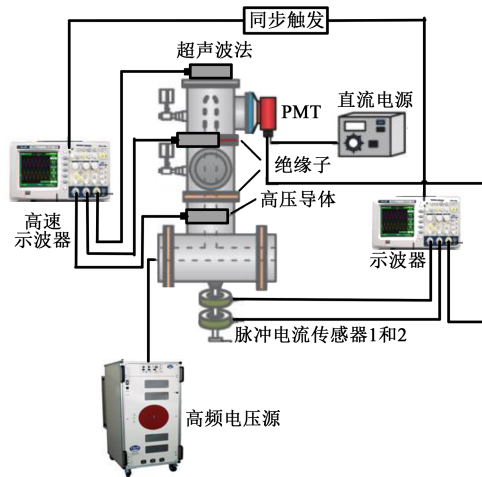


图 10 盆式绝缘子局部放电检测实验平台

Fig.10 Partial discharge test platform for insulators

提高盆式绝缘子表面缺陷的检出和识别效率。

改变盆式绝缘子表面缺陷局部放电的电压模式可以明显提升盆式绝缘子表面缺陷的检出和识别效率。在冲击电压激励下,盆式绝缘子表面缺陷局部放电检测灵敏度远高于盆式绝缘子表面缺陷传统局部放电检测方法。然而,冲击电压发生器球隙熄弧重燃过程中所产生的电磁信号会对局部放电检测信号产生较大干扰,无法满足工程现场的需要。因此,探索更为合适的激励局部放电的电压模式对提高盆式绝缘子表面缺陷的检出和识别效率具有重要意义。

5 结束语

(1)目前关于盆式绝缘子表面缺陷的产生和发展机理的研究并不完善。对于盆式绝缘子典型表面缺陷的产生机制,许多学者有详尽的描述;利用不同的检测方法对盆式绝缘子不同表面缺陷的放电特性也有一定的认识。然而,盆式绝缘子表面缺陷所造成的电场畸变及其动态变化异常复杂;此外,整个放电发展过程中绝缘子表面电荷的演化情况也不明确。还需进一步探究电场畸变及其电荷积聚的动态演化过程,明确盆式绝缘子表面缺陷的产生和发展机制。

(2)盆式绝缘子表面缺陷诱发闪络的因素跟表面电场分布和表面电荷积聚相关,但盆式绝缘子表面缺陷引起表面电场分布及表面电荷积聚的变化缺乏对应的量化关系,对盆式绝缘子沿面闪络的影响规律有待进一步解释。

(3)尽管盆式绝缘子局部放电传统检测方法有着各自独特的优势,但盆式绝缘子具有初期局部放电微弱、局部放电间歇周期长以及电压模式敏感等

问题,导致现有盆式绝缘子局部放电检测方法的检测有效性较低。

(4)通过从激励局部放电的电压模式入手,现有冲击电压激励下,盆式绝缘子表面缺陷诊断方法灵敏度远高于盆式绝缘子表面缺陷传统局部放电检测方法。然而,冲击电压发生器球隙熄弧重燃过程中所产生的电磁信号会进一步对局部放电检测信号产生干扰,无法满足工程现场的需要。因此探索更为合适的激励局部放电的电压模式对提高盆式绝缘子表面缺陷的检出和识别效率具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王齐峰. 电力继电保护的电工维修技术[J]. 中外企业家,2016(29):226.
- [2] WANG X, LIU H X, OUYANG S X. Damping properties of flexible epoxy resin[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition),2008(3):411-414.
- [3] 张嘉乐,任重. 运行中GIS局部放电检测技术的实用化研究[J]. 绝缘材料,2016,49(2):75-80.
- [4] 王健,李庆民,李伯涛,等. 直流GIL中自由线形金属微粒的运动与放电特性[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4793-4801.
- [5] 邵涛,周文俊,朱宜飞,等. 特高频法检测GIS局部放电的试验研究[J]. 高压技术,2001,27(3):15-16.
- [6] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器,2010,46(7):100-104.
- [7] ZHANG L, HAN X, LI J. Partial discharge detection and analysis of needle-plane defect in SF₆ under negative oscillating lightning impulse voltage based on UHF method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):296-303.
- [8] 国家电网公司运维检修部. 高压开关设备典型故障案例汇编[M]. 北京:中国电力出版社,2012:2-9.
- [9] 何聪,张芊,曹铎耀,等. 交流与操作冲击叠加电压下SF₆气体中沿面局部放电特性[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1807-1817.
- [10] JEONG D H, KWON K R, SEO K B, et al. Dielectric strength and insulating property on surface of spacer for particle contamination under dry air gas[C]//Proceedings of 2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Matsue, Japan:IEEE,2013:1-4.
- [11] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等. 基于超高频法的典型GIS局部放电检测[J]. 高压电器,2012,48(4):7-12.
- [12] 胡红红,江健武,钟士朝,等. 气体分解产物和局部放电测试技术在SF₆电气设备状态诊断中的应用[J]. 高压电器,2014,50(10):121-125.
- [13] 陶加贵. 组合电器局部放电多信息融合辨识与危害性评估研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [14] 张进,杨帆,杜雪松,等. GIS设备绝缘缺陷局部放电的联合检测研究[J]. 电气制造,2014,22(4):27-29.
- [15] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高压技术,2015,41(8):2583-2601.
- [16] 张施令,姚强,苗玉龙,等. GIS用盆式盆式电场分布与绝缘性间关系[J]. 电磁避雷器,2017(6):209-215.
- [17] 周云锋,张子阳,杨景刚,等. 基于超声波法的GIS盆式绝缘子内

