

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.019

沿面闪络用非介入式表面电位测量研究

范路, 耿伊雯, 王亚林, 尹毅

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:沿面闪络严重威胁气体绝缘封闭开关(GIS)的安全运行。文中通过对指形电极沿面闪络装置进行非介入式表面电位测量及仿真,在仿真参数设定下,非介入式测量误差仅为2.42%。利用该实验装置对添加纳米SiO₂质量分数为2%的环氧试样进行表面电位测量,升压速率为0.5 kV/5 min。当施加电压不足以引发沿面闪络时,纳米颗粒的添加引起的Maxwell-Wagner界面极化使得表面电位呈现衰减现象。当施加电压接近闪络电压时,表面电位衰减过程出现周期性回升现象,且回升现象出现的频率随施加电压升高而变快,闪络前表面电位衰减过程中的回升现象能够预测闪络的发生。持续性闪络阶段表面电位的幅值波动相较于间歇性闪络要小且相邻闪络间期变短,闪络剧烈。该现象与闪络引起表面灼烧通路更易于发生沿面闪络有关。直流闪络的表面电位测量对闪络预防以及闪络严重性评估具有指导意义。

关键词:三结合点;非介入式;表面电位;持续性闪络;环氧树脂;闪络电压

中图分类号:TM216

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)02-0143-06

0 引言

当今国民经济发展迅速,而电力消费与资源分布却极不均衡,因此需要大容量、远距离的输电手段^[1-6]。相比于交流输电,直流输电具有输出电压等级高,传输损耗低的优点,因此得到广泛应用^[7-10]。采用电缆作为直流输电受到电压等级的限制,无法在承受更大电压时保持较好的散热性能^[11-14]。直流气体绝缘设备是直流输电工程中的重要环节,气体绝缘封闭开关(gas-insulated switchgear, GIS)因其体积小、占地面积小、对环境污染小等优点被广泛应用于输配电系统中^[1-2]。环氧制备的盆式绝缘子作为GIS的主要支撑绝缘,实际运行中由于“三结合点”处场强畸变、表面缺陷、微小金属颗粒或异物等,加压阶段将引起表面电荷的大量沉积和注入^[15-18],严重情况下将引发持续性沿面闪络,对设备和电网安全运行造成严重影响^[16-18]。因此,亟需开展对沿面闪络过程中表面电荷动态变化过程的相关分析。

表面电位常用于表征材料表面电荷动态特性。基于静电电压表的测量方案操作简单,且探针与被测面间基本无电场,能够减小探针对表面电荷动态特性的影响^[19]。目前基于静电电压表的表面电位测量方案采用先处理后测量的方式,先对试样施加电压,随后迅速将试样移至静电电压表探头下方或者将静电电压表探头移至试样上方,测量短路过程中表面电位的衰减变化^[18,20-21]。由于传统基于静

电电压表的表面电位测量方案受限于静电电压表探针与高压电极位置矛盾,无法实现对加压阶段以及加压与短路测量切换阶段的表面电位测量,研究内容局限于短路阶段表面电位的衰减过程。然而运行中的设备由于存在金属颗粒、绝缘损伤等缺陷,引发沿面闪络情况发生在加压阶段,因此加压阶段表面电荷的积聚特性对于评价材料耐闪络性能具有重要意义^[22]。在短路阶段表面电位衰减特性研究中,短路起始时刻表面电位的衰减对电荷迁移率的计算至关重要^[23],需要对短路和加压切换阶段的表面电位进行测量,然而先前的实验装置均无法满足加压阶段的表面电位测量要求。

文中提出一种非介入式表面电位测量方案,能够实现对加压阶段的表面电位测量,并通过有限元软件对实验装置的可行性进行仿真分析。利用该装置结合指形电极沿面闪络装置实现对环氧试样在闪络前和闪络过程中的表面电位测量,通过表面电位变化分析闪络过程中表面电荷的动态特性。

1 实验方法

1.1 试样制备

实验试样为添加纳米SiO₂质量分数为2%的环氧试样。试样采用“共混法”制备^[21],将双酚A环氧树脂与固化剂按照质量比1:1混合,并添加相应质量的纳米SiO₂,其中纳米SiO₂粒径为30 nm左右。将混合液在50℃的油浴中进行真空脱气处理,并磁力搅拌90 min。最后,在140℃真空烘箱中将混合均匀并脱气完成的环氧原液浇筑在模具里。

