

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.01.016

破损及湿污对35 kV复合绝缘子空间电场的影响

律方成^{1,2}, 王子豪¹, 牛雷雷¹, 李伟¹, 王胜辉², 谢庆^{1,2}

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防护重点实验室, 河北保定 071000; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102200)

摘要: 复合绝缘子在长期辐照、盐雾、鸟啄等因素的综合作用下,会产生伞裙护套破损及表面湿污等缺陷,威胁电力系统正常运行。文中搭建了基于EHP-50F电场传感器的绝缘子空间电场测试平台,建立了FXBW4-35/70棒形悬式复合绝缘子的1:1三维仿真模型,从试验和仿真两个方面研究了复合绝缘子伞裙护套破损及其表面存在湿污时的空间电场分布特征。结果表明:伞裙破损位置处空间电场强度下降,当破损位于低压侧时变化最大,试验和仿真值分别下降了23.29%和22.23%;护套破损位置处空间电场强度上升,且测量距离越小空间电场强度变化越大,当测量距离为3 cm时提高了0.098 kV/cm;破损绝缘子上的湿污会进一步畸变其场强,随 ρ_{ES} 的增加该畸变程度增加,当 $\rho_{\text{ES}}=1.5 \text{ mg/cm}^2$ 时,试验和仿真值分别提高了25.83%和23.35%。研究绝缘子伞裙护套破损及表面湿污情况下的空间电场分布特征对绝缘子表面状态监测等具有重要意义。

关键词: 复合绝缘子; 破损; 湿污; 电场传感器; 电场仿真

Influence of Damage and Wet Contamination on Spatial Electric Field of 35 kV Composite Insulator

LYU Fangcheng^{1,2}, WANG Zihao¹, NIU Leilei¹, LI Wei¹, WANG Shenghui², XIE Qing^{1,2}

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071000, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102200, China)

Abstract: Composite insulators, under such joint action as long term irradiation, salt spray and bird pecking, will produce such defects as damage to the shed sheath and surface contamination, and threaten normal operation of power system. The insulator space electric field test platform based on the EHP-50F electric field sensor is set up in this paper, and the 1:1 three-dimensional simulation model of the FXBW4-35/70 rod-shaped suspension composite insulator is set up. The characteristics of the spatial electric field distribution in case of shed sheath damage and as well as wet contamination on its surface of the composite insulator are studied from the aspects of both test and simulation. The results show that the spatial field strength at the damaged position of the shed decreases and the variation is maximum when the damage is at the low-voltage side. The test and simulated values have dropped by 23.29% and 22.23% respectively. The spatial electric field strength at the damaged position of the sheath increases. The smaller the measuring distance is, the greater the variation of the spatial field strength is. When the measurement distance is 3 cm, it has increased by 0.098 kV/cm. The wet contamination on the damaged insulator will further distort the field strength, and the magnitude of the distortion will increase with the increase of ρ_{ES} . When $\rho_{\text{ES}}=0.15 \text{ mg/cm}^2$, the test and simulation values are increased by 25.83% and 23.35% respectively. It is of great significance to study the characteristics of the spatial electric field distribution in case of shed sheath damage and wet contamination of surface of the composite insulator for the surface status monitoring of the insulator.

收稿日期:2025-06-13; 修回日期:2025-09-16

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01011900);国家电网公司科技项目(52062619002P)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2018YFF01011900), Science and Technology Project of SGCC (52062619002P).

Key words: composite insulator; damage; wet contamination; electric field sensor; simulation of current field

0 引言

与传统的玻璃和陶瓷绝缘材料相比,复合绝缘材料因其重量轻、强度高、绝缘性能好和运行维护简单的特点而广泛应用于电力系统^[1-6]。随着中国电力行业的发展,经济社会对电能质量的要求也进一步提升,复合绝缘子作为电力系统中的关键设备,要求其可长时间安全稳定运行^[7-8]。复合绝缘子在长期运行中受辐照、电晕放电、污秽、鸟啄等因素的共同作用,容易产生老化破损等缺陷^[9-15]。自然雾条件下污秽绝缘子的闪络电压下降^[16],伞裙或护套损伤会减小绝缘子表面的爬电距离进而降低其污闪电压^[17],污秽破损绝缘子在雨雾天气等工况下其闪络电压会进一步下降,给电力系统的正常运行带来巨大威胁。研究复合绝缘子护套破损及表面存在湿污时的空间电场分布特征对绝缘子运行工况诊断、表面状态监测具有重要意义。

