

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240653

强暴雨天气下复合悬式绝缘子交流闪络特性

胡琴¹ 陈旭烨¹ 闻君² 荣文奇¹ 魏亚楠²

(1. 重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站 重庆 400044

2. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司 温州 325000)

摘要 在强暴雨天气下,输电线路复合悬式绝缘子串易因瞬时降雨强度骤升、雨柱桥接伞裙间隙而导致爬电距离利用率降低,引发输电线路雨闪事故。为研究强暴雨天气下复合悬式绝缘子的交流闪络特性,该文以五种不同伞裙结构的复合绝缘子为试品,进行强降雨条件下的人工淋雨交流闪络试验。结果表明:单位绝缘高度淋雨闪络电压与降雨强度、雨水电导率分别呈负指数幂函数关系,两种影响因素单独作用下的电压梯度降幅分别可达41.9%、43.8%;伞裙直径、伞间距较大的复合绝缘子受降雨强度的影响更为明显,受雨水电导率的影响与其余不同伞形参数的绝缘子基本一致;雨闪电压梯度受复合绝缘子大伞伞裙边沿雨柱最大长度以及雨柱在大伞间空气间隙的平均长度占比的影响;伞间距和伞裙直径较大的复合绝缘子大伞伞裙遮挡作用明显,雨柱难以桥接伞裙间隙,爬距利用率较高,可有效地提升绝缘子耐压水平;临界泄漏电流平均值随降雨强度和雨水电导率的增大而增大。该文可为强暴雨频发地区输电线路绝缘子的选型提供参考。

关键词: 强暴雨天气 交流闪络 复合悬式绝缘子 伞形结构 绝缘子选型

中图分类号: TM216

0 引言

随着全球气候变暖,强暴雨天气出现的频率日益升高,输电线路复合悬式绝缘子易因瞬时降雨强度骤升而出现雨闪事故,严重影响电网的安全稳定运行^[1]。据报道,2009年,巴西强暴雨天气下复合绝缘子闪络导致巴西18个州和巴拉圭发生大范围停电事故^[2]。国内的外绝缘事故中,绝缘子淋雨闪络的比例同样较高。1990年,葛洲坝电厂出现了悬式绝缘子雨闪爆炸事故,造成七台机组跳闸的严重损失;1999—2002年期间,青海地区贵同线多次出现大雨天气下复合绝缘子闪络事故;2004年,山东淄博35 kV李固线发生三相合成绝缘子淋雨闪络事故;2007年,佛山某线路发生复合绝缘子均压环和导线对B相相序牌放电^[3]。目前,强暴雨天气下复合绝缘子雨闪事故时有发生,不同伞裙参数下复合悬式绝缘子的交流雨闪特性尚缺乏足够的支撑^[4]。因此,研究强暴雨天气下复合悬式绝缘子的交流淋雨闪络特性具有重要意义。

目前,国内外学者通过模拟短时降雨条件研究了绝缘子伞裙结构、淋雨率、雨水电导率、绝缘高度、安装角度及表面污秽等因素影响下的绝缘子放电特性。张福增等研究了伞裙结构和淋雨情况对复合绝缘子及瓷支柱绝缘子污雨闪电压的影响,结果表明,伞间距影响污雨柱桥接现象,伞伸出增大爬电距离,淋雨量和雨水电导率对污雨闪电压的影响均呈幂函数关系^[5]。梁允等研究了强降雨条件下瓷绝缘子和玻璃绝缘子的交流闪络特性与闪络模型^[6]。刘琴等研究了复合支柱绝缘子的外绝缘特性,并发现随着降雨强度的增大,由于雨水冲刷带走表面污秽增多,单位爬距雨闪电压值逐渐降低并趋于饱和^[7]。华南理工大学研究团队对高压套管等复合支柱绝缘子进行了人工强降雨试验,得到了伞裙参数、淋雨率、雨水电导率和隔雨伞等因素对支柱绝缘子电场分布及雨闪电压的影响规律^[8-11]。刘蕾等研究了空心复合支柱绝缘子的冲击放电特性,结果表明,降雨强度对雷电冲击闪络电压的影响极小,而与操作冲击闪络电压呈负幂指数的关系^[12]。

复合悬式绝缘子因防污闪水平较高、机械强度较大等优点被广泛应用于输电线路中^[13-14],其杆径和伞裙直径均比大直径复合支柱绝缘子小,且两者

国网浙江省电力有限公司科技项目(B311WZ230001)和中央高校基本科研业务费(2023CDJYXTD-005)资助。

收稿日期 2024-04-25 改稿日期 2024-07-19

的伞裙结构和爬电距离均有明显不同, 故悬式绝缘子与支柱绝缘子的雨闪规律不能等同, 而目前针对复合悬式绝缘子的淋雨放电规律研究尚少。因此, 本文对五种不同伞形参数的复合悬式绝缘子进行强降雨条件下的交流闪络试验, 并结合伞裙边沿雨柱长度、仿真模型、电弧发展路径和临界泄漏电流研究降雨强度和雨水电导率对绝缘子交流闪络特性的影响规律。研究结果可为强暴雨频发地区绝缘子的选型及防雨闪措施的选择提供参考。