收稿日期:2021-10-28;修回日期:2022-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007114)

1.2 非介入式表面电位装置

鉴于传统基于静电电压表的表面电位方案无法实现对加压阶段的表面电位测量。文中实验装置采用将静电电压表探针和闪络电极分置于试样两侧的方式,实现对加压阶段的非介入式表面电位测量。装置如图 1 所示,整个测试系统包括静电电压表及配用探头、指形闪络电极、高压源、高频电流互感器、示波器、三维移动模块、数据采集模块和计算机。将指形电极放置在环氧试样闪络面(下表面),采用尼龙底座作为绝缘支撑,指形电极间距 2 mm,静电电压表探头置于与高压指形电极指尖处同一铅垂线上的测量面(上表面)上方 3 mm 处。静电电压表探头的响应精度为 200 $\mu\text{s}/\text{kV}$,采集卡的采样频率为每秒 1 000 个采样点,三维移动模块移动精度为 0.1 mm。通过测量试样加压和闪络阶段测量面的表面电位进而分析闪络面表面电荷的动态变化过程。

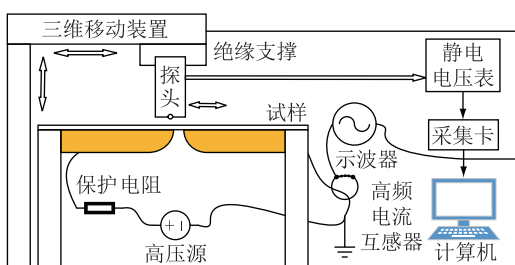


图 1 沿面闪络测量装置示意
Fig.1 Schematic diagram of flashover measurement device

1.3 实验装置可行性分析

为验证实验装置的可行性,将装置按照原始比例进行有限元仿真,如图 2 所示。实际状况中表面电位的变化须考虑表面电荷对表面电位产生的影响,因此采用静电场进行仿真。其中,指形电极头部曲率半径为 10 mm,2 个指形电极间距 2 mm,环氧试样厚度 0.4 mm,相对介电常数设为 3.2。考虑加压和闪络阶段表面电位受到指形电极施加电压和表面电荷两方面影响,且表面电荷沉积量与表面电位对应关系近似为 $1 \text{ pC}/\text{mm}^2$ 对应 300 V ^[24-25],将加压过程中指形电极电压设为 5 kV,为保证表面电荷与高压电极对表面电位的影响相当,在试样闪络面添加面密度为 $5 \times 10^{-7} \text{ C}/\text{m}^2$ 的表面电荷。

仿真结果如图 3 所示,加压阶段试样测量面和闪络面的表面电位大小和变化趋势基本一致,且试样高压电极指尖的“三结合点处”表面电位差值为 121 V,相较于闪络面上电压 5 000 V 仅变化 2.42%,表明在此情况下试样测量面的表面电位变化情况能够反映试样闪络面表面电位变化,进而通过对

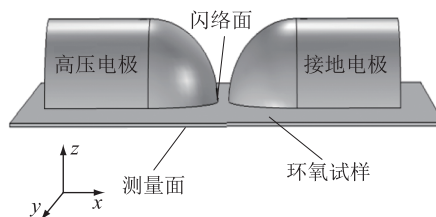


图 2 实验装置仿真

Fig.2 Simulation diagram of experiment device
量面的表面电位测量实现对闪络面的表面电荷动态特性分析。

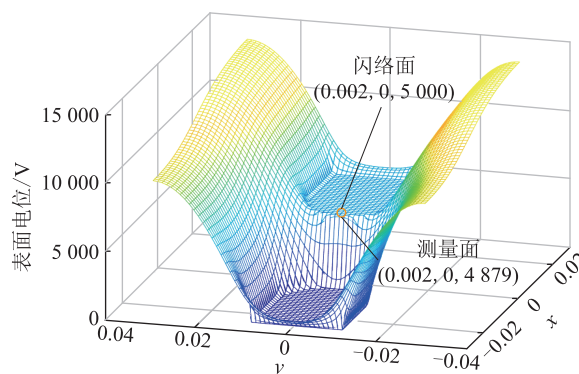


图 3 加压阶段测量面和闪络面的表面电位
Fig.3 Surface potential of measuring surface and flashover surface at high voltage stage