国内外学者对此进行了相关研究:文[18]指出污秽绝缘子处于盐雾中会增加污闪事故的发生概率,盐雾对绝缘子电场强度的影响大于其对电位的影响;文[19]指出护套是鸟啄复合绝缘子的常见部位,环境中的污秽物在破损处聚集,强电场下引发污闪事故;文[20]基于有限元仿真研究了复合绝缘子存在内部导通性缺陷时其电场变化特征,并进行了试验验证;文[21-22]结合仿真计算和电场探头试验,研究了瓷质劣化绝缘子的空间电场分布,提出了一种劣化瓷绝缘子的带电检测方法;文[23]指出绝缘子运行状态与空间电场分布存在联系,不同湿污电导率下绝缘子周围电场分布存在差异;文[24]利用有限元仿真软件分析了绝缘子不同表面状态下的绝缘子空间电场分布特征,指出不同表面状态下其电场分布差异明显。上述文献集中研究了绝缘子内部导通性缺陷、劣化、运行状态与空间电场分布的关系,对35 kV伞裙及护套破损绝缘子及其表面存在湿污时的空间电场分布研究较少,需开展相关研究。

文中搭建了空间电场测试平台,研究了35 kV复合绝缘子护套破损及其表面湿污时的空间电场分布规律。基于现场收集的护套破损绝缘子,建立了1:1三维仿真模型,在电流场下仿真计算了绝缘子破损及表面污秽对空间电场分布特性的影响,仿真结果与试验结果具有一致性,对复合绝缘子运行

状态的监测具有一定指导意义。

1 试验及仿真平台

1.1 测量系统与实验方法

测量系统及接线示意图见图1,试验变压器型号为YTDW-1200/300,雾室尺寸1.9 m×1.9 m×2.3 m,超声波加湿器型号为OSR-09C,最大加湿量为9 kg/h。

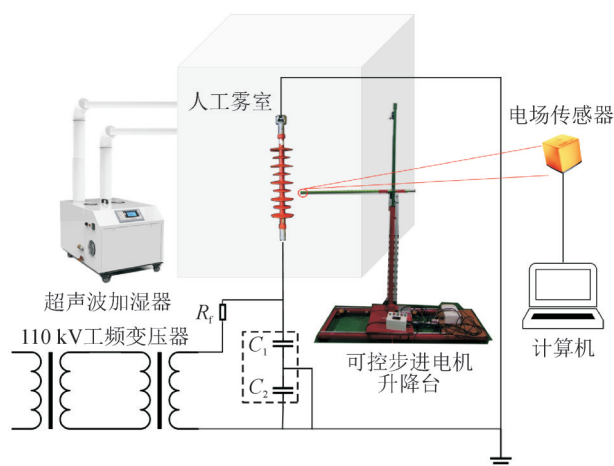


图1 测量系统

Fig. 1 Measurement system

复合绝缘子尺寸见图2,试验试品为FXBW4-35/70型复合绝缘子,结构高度690 mm,大伞直径140 mm,小伞直径100 mm,芯棒直径19 mm,绝缘护套厚3 mm,施加电压为20.2 kV,即正常挂网运行的绝缘子相电压。

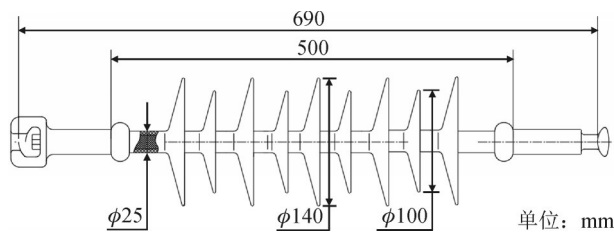


图2 复合绝缘子尺寸

Fig. 2 The size of composite insulator

电场传感器型号为EHP-50F,传感单元一致性、线性度良好,通过内置频谱分析仪实现了X、Y、Z轴的同时测量。试验时测量距离(传感器中心与芯棒轴心水平距离)设置为10 cm。从高压端到低压端选取12个电场探测点,每点重复测量3次并取其平均值。电场传感器控制系统可以对探头位置进行精细控制,调节范围为上下70 cm,前后30 cm,调节步长为1 mm。