1 试品、试验装置及试验方法

本文选用的洁净试品绝缘子型号为 FXBW-220/100, 主要技术参数见表 1, 符合交流系统装置上的棒形悬式复合绝缘子的技术标准^[15]。表 1 中, D_1 、 D_2 、 D_3 分别为大、中、小伞裙径; d_1 、 d_2 、 d_3 分别为大-大、大-中、大-小伞裙间距; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为大、中、小伞裙数量。

表 1 绝缘子主要技术参数

Tab.1 The main technical parameters of insulators

编号	干弧距离 L/mm	杆径 D/mm	伞裙直径 $D_1, D_2, D_3/mm$	伞间距 $d_1, d_2, d_3/mm$	各伞裙数量 n_1, n_2, n_3	伞裙结构
I	2 092	27	140, 无, 106	72, 无, 36	25, 无, 25	1 大 1 小
II	1 934	28	147, 无, 112	77, 无, 38.5	24, 无, 24	1 大 1 小
III	2 260	27	120, 无, 80	81, 无, 27	27, 无, 54	1 大 2 小
IV	1 960	28	175, 无, 90	93, 无, 31	19, 无, 38	1 大 2 小
V	2 037	27	130, 100, 70	108, 54, 27	20, 20, 40	1 大 1 小 1 中 1 小

强降雨条件下的交流闪络试验在输变电装备技术全国重点实验室的人工气候室中进行, 试验电源采用符合 IEC 标准的 YDTW-500 kV/2 000 kV·A 工频试验变压器^[16]。绝缘子下方钢脚为高压端, 上方帽帽为接地端, 交流试验原理示意图如图 1 所示。

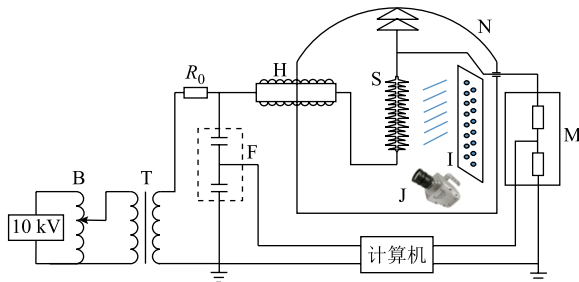


图 1 交流试验原理示意图

B—调压器 T—变压器 R_0 —保护电阻 H—330 kV 高压穿墙套管
S—试品 N—人工气候室 F—电容分压器 M—泄漏电流测量装置
I—淋雨架 J—高速摄像机

Fig.1 Schematic diagram of AC test connection

本文采用淋雨架并设置淋雨角度为 45° 以模拟自然降雨时风雨交加的情况^[17], 试验过程中采用 GB/T 775.2—2003 推荐的方形开口雨量计测量并调整降雨强度 H 。为保证降雨强度数据的有效性, 在试验起始和结束时均测量 3 min 时间段内的降雨强度并求取均值。采用 DDS-307A 型电导率仪测量雨水电导率 γ 。由于试验环境温度和气压会影响绝缘子的闪络电压^[18], 故控制环境温度为 $17.5\sim 20.5^\circ\text{C}$, 气压为 98.6 kPa。

由于伞裙边沿雨滴会增加绝缘子沿面电场和空气间隙电场的不均匀性, 且悬垂雨柱会缩短伞裙间的空气间隙, 使绝缘子易被击穿^[19-20], 因此伞间雨滴和雨柱的存在对绝缘子的雨闪电压和电弧发展过程有较大影响。由于雨水向下流动聚集, 悬式绝缘子下方伞裙雨柱长度较长, 故本文选取绝缘子上方接地端侧第二片大伞伞裙边沿雨柱最大长度为淋雨特性表征参数。伞裙边沿雨柱长度如图 2 所示。由于雨柱断裂后所剩悬垂雨柱往往会不断补充, 难以判断其雨柱最大长度, 因此选取由水滴发展形成且未曾发生断裂的雨柱进行测定。绝缘子边沿雨柱最大长度采用 Sony ILCE-6000 相机进行拍摄, 为减小数据分散性, 对每个试验条件下的绝缘子连续拍摄 30 张有效照片, 并将其均值记为该试验条件下的雨柱最大长度 x , 表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k \\ \sigma_x = \frac{1}{x_k} \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_k - x)^2} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为有效照片中平均雨柱最大长度, mm; x_k 为第 k 张照片中雨柱的最大长度, mm; K 为有效拍照总次数; σ_x 为雨柱最大长度数据的相对标准偏差。