1.4 实验方案

实验在常温、大气环境中进行,采用指形电极进行沿面闪络测试。利用非介入式表面电位测量装置实现对环氧试样(添加纳米 SiO_2 质量分数为 2%)在高压指形电极指尖“三结合点”处的表面电位的测量,加压方式为阶梯式升压,其中起始电压设为 -2.5 kV,升压速率为 0.5 kV/5 min。对高压电极施加 0 kV,测量表面电位 5 min,基于表面电位是否在 0 V 附近判断试样表面和内部是否存在净电荷。整个过程由静电电压表探头进行表面电位测量并通过采集卡存入电脑,采样频率设为 1 kHz。

2 实验结果

2.1 闪络阶段的表面电位

高压电极三结合点处的表面电位测量结果如图 4(a)所示。当施加负极性电压时,在未施加电压阶段,表面电位维持在 0 V 附近波动,表明此时试样表面和内部不存在净电荷,排除残余电荷对后续试验结果的影响。当施加电压为 -2.5 kV 时,表面电位迅速下降至 -2 450 V,说明测试系统具有较好的响应特性。当施加电压提升至 -3 kV 时,表面电位下降约 500 V 且仍保持衰减趋势。随着电压的进一步提升,如图 4(b)所示,当施加电压为 -4 kV 时,表

面电位的衰减呈现了周期性回升现象,周期约为 40 s,此时出现微弱电晕声,说明三结合点处已经发生了电晕放电。当施加电压继续提升至 -4.5 kV 时,衰减阶段的周期性回升频率加快,周期约为 9 s,且此时电晕声音更加急促且强度变大。当施加电压为 -5 kV 时,如图 4(c) 所示,在起始 25 s 内,呈现间歇性沿面闪络现象,对应于表面电位的变化为一个向上的尖峰脉冲,且表面电位幅值出现极性反转现象。当间歇性闪络持续一段时间后表现为持续性闪络现象,此时表面电位呈现持续性尖峰现象,峰值相较于间歇性闪络低,约为 1 000 V,相邻尖峰间的闪络时间变短,约为 11 ms。此时指形电极间出现明显多条白色闪络通路,如图 5 所示,且呈现交替变化的现象,对应的闪络声音表现为“滋滋滋”的连续响声。在持续性闪络阶段出现局部峰值波动较大且发生极性反转现象,在波动较大的峰值之前均出现一定时长的闪络停滞期,如图 4(e) 所示。

2.2 分析与讨论

当施加电压不足以引发沿面闪络时,表面电位呈现衰减现象,这种现象与添加纳米 SiO_2 形成的纳米/环氧界面层有关。Maxwell-Wagner 界面极化^[10]引起表面电位呈现指数衰减,衰减时间常数与界面层有关。在施加电压提高的瞬间,表面电位也随之提高,但 Maxwell-Wagner 界面的极化过程仍未完成,表现为表面电位的进一步缓慢衰减。当施加电压为 -4 kV 时,出现电晕声,说明此时指形电极“三结合点”处发生了微弱的局部放电,放电提供了大量电子和正电荷,由于表面电阻率较高,电子沿表面迁移率低,电子沿表面泄漏至地电极,而局部放电产生的正电荷被负电极快速抽出,使得表面电位出现抬升现象。与此同时,电子沿试样表面的迁移泄漏过程使得表面电位进一步衰减,相邻 2 次上升的间隔时间约为 40 s。随着施加电压的进一步提升,电晕声更加明显,此时局部放电产生的电荷量更多,表面电导率提高,负电极对正电荷的快速抽出过程而引起的上升现象频率变快,相邻 2 次上升的间隔时间约为 9 s。