为定量说明绝缘子空间电场变化情况,文中定义电场畸变值 e_s 及畸变率 α 的关系式为

$$\alpha = e_s / e_0 \quad (1)$$

式(1)中: e_s 为绝缘子破损处空间场强变化量; e_0 为完好绝缘子相应位置处空间场强。

根据现场护套破损情况^[17],分别在绝缘子的不同位置上设置了护套和伞裙破损,前者长、宽、深度分别为 30、15、3 mm;后者损伤半径为 28 mm,损伤面积为 1 438.81 mm²。采取固体涂层法在清洁绝缘子表面均匀涂污,晾干之后将染污绝缘子悬挂于人工雾室,加湿至其表面出现肉眼可见的小水珠^[25]。等值附盐密度(ESDD) ρ_{ES} 和灰密(NSDD) ρ_{NS} 的关系^[26]见式(2)

$$\sigma = 230 \times \rho_{ES} \times (\rho_{NS})^{0.575} \quad (2)$$

根据式(2),试验时,取灰密 ρ_{NS} 为 2 mg/cm², ρ_{ES} 为 0.03 mg/cm² 和 0.15 mg/cm²,其对应的电导率分别为 10.28 μ S/cm 和 51.39 μ S/cm,试验研究了湿污电导率对绝缘子空间电场分布的影响。

1.2 电场传感器标定

电场传感器标定用平板电极见图3。



图3 平板电极

Fig. 3 Plate electrode

图3中,两板之间的距离为 10 cm,将电场传感器置于平板电极之间,改变施加电压,通过电场的计算值和测量值标定电场传感器,施加电压与电场计算值的关系为

$$E = U/d \quad (3)$$

式(3)中: U 为施加电压; d 为板间距; E 为电场强度值,电场传感器测量结果与电场计算结果见图4。

拟合结果为

$$E = -0.000\ 4U^3 + 0.000\ 6U^2 + 0.097U + 0.005\ 6 \quad (4)$$

拟合关系式可决系数 $R_{\text{square}} = 0.990\ 9$,文中选用 RMS(root mean square)值衡量电场传感器测量结果与电场计算值之间的差异。

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (5)$$

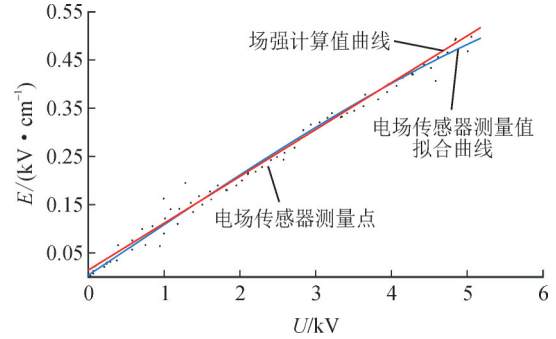


图4 标定结果

Fig. 4 Calibration result

式(5)中: x_i 和 y_i 分别为场强测量结果和计算结果; n 为数据点的个数。场强测量结果与计算结果之间 RMS 值为 0.018 5,可认为电场传感器能够准确测量空间电场。

1.3 三维仿真模型

根据棒形悬式复合绝缘子的具体参数建立了 1:1 三维电场仿真模型,改变绝缘子伞裙及护套的破损位置(高压端、中间位置和低压端)以研究其对电场分布的影响,破损位置和电场测量点分布见图5。

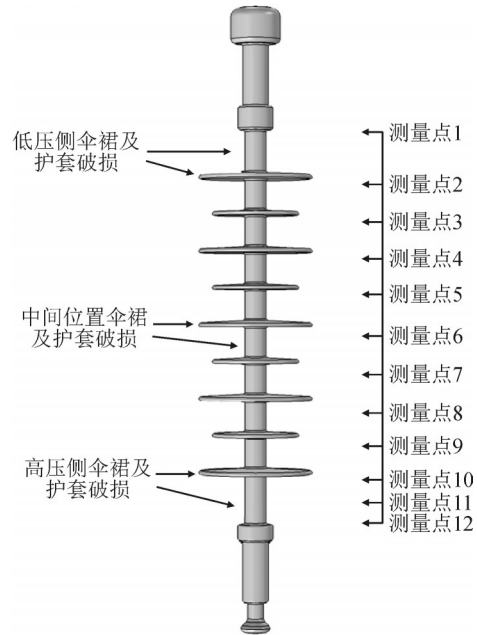


图5 三维仿真模型及测量点位置

Fig. 5 3D simulation model and measurement point location

图5中,以绝缘子高压侧护套破损时为例,破损位置位于高压铁脚与第一片伞裙之间,破损处测量点相对密集,以精确测量空间电场变化。污秽绝缘子电场呈阻容性分布^[27],文中仿真环境选择为电流场,绝缘子施加电压为 20.2 kV。空气、金具、伞裙护套及芯棒的材料参数见表1^[28-29]。