- 部气隙放电特性研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):3-5,8.
- [18] 司文荣,李军浩,袁鹏,等. 气体绝缘组合电器多局部放电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):119-126.
- [19] 吴旭涛,李军浩,张亮,等. 振荡型冲击电压下局部放电的检测及干扰分析[J]. 高压电器,2016,52(4):92-97.
- [20] 孙继星,陈维江,李志兵,等. 直流电场下运动金属微粒的带电估算与碰撞分析[J]. 高电压技术,2018,44(3):779-786.
- [21] 邵先军,何文林,徐华,等. 550kV GIS 现场交流耐压试验下放电故障的定位与分析研究[J]. 高压电器,2014,50(11):30-37.
- [22] 蒋建玲. 用超高频法研究 GIS 中局部放电的特征[D]. 北京:华北电力大学,2003.
- [23] 冯婷娜,顾生杰,马建桥,等. 不同形态盆式绝缘子毛刺对其附近电场的影响及优化[J]. 电气工程学报,2020,15(3):83-88.
- [24] 王闯,赵朗,孙青,等. 界面涂层对特高压 GIS 盆式绝缘子导体-绝缘盆体界面处电场调控[J]. 高电压技术,2020,46(3):799-806.
- [25] 苑维琦. 特高压盆式绝缘子裂纹缺陷放电研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
- [26] 张施令,彭宗仁,王浩然,等. 盆式绝缘子多物理场耦合数值计算及结构优化[J]. 高电压技术,2020,336(11):283-294.
- [27] 张梦岑. 基于 X 射线的盆式绝缘子缺陷识别方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [28] ZHANG Anan, HE Cong, SUN Maoyi, et al. Partial discharge signal self-adaptive sparse decomposition noise abatement based on spectral kurtosis and S-transform[J]. *Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering*,2018,37(1):293-306.
- [29] 张广兴,王永强,霍娜. 瓷绝缘子振动声学检测技术及应用[J]. 河北电力技术,2015,34(2):40-42.
- [30] 张东东,张志劲,蒋兴良,等. 基于碰撞动力学的绝缘子粗糙表面污秽颗粒积聚模型及验证[J]. 电工技术学报,2018,33(16):3889-3896.
- [31] 李渊,康钧,李军浩,等. 一种 GIS 盆式绝缘子表面缺陷模型: CN106199360A[P].2016-12-07.
- [32] 王彩云. 盆式绝缘子暂态电场仿真及其对沿面闪络影响分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [33] 石广文. 110kV 盆式绝缘子气隙缺陷局部放电研究[D]. 厦门:厦门理工大学,2015.
- [34] 齐波,高春嘉,邢照亮,等. 操作冲击电压下 GIS 绝缘子表面电荷的积聚特性[J]. 中国电机工程学报,2017,37(15):4538-4547,4596.
- [35] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1994.
- [36] 崔博源,王宁华,王承玉,等. 特高压气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子的质量控制[J]. 高电压技术,2014,40(12):3888-3894.
- [37] ANN S H, LEE J H, LEE C J, et al. A study of partial discharge pattern analysis using artificially defected epoxy resin bushing in the ring voltage detecting sensor[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Xi'an, China: IEEE,2000:1069-1072.
- [38] 孙建锋,葛睿,郑力,等. 2010 年国家电网安全运行情况分析[J]. 中国电力,2011,44(5):1-4.
- [39] 杨莹,李炜,宋杲,等. 2013 年高压开关设备运行分析[J]. 智能电网,2014,2(6):32-41.
- [40] 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):70-80.
- [41] 李建波,高文胜,刘卫东. 直流 GIL 绝缘子表面附着金属颗粒局部放电发展过程及严重程度评估[J]. 高压电器,2018,54(5):9-16.