当施加电压达到闪络所需阈值时,发生沿面闪络现象,前期“三结合点处”积累的大量电子沿表面泄放的过程使得试样表面形成明显电流通路,高压电极与地电极接近短路状态,短路引起的 Maxwell-Wagner 界面去极化以及大量电子通过闪络通道泄放的过程使得表面电位出现极性反转现象。由于单次闪络放电将前期积累的电荷充分释放,电荷积累量再次超过闪络阈值需要一定的时间,且前期闪

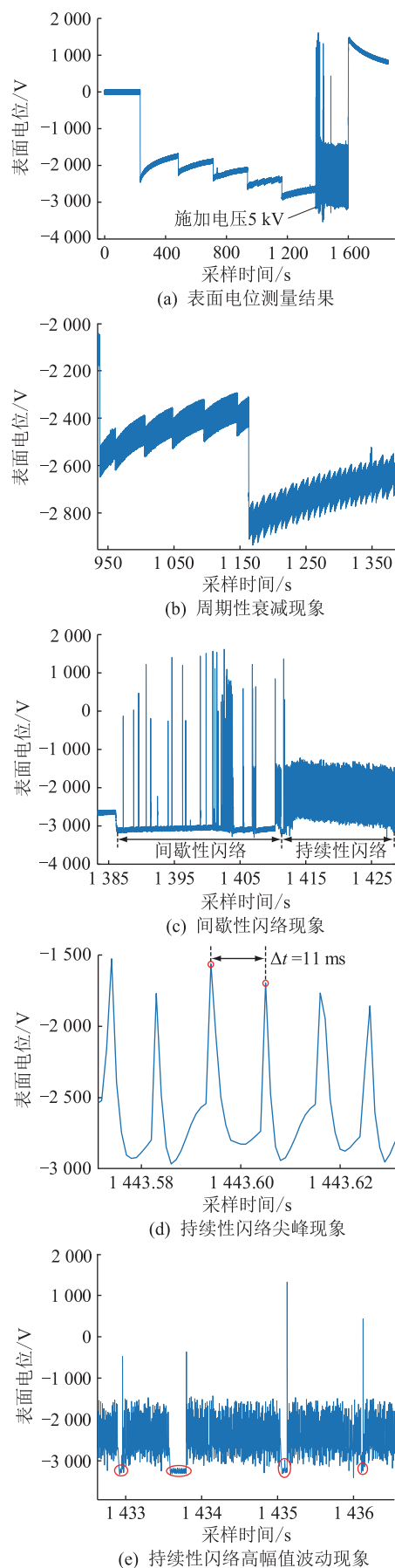


图 4 表面电位时域图

Fig.4 Surface potential time domain diagram



图5 环氧试样沿面闪络现象

Fig.5 Surface flashover phenomenon on epoxy sample

络引起的表面破坏程度小,因此呈现出间歇性闪络的现象。随着时间的推移,沿面闪络对表面形貌的破坏程度加剧,表面出现明显灼烧痕迹,三结合点处空气电离产生的电荷量更容易满足沿面闪络所需阈值,闪络频率加快,表现为持续性闪络现象,表面出现多条闪络通道交替变换的现象,且闪络引起的放电声更加急剧。由于单次放电所需电荷积累量阈值减小,沿面闪络引起的表面电位幅值波动相较于间歇性闪络较小。将相邻2次闪络尖峰的时间间隔定义为闪络间期,绘制持续性闪络阶段的直方图见图6。持续性闪络中闪络间期分布集中,且主要集中在10~13 ms,说明此时闪络更加剧烈且集中。图7中,闪络过程引起的表面电位幅值变化随闪络过程的进行在500~1100 V间波动。相较于间歇性闪络的极性反转现象,其幅值波动较小,说明持续性闪络发生所需积累电荷阈值比间歇性闪络低,更易引发闪络,表现为闪络间期较短且分布集中。单次闪络前积累的电荷量低,闪络通道引起的电荷泄漏量小,使闪络引起的表面电位幅值波动较小。在持续性闪络阶段出现局部峰值波动较大且发生极性反转现象,在波动较大的峰值之前均出现一定时长的闪络停滞期,说明经过闪络停滞期,电荷积累量增多,闪络引起的表面电位幅值波动变大。