表1 仿真材料参数

Table 1 Simulation material parameters

材料	相对介电常数	电导率/(S·m ⁻¹)
空气	1.0	1×10 ⁻¹⁸
金具	1.0×10 ¹⁰	6×10 ⁷
伞裙护套	4.3	1×10 ⁻⁶
芯棒	6.0	1×10 ⁻⁸

覆盖在破损绝缘子表面的湿污相对介电常数设置为20^[30],根据式(2)设置湿污电导率,伞裙护套破损及测量距离与试验设置一致。

2 绝缘子破损对空间电场影响

2.1 伞裙破损

完好及不同位置伞裙破损绝缘子空间电场分布实验及仿真结果见图6。

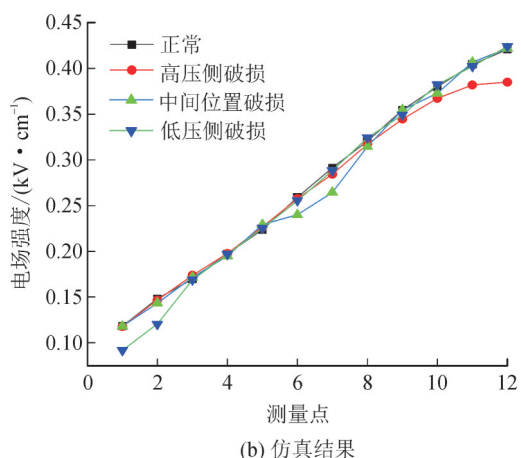
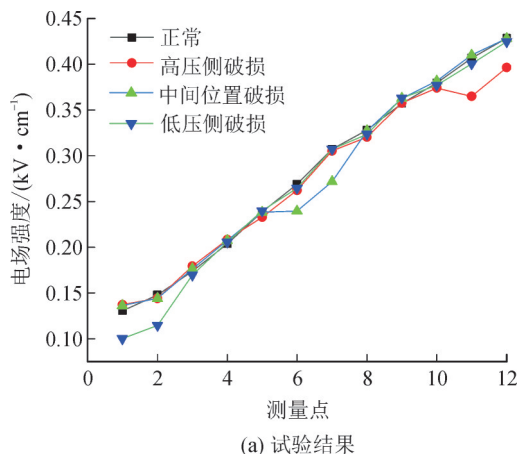


图6 伞裙破损绝缘子空间电场分布

Fig. 6 Spatial electric field distribution of umbrella skirt damaged insulator

图6中,测量距离为10 cm,试验和仿真得到的空间电场曲线单调上升。当绝缘子串完好时,空间电场分布呈现“U”字形^[20]。传感器距离绝缘子一定距离以内,得到的电场分布曲线才能接近理论的U形分布,距离越远,空间电场分布呈现从低压端到

高压端单调上升规律,文中的电场传感器与绝缘子的最小测量距离为10 cm,得到的电场变化趋势与文[31]中一致。

图6中,正常绝缘子最大、最小试验电场强度分别为0.428 3、0.130 7 kV/cm,仿真结果值与之基本一致。为了定量分析伞裙破损对电场分布的影响,分别计算了伞裙破损前后不同测量点空间电场试验及仿真畸变率见表2。

表2 伞裙破损绝缘子空间电场畸变率

Table 2 Distortion rate of spatial electric field of umbrella skirt damaged insulator

破损位置	平均畸变率/%		破损处畸变率/%	
	试验	仿真	试验	仿真
高压侧	3.34	2.46	-10.27	-8.47
中间位置	2.99	2.45	-11.49	-9.17
低压侧	6.51	4.13	-23.29	-22.23

从表2中试验数据可见,高压侧、中间位置、低压侧伞裙破损时,相应位置处电场强度分别下降了10.27%、11.49%、23.29%。其中平均畸变率为各测量点畸变率的平均值,其值均在7%以下,说明除破损处外其他位置空间场强与正常绝缘子并无明显差别。低压侧电场强度下降数值更为明显,这是因为低压侧空间电场强度较小,畸变率计算基数小。

2.2 护套破损

完好及不同位置护套破损绝缘子空间电场分布试验结果及仿真结果见图7。

从图7可以看出,护套破损绝缘子空间电场仍呈从低压侧到高压侧单调递增分布。护套破损前后空间电场畸变率见表3。由表3可知,不同位置护套破损时,其空间电场试验值分别上升了2.58%、5.2%、9.95%,说明护套破损会提升其附近空间电场强度。护套破损导致芯棒外露,相对介电常数发生改变,提升了其附近空间电场强度。