- [42] 李庆民,王健,李伯涛,等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(3):849-860.
- [43] 黄玉龙,周哲,赵新德,等. 局部放电测试在 GIS 设备故障诊断中的应用[J]. 电工技术,2017(6):92-94.
- [44] 毛文奇,吴水锋,谢国胜,等. GIS 设备局部放电带电检测技术应用综述[J]. 湖南电力,2016,36(2):9-13.
- [45] 郭俊,吴广宁,张血琴,等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005,20(2):29-35.
- [46] 王少华,叶自强,梅冰笑. 输变电设备在线监测及带电检测技术在电网中的应用现状[J]. 高压电器,2011,47(4):84-90.
- [47] 钱勇,黄成军,江秀臣,等. GIS 中局部放电在线监测现状及发展[J]. 高压电器,2004,40(6):453-456.
- [48] WAGENAARS P, WOUTERS P A F. Influence of ring main units and substations on online partial discharge detection and location in medium voltage cable networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2011,26(2):1064-1071.
- [49] QI B, LI C, XING Z, et al. Partial discharge initiated by free moving metallic particles on GIS insulator surface: Severity diagnosis and assessment[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2014,21(2):766-774.
- [50] OKABE S, YAMAGIWA T, OKUBO H. Detection of harmful metallic particles inside gas insulated switchgear using UHF sensor[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2008,15(3):701-709.
- [51] 李信,李成榕,丁立健. 基于超高频信号检测 GIS 局放模式识别[J]. 高电压技术,2003,29(11):26-30.
- [52] 卢启付,郑书生,李兴旺,等. GIS 金属法兰孔特高频信号传播特性研究与外置式发射天线开发[J]. 电网技术,2013,37(8):2303-2309.
- [53] 许渊,刘卫东,陈维江,等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):338-348.
- [54] 任重,吴海涛,肖利龙,等. 绝缘子表面放电的多物理信号比值演化特征及其诊断方法研究[J]. 绝缘材料,2020,53(4):99-106.
- [55] 陆宇航. 基于光纤电流传感器的局部放电检测方法研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [56] 欧阳有鹏. 电力设备局部放电荧光光纤传感系统的研制[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [57] 刘钰,熊兰,张占龙,等. 污秽绝缘子紫外在线监测系统研究[C]//2009 年全国电工理论与新技术年会. 杭州,2009.
- [58] 孙强,董明,任重,等. 现场用 GIS 冲击耐压试验及局部放电检测装置设置[J]. 高电压技术,2012,38(3):639-644.
- [59] 康钧,徐世山,李军,等. 800kV GIS 设备现场冲击试验技术探讨[J]. 青海电力,2011,30(S1):1-2,17.
- [60] 胡伟,陈勇,万启发,等. 三峡 550kV GIS 的雷电冲击耐受试验方法[J]. 高电压技术,2011,37(4):883-887.
- [61] YAMAMOTO O, HARA T, TAKUMA T. The role of leader re-illumination in the development of surface discharges in SF₆ exposed to a very fast transient overvoltage[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*,1998,31(21):2997-3003.
- [62] 陈庆国,张乔根,汪泓,等. 快速暂态电压作用下 SF₆ 气体放电机理[J]. 电工技术学报,2001,16(3):53-56.
- [63] 刘蓉,李继胜,赵学风,等. 冲击电压下 SF₆ 气体绝缘典型缺陷局部放电特性研究[J]. 高压电器,2015,320(11):128-133.