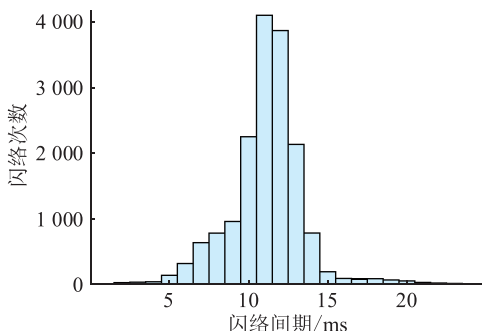


图6 持续性闪络的闪络间期直方图

Fig.6 Flashover interval histogram of continuous flashover

闪络前后扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 表面见图8。通过 SEM 分析试样闪络前后表面形貌变化可知,在放大倍率为10 000

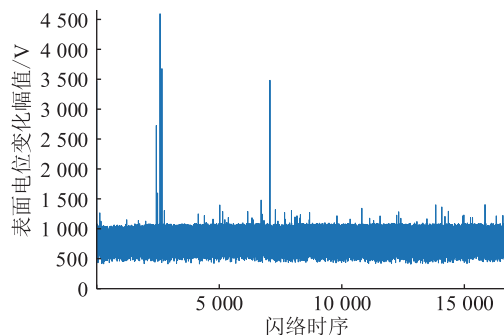
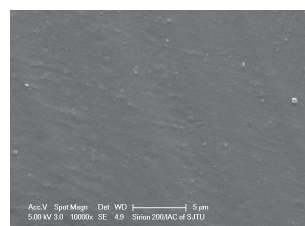


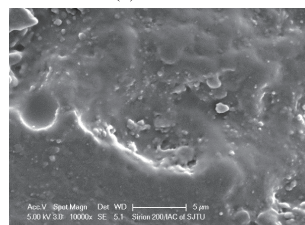
图7 闪络引起的表面电位幅值变化

Fig.7 Surface potential amplitude change caused by flashover

的情况下,持续性闪络使得原本光滑的表面出现清晰可见的灼烧痕迹。持续性闪络阶段灼烧痕迹使得闪络过程更容易发生,灼烧痕迹附近未闪络区域的表面形貌与闪络前基本一致,说明沿面闪络只在特定的通道内进行。



(a) 闪络前



(b) 闪络后

图8 闪络前后 SEM 表面

Fig.8 SEM surface before and after flashover

3 结论

文中通过对指形电极沿面闪络装置进行非介入式表面电位测量,对添加纳米 SiO₂ 质量分数为2%的环氧试样表面电位进行测量,其中加压步长为0.5 kV/5 min,得出结论如下:

(1) 当施加电压不足以引发闪络时,添加纳米材料引起的 Maxwell-Wagner 界面极化使得表面电位呈现衰减现象。当施加电压接近闪络电压时,表面电位衰减过程出现周期性回升现象,且回升现象出现的频率随施加电压升高而变快,闪络前表面电位衰减过程中的回升现象能够预测沿面闪络,对工程中监测和预防闪络具有指导意义。

(2) 当施加电压为5 kV时,发生沿面闪络现

象,闪络过程表现为间歇性闪络向持续性闪络的过渡。在间歇性闪络阶段,表面电位的幅值出现极性反转现象,其可能与瞬间短路引起的电子沿面泄漏和 Maxwell-Wagner 界面去极化有关。持续性闪络阶段表面电位的幅值波动相较于间歇性闪络要小且相邻闪络间期变短,其与持续性闪络引起表面灼烧通路更易于发生沿面闪络有关。闪络间期时长越短,说明闪络越剧烈。研究能作为评价指标评估绝缘材料的耐闪络性能。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“变压器绝缘内部放电深度分析技术研究服务”(SGTYHT/18-JS-206)资助,谨此致谢!