从表3还可以看出仿真平均畸变率略小于试验值,这是因为试验电源电压不能稳定,电压存在波动。虽然护套破损会提升周围空间电场强度,但提升值并不显著,可能是10 cm的测量位置测试灵敏度较低,为了找到最佳观测距离,改变观测点与绝缘子串之间的水平距离,测量距离分别为3、5、10 cm时的仿真电场畸变值见表4。

由于电场传感器有尺寸限制,无法近距离测量绝缘子空间电场,测量位置的灵敏度分析利用仿真方法完成。由表4可以看出,测量点距绝缘子越近,空间电场强度畸变值越大,且高压侧畸变值大于低压侧。测量距离3 cm,高压侧畸变值为0.098 kV/cm,场强增加明显,当测量距离为10 cm时,高压侧畸变

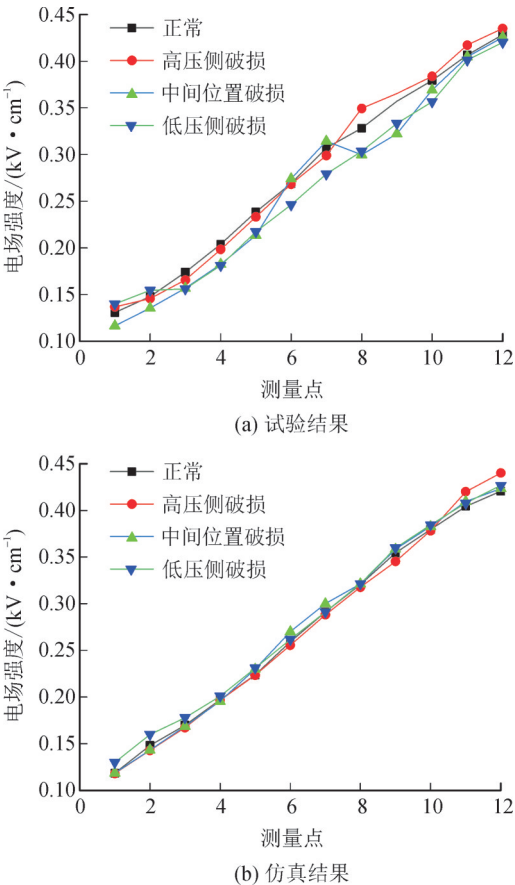


图 7 护套破损绝缘子空间电场分布

Fig. 7 Spatial electric field distribution of sheath damaged insulator

表 3 护套破损绝缘子空间电场畸变率

Table 3 The spatial electric field distortion rate of sheath damaged insulator

破损位置	平均畸变率/%		破损处畸变率/%	
	试验	仿真	试验	仿真
高压侧	2.74	1.61	2.58	4.64
中间位置	7.17	2.27	5.20	5.59
低压侧	5.71	3.18	9.95	9.61

表 4 测量位置不同时的空间电场畸变值

Table 4 Spatial electric field distortion when the measuring position is different

破损位置	电场畸变值/(kV·cm ⁻¹)		
	3 cm 畸变值	5 cm 畸变值	10 cm 畸变值
高压侧	0.098	0.065	0.016
中间位置	0.048	0.029	0.011
低压侧	0.019	0.014	0.009