(a) 雨柱断裂前 (b) 雨柱断裂后

图 2 伞裙边沿雨柱长度

Fig.2 The length of rain shed along the edge of the shed

本文采用均匀升压法进行加压试验^[21], 开启淋雨架待绝缘子表面雨水全覆盖后对绝缘子连续均匀地施加交流电压直至闪络, 每串试品每个试验条件下进行 5 次试验, 取与平均值误差在 10% 以内的所

有闪络电压的均值为该淋雨条件下绝缘子的雨闪电压, 即

$$\begin{cases} U_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \\ \sigma_u = \frac{1}{U_f} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_f)^2} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中, U_f 为复合悬式绝缘子串雨闪电压, kV; U_i 为第 i 次试验的雨闪电压值, kV; N 为有效试验总次数; σ_u 为试验数据的相对标准偏差。强降雨条件下单位绝缘高度交流闪络电压值 E_h 计算式为

$$E_h = \frac{U_f}{L} \quad (3)$$

2 试验结果分析

2.1 降雨强度对绝缘子交流闪络特性的影响

近年来, 强暴雨天气下我国部分地区瞬时降雨强度最高可达 12.38 mm/min^[22-23], 文献[10]推算瞬

时降雨强度后发现其普遍大于 2 mm/min, 最大可达 12 mm/min。因此综合考虑我国短时强降雨特征及多功能人工气候室的条件, 同时为模拟自然降雨的极端情况, 瞬时降雨强度模拟值将适当取大, 故本文选取 3、9、15 mm/min 三个降雨强度等级进行人工淋雨闪络试验。

我国自然界雨水电导率变化范围一般在 30~500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间^[24], 近年来我国部分地区雨水电导率最高可达 679 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ^[25]。在实际运行的输电线路中, 绝缘子和导线表面均有可能积污, 雨水冲刷时混合的污液电导率将短时增大, 在模拟人工淋雨试验中, 需考虑比实际记录值更大的雨水电导率, 故本文选取 320、600、900、1 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 来模拟不同污染程度下的强降雨电导率。不同降雨强度 H 、雨水电导率 γ 下复合绝缘子单位绝缘高度交流闪络电压 E_h 和标准偏差 σ_u 见表 2, 复合绝缘子上方接地侧第二片大伞伞裙边沿雨柱最大长度 x 和标准偏差 σ_x 见表 3。

表 2 不同 H 、 γ 下复合绝缘子单位绝缘高度交流闪络电压试验值

Tab.2 AC flashover voltage test values of composite insulators per unit insulation height under different H and γ

$\gamma/(\mu\text{S}/\text{cm})$	$H/(\text{mm}/\text{min})$	I 号		II 号		III 号		IV 号		V 号	
		$E_h/(\text{kV}/\text{m})$	$\sigma_u(\%)$	$E_h/(\text{kV}/\text{m})$	$\sigma_u(\%)$	$E_h/(\text{kV}/\text{m})$	$\sigma_u(\%)$	$E_h/(\text{kV}/\text{m})$	$\sigma_u(\%)$	$E_h/(\text{kV}/\text{m})$	$\sigma_u(\%)$
320	3	289.8	3.6	322.0	2.6	326.6	1.0	342.2	3.3	294.6	3.7
	9	253.9	4.3	264.9	3.5	284.8	3.8	299.6	1.7	257.7	2.4
	15	233.0	2.1	249.8	1.1	248.0	1.7	235.4	2.9	235.6	1.6
600	3	256.9	2.5	264.1	1.9	277.8	2.5	293.3	2.1	257.7	2.9
	9	212.1	3.9	217.2	3.1	212.1	2.9	235.1	3.0	198.8	3.5
	15	191.2	1.7	200.4	3.7	182.2	3.1	193.9	2.9	179.2	2.8
900	3	224.1	3.8	232.9	1.1	250.9	3.7	266.6	3.9	230.7	3.0
	9	179.3	2.6	189.3	2.0	191.2	2.6	208.6	2.4	179.2	2.6
	15	155.4	2.7	175.5	2.9	164.3	1.4	174.5	3.7	154.6	3.1
1 400	3	197.2	3.4	207.4	3.4	231.0	3.6	227.8	3.2	203.7	3.7
	9	155.4	2.9	167.5	3.9	173.2	2.8	174.3	3.6	159.5	2.8
	15	131.5	3.6	147.6	1.5	146.4	1.3	132.4	2.2	139.9	2.4

表 3 不同 H 、 γ 下伞裙边沿雨柱最大长度 x

Tab.3 The maximum length x of rain shed along the edge of the shed under different H and γ