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] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术,2005,29(14):1-3.
YUAN Qingyun. Presentstate and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005,29(14):1-3.
- [3] 彭苏蔓,祝曦,吴建东,等. 温度和电场对 XLPE 与纳米 MgO/XLPE 电树枝生长过程中局部放电特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):4033-4043.
PENG Suman,ZHU Xi,WU Jiandong,et al. Effects of temperature and electric field on partial discharge characteristics during the growth of XLPE and nano-MgO/XLPE electrical tree [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2020,40(12):4033-4043.
- [4] 吴建东,尹毅. 周期电场下介电内部空间电荷的检测技术及应用[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1572-1581.
WU Jiandong,YIN Yi. Application of space charge detection technology in dielectrics under periodic stress[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1572-1581.
- [5] 钱恺羽,苏鹏飞,吴建东,等. 不同温度下高压直流电缆绝缘击穿场强的厚度效应[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7121-7130,7438.
QIAN Kaiyu,SU Pengfei,WU Jiandong,et al. The effect of thickness on breakdown strength in high voltage direct current cable insulation at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(24):7121-7130,7438.
- [6] 张昱,刘德远,周桂月,等. 高压直流电缆绝缘二维模型下空间电荷动力学仿真算法研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4615-4623.
ZHANG Yu,LIU Deyuan,ZHOU Guiyue,et al. Research on simulation algorithms for two dimensional models of space charge dynamics in high voltage DC cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(15):4615-4623.
- [7] 苏鹏飞,吴建东,祝曦,等. 脱气处理对直流电缆绝缘击穿场强的影响[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):663-672.
SU Pengfei,WU Jiandong,ZHU Xi,et al. Effect of degassing treatment on breakdown strength in direct current cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(2):663-672.
- [8] 许嘉轩,胡嘉磊,王亚林,等. 温度梯度下平板结构电声脉冲法空间电荷测量信号的恢复算法[J]. 高电压技术,2019,45(10):3335-3342.
XU Jiaxuan,HU Jialei,WANG Yalin,et al. Recovery algorithm of space charge measurement signal by PEA method for plate structures under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering,2019,45(10):3335-3342.
- [9] 范路,陈萌,张洪亮,等. 型式试验对高压直流电缆交联副产物迁移过程及电导特性的影响[J]. 电气工程学报,2018,13(11):44-51.
FAN Lu,CHEN Meng,ZHANG Hongliang,et al. Effect of type test on migration process of cross-linked by-products and conduction characteristics of HVDC cables [J]. Journal of Electrical Engineering,2018,13(11):44-51.
- [10] 张洪亮,肖晋宇,侯金鸣,等. 提高 XLPE 高压直流海缆经济性的研究展望[J]. 绝缘材料,2021,54(3):1-9.
ZHANG Hongliang,XIAO Jinyu,HOU Jinming,et al. Research prospect on improving economy of XLPE HVDC submarine cable[J]. Insulating Materials,2021,54(3):1-9.
- [11] 王雅妮,李光道,吴建东,等. 不同温度下高压直流电缆纳米复合绝缘中的周期性直流接地电树枝特性[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3674-3681,3388.
WANG Yani,LI Guangdao,WU Jiandong,et al. Characteristics of periodic DC grounding electrical tree branches in nanocomposite insulation of HVDC cables at different temperatures[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2016,36(13):3674-3681,3388.
- [12] 马人凤,朱永华,吴建东,等. 超高压直流电缆的国产化研究进展[J]. 绝缘材料,2016,49(11):1-8.
MA Renfeng,ZHU Yonghua,WU Jiandong,et al. Localization research progress of ultra-high voltage direct current cable[J]. Insulating Materials,2016,49(11):1-8.
- [13] 祝曦,林国海,张洪亮,等. 直流电压下 XLPE 电树枝化过程中的局部放电特性[J/OL]. 中国电机工程学报:1-11 [2021-11-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210908.1400.012.html>.
ZHU Xi,LIN Guohai,ZHANG Hongliang,et al. Partial discharge characteristics of XLPE during electrical treeing under DC voltage[J/OL]. Proceedings of the CSEE:1-11 [2021-11-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210908.1400.012.html>.
- [14] 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.
- [15] 范路,陆云才,陶风波,等. 人工智能在局部放电检测中的应用(二):模式识别与状态评估[J]. 绝缘材料,2021,54