值为 0.016 kV/cm, 比 3 cm 时下降了 5 倍左右, 破损造成的空间电场强度增强已经不再显著。

3 湿污对护套破损绝缘子空间电场影响

破损位置定为绝缘子中间位置, 分析湿污对其

空间电场的影响。绝缘子湿污对空间电场分布影响见图 8。

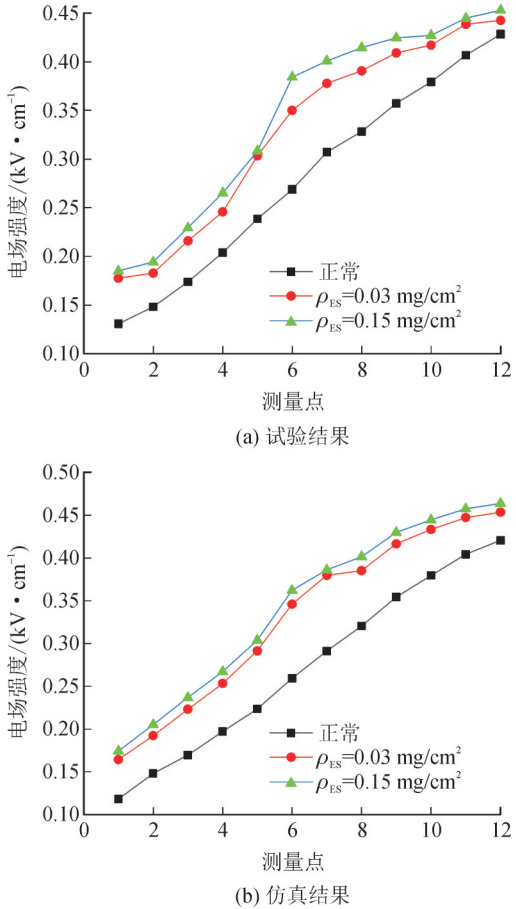


图 8 护套破损绝缘子空间电场分布

Fig. 8 Spatial electric field distribution of sheath damaged insulator

由图 8 可以看出, 湿污绝缘子空间电场分布仍呈现从低压端到高压端的单调递增分布。 $\rho_{ES} = 0.15 \text{ mg/cm}^2$ 时, 绝缘子最大、最小空间电场强度试验值分别为 0.45、0.185 kV/cm。不同湿污电导率时空间电场与正常绝缘子空间电场的畸变率见表 5。

由表 5 可以看出, 两种湿污电导率下, 空间电场强度试验值分别提高了 19.91% 和 25.83%, 破损处分别提升了 30.2% 和 42.87%, 这说明湿污的存在会进一步提高护套破损绝缘子空间电场强度, 且随着湿污电导率的提高, 绝缘子空间电场强度也随之提升。试验结果和仿真结果基本一致。

雨雾天过后, 污秽绝缘子表面会形成湿污进而提升其空间电场强度对其附近电力设备安全运行带来隐患, 建议定期清理绝缘子表面污秽。

4 结论

文中针对 35 kV 复合绝缘子伞裙护套破损及其表面存在湿污时的空间电场分布进行了试验及仿真研究。结论如下:

表5 湿污绝缘子空间电场畸变率

Table 5 Spatial electric field distortion rate of wet contaminated insulator

$\rho_{ES}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$	平均畸变率/%		破损处畸变率/%	
	试验	仿真	试验	仿真
0.03	19.91	21.41	30.20	26.48
0.15	25.83	23.35	42.87	42.67

1)绝缘子伞裙破损时,其空间电场强度在破损处下降,平均试验和仿真下降百分比分别为15.02%和13.29%。破损位于低压侧时变化最大,试验和仿真值分别下降了23.29%和22.23%,空间电场分布探测法对绝缘子伞裙破损缺陷检测有效。

2)绝缘子护套破损时,其空间电场强度在破损处上升,平均试验和仿真提升百分比分别为5.91%和6.61%。测量距离越近,探测到的空间电场强度增加量越大,当测量距离为3 cm时,高压侧破损处空间电场强度提高了0.098 kV/cm。空间电场分布探测法对绝缘子护套破损缺陷检测有效。

3)护套破损绝缘子表面存在湿污时,其空间电场强度会进一步提升,且随着湿污电导率的增加其空间电场强度提升幅度增加。 $\rho_{ES}=0.15\text{ mg/cm}^2$ 时,试验值提升25.83%,仿真值提升23.35%。空间电场分布探测法对护套破损绝缘子表面湿污检测有效。

参考文献:

- [1] 沈瑶,刘兴杰,梁英,等.基于硅橡胶分子链陷阱变化的复合绝缘子老化现象[J].电工技术学报,2024,39(17):5545-5554.
SHEN Yao, LIU Xingjie, LIANG Ying, et al. Aging phenomenon of composite insulators based on chemical traps' change of silicone rubber molecular chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5545-5554.
- [2] 周立玮,叶昊亮,李特,等.可见光干扰下复合绝缘子红外测试温度分布特征研究[J].智慧电力,2025,53(1):31-37.
ZHOU Liwei, YE Haoliang, LI Te, et al. Temperature distribution characteristics of composite insulator infrared test under visible light interference[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 31-37.
- [3] 谢庆,梁少栋,焦羽丰,等.不同电场下硅橡胶直流沿面闪络特性实验研究[J].绝缘材料,2018,51(3):58-63.
XIE Qing, LIANG Shaodong, JIAO Yufeng, et al. Experimental study on DC surface flashover characteristics of silicon rubber under different electric fields[J]. Insulating Materials, 2018, 51(3): 58-63.
- [4] 杨磊,张锐,武文华,等.复合绝缘子用硅橡胶材料设计性能和检测方法分析[J].电瓷避雷器,2024(1):187-192.
YANG Lei, ZHANG Rui, WU Wenhua, et al. Statistical analysis on design performance and test method of silicone rubber material for composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1): 187-192.
- [5] 刘贺晨,胡如法,刘云鹏,等.220 kV退役复合绝缘子芯棒整体

- 回收再利用可行性研究[J].电工技术学报,2024,39(11):3433-3443.
- LIU Hechen, HU Rufa, LIU Yunpeng, et al. Feasibility of the overall recycling of 220 kV retired composite insulator core rods[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3433-3443.
- [6] 周晨,周路遥,李特,等.浙江省内复合绝缘子断串及芯棒击穿故障分析[J].高压电器,2021,57(5):182-188.
ZHOU Chen, ZHOU Luyao, LI Te, et al. Fault analysis on string fracture and core breakdown of composite insulator in Zhejiang province[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 182-188.
 - [7] 刘会斌,张欣伟,王延伟,等.不同交联度下复合绝缘子用环氧树脂热力学性能分子动力学模拟[J].电瓷避雷器,2024(3):167-172.
LIU Huibin, ZHANG Xinwei, WANG Yanwei, et al. Molecular dynamics simulation of thermo dynamic properties of epoxy resin for composite insulator under different crosslinking degrees[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 167-172.
 - [8] 绳飞,曹留,刘玉龙,等.基于改进Mask R-CNN的复合绝缘子憎水性状态评估方法[J].电测与仪表,2025,62(4):73-80.
SHENG Fei, CAO Liu, LIU Yulong, et al. Evaluation method of hydrophobicity of composite insulators based on improved Mask R-CNN[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(4): 73-80.
 - [9] 王少华,李泽宇,张永,等.输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素分析[J].电瓷避雷器,2025(4):100-108.
WANG Shaohua, LI Zeyu, ZHANG Yong, et al. Factors affecting heating caused by pollution on composite insulators in transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(4): 100-108.
 - [10] 李稳,李化旭,杨力,等.超高压输电线路复合绝缘子不同位置缺陷下发热特性研究[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):246-252.
LI Wen, LI Huaxu, YANG Li, et al. Study on heating characteristics of composite insulators in EHV transmission lines under different position defects[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 246-252.
 - [11] 缪金,秦军,陈峻宇,等.基于高光谱成像的复合绝缘子表面污秽成分识别方法[J].浙江电力,2025,44(1):124-132.
MIAO Jin, QIN Jun, CHEN Junyu, et al. A method for identifying surface contamination components of composite insulators based on hyperspectral imaging[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 124-132.
 - [12] 曹雯,杨特,申巍,等.变湿度条件下不同老化程度复合绝缘子的红外温升行为及特征分析[J].电工技术学报,2025,40(17):5601-5614.
CAO Wen, YANG Te, SHEN Wei, et al. Infrared temperature rise behavior and characteristic analysis of composite insulators with different aging degrees under variable humidity conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(17): 5601-5614.
 - [13] 袁一钧,李飞,黄武鸿,等.华中地区500 kV架空线路复合绝缘子批量发热诊断分析研究[J].电瓷避雷器,2025(2):74-83.
YUAN Yijun, LI Fei, HUANG Wuhong, et al. Diagnostic analysis and study on batch heating of composite insulators of 500 kV overhead lines in central china[J]. Insulators and Surge Arresters,