- (7):10-24.
FAN Lu, LU Yuncai, TAO Fengbo, et al. Application of artificial intelligence in partial discharge detection part II: pattern recognition and condition assessment[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(7):10-24.
- [17] 陆云才, 范路, 陶风波, 等. 人工智能在局部放电检测中的应用(一):去噪与故障定位[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(5):10-20.
LU Yuncai, FAN Lu, TAO Fengbo, et al. Application of artificial intelligence in partial discharge detection part I: denoising and fault location[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(5):10-20.
- [18] 江渺, 李黎, 华奎, 等. 复合绝缘子界面缺陷对电场分布特性影响的仿真研究[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(4):138-144.
JIANG Miao, LI Li, HUA Kui, et al. Influence of interface defect on the electric field distribution of composite insulator[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(4):138-144.
- [19] 贾江波, 陶风波, 杨兰均, 等. GIS中不均匀直流电场下球状自由导电微粒运动分析[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(8):106-111.
JIA Jiangbo, TAO Fengbo, YANG Lanjun, et al. Motion analysis of spherical free conducting particle in non-uniform electric field of GIS under DC voltage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(8):106-111.
- [20] 李进, 杜伯学, 李忠磊, 等. 表面氟化对聚酰亚胺薄膜吸水特性及其击穿电压和表面电荷特性的影响[J]. *高电压技术*, 2016, 42(9):2943-2949.
LI Jin, DU Boxue, LI Zhonglei, et al. Effects of surface fluorination on the water absorption behaviors, breakdown voltage and surface charge characteristic of polyimide films[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9):2943-2949.
- [21] 刘孟佳, 周福升, 陈铮铮, 等. 采用等温表面电位衰减法表征LDPE与HDPE内陷阱的分布特性[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1):285-291.
LIU Mengjia, ZHOU Fusheng, CHEN Zhengzheng, et al. Characterizing trap distribution in LDPE and HDPE based on isothermal surface potential decay measurement[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1):285-291.
- [22] NORAS M A, PANDEY A. Evaluation of surface charge density with electrostatic voltmeter-measurement geometry considerations[C]//2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Edmonton, AB, Canada. IEEE, 2008:1-6.
- [23] 李昂. 基于高压直流GIS盆式绝缘子基材的环氧树脂表面电荷积累与抑制方法研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
LI Ang. Surface charge accumulation and suppression of epoxy resin regarding HVDC GIS spacer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [24] PERLMAN M M, SONNONSTINE T J, ST PIERRE J A. Drift mobility determinations using surface-potential decay in insulators[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(11):5016-5021.
- [25] ROY M, NELSON J K, MACCRONE R K, et al. Polymer nanocomposite dielectrics-the role of the interface[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, 12(4):629-643.

作者简介:



范路

范路(1997),男,博士在读,研究方向为表面电位测量及仿真研究(E-mail: fan-lu@sjtu.edu.cn);

耿伊雯(1997),女,硕士在读,研究方向为局部放电的深度存储与分析;

王亚林(1992),男,博士,副教授,研究方向为局部放电的测量技术。

Non-invasive surface potential measurement of surface flashover

FAN Lu, GENG Yiwen, WANG Yalin, YIN Yi

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Surface flashover is an important accident threatening the safe operation of gas-insulated switchgear (GIS). Non-invasive surface potential measurement for flashover test device with finger-shape electrodes is proposed, and the feasibility of this device is analyzed by finite element software. The results show that non-invasive measurement error is 2.42% under simulation parameter settings in this paper. Surface potential of epoxy with nano-SiO₂ mass fraction of 2% is measured using this device and the ascending applied voltage step is 0.5 kV/5 min. When the applied voltage is unable to induce flashover phenomenon, Maxwell-Wagner interface polarization caused by nanoparticle addition causes surface potential decay process. When the applied voltage approaches flashover voltage, surface potential presents periodic rise phenomenon in the decay process and the frequency of rise phenomenon becomes faster as the applied voltage higher. Periodic rise phenomenon in surface potential decay process before flashover can be used as a signal for predicting surface flashover. Fluctuation of surface potential in the continuous flashover process is smaller than that of intermittent flashover and the interval between adjacent flashover becomes shorter, which is related to the fact that surface burning path in the continuous flashover is prone to flashover. Surface potential measurement of DC flashover provides guidance for flashover prevention and flashover severity evaluation.

Keywords: three junction point; non-invasive; surface potential; continuous flashover; epoxy; flashover voltage

(编辑 钱悦)