- 2025(2):74-83.
- [14] 曹 雯, 李振涛, 申 巍, 等. 输电线路中污秽复合绝缘子异常发热研究[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(6): 60-68.
CAO Wen, LI Zhen涛, SHEN Wei, et al. Study on abnormal heating of polluted composite insulators in transmission lines[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(6): 60-68.
- [15] 漆思怡, 刘 威, 赵洪峰, 等. 潮湿环境下某 750 kV 架空线路复合绝缘子异常发热分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(6): 44-52.
QI Siyi, LIU Wei, ZHAO Hongfeng, et al. Abnormal heating of composite insulator in 750 kV overhead line under humid environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 44-52.
- [16] 孟志高, 蒋兴良, 董冰冰, 等. 自然雾条件下严重染污玻璃、复合绝缘子交流污闪特性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 65-71.
MENG Zhigao, JIANG Xingliang, DONG Bingbing, et al. AC pollution flashover characteristics of surged polluted glass and composite insulators under natural fog conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 65-71.
- [17] 胡建林, 李洋洋, 杨 威, 等. 伞裙损伤对 35 kV 棒形悬式复合绝缘子人工交流污闪特性的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 716-722.
HU Jianlin, LI Yangyang, YANG Wei, et al. The influence of umbrella skirt damage on the artificial AC pollution flashover characteristics of 35 kV rod suspension composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 716-722.
- [18] 马 政, 李彦哲, 吴有龙, 等. 高电导率盐碱雾条件下 FQBG-25 型染污绝缘子交流污闪特性[J]. 绝缘材料, 2020, 53(5): 90-96.
MA Zheng, LI Yanzhe, WU Youlong, et al. AC pollution flashover characteristics of FQBG - 25 polluted insulator under high conductivity of salt-alkali fog[J]. Insulating Materials, 2020, 53(5): 90-96.
- [19] 李俊防. 复合绝缘子防鸟害关键因素分析及防范措施[J]. 电气技术, 2015(11): 125-127.
LI Junfang. Analysis of key factors in preventing bird damage of composite insulators and preventive measures[J]. Electrical Engineering, 2015(11): 125-127.
- [20] 刘 杰, 贾伯岩, 张志猛, 等. 基于紧凑型光电传感器的复合绝缘子内部缺陷检测方法研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(1): 182-185.
LIU Jie, JIA Boyan, ZHANG Zhimeng, et al. Research on detection method of internal defects of composite insulator based on compact photoelectric sensor[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(1): 182-185.
- [21] 王 平, 李 抗, 耿江海, 等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 93-98.
WANG Ping, LI Kang, GENG Jianghai, et al. Research on the spatial electric field of 110 kV degraded porcelain suspension insulator [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 93-98.
- [22] 祝永坤, 孙 广, 高树永, 等. 基于光学电场传感技术的瓷质劣化绝缘子在线检测装置[J]. 电瓷避雷器, 2017(1): 138-142.
ZHU Yongkun, SUN Guang, GAO Shuyong, et al. On - line detection device of porcelain deteriorated insulator based on optical electric field sensor technology[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(1): 138-142.
- [23] ARSHAD A, NEKAHI A, MCMECKIN S G, et al. Effect of pollution severity on electric field distribution along a polymeric insulator[C]// 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). [S.l.]: IEEE, 2015: 612-615.
- [24] 黄宵宁, 刘 锦, 杨成顺, 等. 典型表面状态下的绝缘子空间电场特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 144-150.
HUANG Xiaoning, LIU Jin, YANG Chengshun, et al. Electric field characteristics of polluted insulator space under typical surface state[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 144-150.
- [25] 王 欣. 污秽对绝缘子串电压分布影响的仿真与实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
WANG Xin. Simulation and experimental research on the influence of pollution on the voltage distribution of insulator strings [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [26] 苑吉河. 输电线路绝缘子(串)交流污闪特性及放电过程的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
YUAN Jihe. Research on AC pollution flashover characteristics and discharge process of transmission line insulators (strings) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [27] 刘向实. 污秽条件下复合绝缘子电场仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 31-36.
LIU Xiangshi. Simulation study on the electric field of composite insulators under polluted conditions[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 31-36.
- [28] 胡 琴, 夏翰林, 蒋兴良, 等. 涂覆电热型涂料的复合绝缘子直流电场仿真与电气特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 6027-6034.
HU Qin, XIA Hanlin, JIANG Xingliang, et al. DC electric field simulation and electric characteristics test of composite insulator coated with electrothermal paint[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6027-6034.
- [29] 胡元潮, 逢春涛, 安韵竹, 等. 鸟粪对 35 kV 一体化防雷绝缘子电场分布影响研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 105-111.
HU Yuanchao, PANG Chuntao, AN Yunzhu, et al. Influence of bird manure on electric field distribution of 35 kV integrated lightning protection insulator[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 105-111.
- [30] 孙 超. 雾霾环境下接触网绝缘子电场分布的仿真研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
SUN Chao. Simulation study on electric field distribution of catenary insulators in haze environment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [31] 于洪海. 基于光学电场传感器的绝缘子劣化检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
YU Honghai. Research on insulator degradation detection technology based on optical electric field sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

律方成(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备绝缘机理、电气设备在线监测与故障诊断、电气设备状态检修等(E-mail: lfc@ncepu.edu.cn)。

王子豪(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输变电设备在线监测与故障诊断(通信作者)(E-mail: 1244147754@qq.com)。

谢 庆(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备在线监测(E-mail: xq_ncepu@126.com)。