$\gamma/(\mu\text{S}/\text{cm})$	$H/(\text{mm}/\text{min})$	I 号		II 号		III 号		IV 号		V 号	
		x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$
320	3	34.7	4.6	36.4	5.1	34.9	3.4	38.4	2.8	38.2	4.9
	9	37.2	6.5	41.8	4.5	37.7	2.6	42.3	3.7	41.6	5.3
	15	41.6	5.1	43.5	3.8	42.1	5.9	45.5	4.6	44.0	4.1
600	3	35.3	4.9	36.2	3.6	33.6	3.2	37.4	4.9	38.1	3.7
	9	37.7	3.7	40.1	2.5	36.5	4.7	43.0	5.4	42.8	2.2
	15	42.5	3.0	43.7	4.3	43.8	5.1	44.6	4.2	44.6	6.4
900	3	35.6	2.8	37.4	1.9	32.5	6.8	38.7	3.8	37.3	6.0
	9	37.5	4.4	39.6	3.7	35.7	2.0	42.8	3.1	42.0	4.5
	15	41.3	5.2	44.4	4.0	41.8	4.6	45.1	4.0	43.7	5.5

(续)

$\gamma/(\mu\text{S}/\text{cm})$	$H/(\text{mm}/\text{min})$	I 号		II 号		III 号		IV 号		V 号	
		x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$	x/mm	$\sigma_x(\%)$
1 400	3	34.8	6.4	37.3	6.8	33.1	5.5	37.9	2.9	37.6	4.8
	9	38.4	2.3	40.3	5.1	36.3	6.3	42.5	2.4	42.4	2.6
	15	42.9	3.7	44.4	5.9	42.7	6.1	45.2	6.6	44.1	3.2
雨柱长度在大伞间空气间隙的平均占比(%)		53.2		52.5		46.4		45.1		38.3	

将 $\gamma=900 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时不同降雨强度下单位绝缘高度的交流闪络电压值进行拟合可以发现, 复合绝缘子单位绝缘高度交流闪络电压 E_h 与降雨强度 H 之间更符合如式 (4) 所示的负指数幂函数的关系, 拟合结果如图 3 和表 4 所示。

$$E_h = AH^{-a} \quad (4)$$

式中, A 为系数, 与外界环境参数、绝缘子种类以及布置方式等因素有关; a 为降雨强度影响特征指数。 $\gamma=900 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时不同降雨强度下各绝缘子伞裙边沿雨柱最大长度 x 也展示在图 3 中。

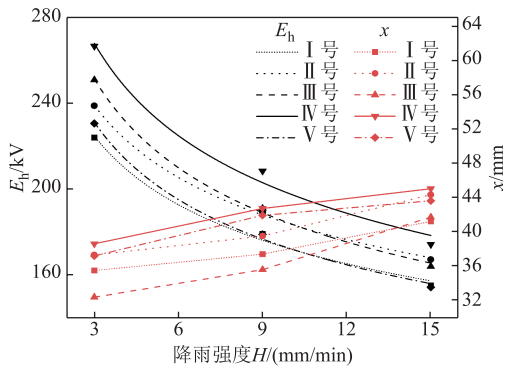


图 3 单位绝缘高度淋雨闪络电压 E_h 及雨柱最大长度 x 与降雨强度 H 的关系

Fig.3 The relationship between H and E_h as well as x

表 4 交流闪络电压与降雨强度拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of E_h and H

编号	A	a	R^2
I	286.51	0.220 7	0.988 7
II	303.97	0.218 2	0.998 5
III	333.91	0.258 5	0.996 7
IV	353.20	0.251 6	0.977 6
V	302.10	0.243 3	0.994 7

由图 3 和表 4 可知:

1) E_h 随 H 的增大而减小, 且具有一定的饱和趋势, 相比在降雨强度为 3 mm/min 的条件下, E_h 最大降幅可达 41.9%。当 $H=3\sim 9 \text{ mm}/\text{min}$ 时, 雨闪电电压梯度拟合曲线的斜率较大, E_h 降幅较大; 当 $H=9\sim$

15 mm/min 时, 拟合曲线的斜率较小, E_h 降幅较小。转折点 $H=9 \text{ mm}/\text{min}$ 的选取与极端降水阈值有关, 本文主要采用国际上通用、国内研究中常用的 99th 百分位法^[26]来定义极端降水阈值。根据广州市某气象观测站短时降雨强度的统计^[10]可知, 若降雨强度 $H \geq 9 \text{ mm}/\text{min}$ 的概率达 99%, 则可认为该地区极端短时降雨的强度阈值为 9 mm/min, 即 $H=9 \text{ mm}/\text{min}$ 也可看作非极端降雨与极端降雨的分界点。

同时, 伞裙边沿雨柱最大长度 x 随 H 的增大而增大, 导致雨柱在强暴雨条件下易桥接伞裙间隙而降低绝缘子的爬电距离利用率。相比复合支柱绝缘子, 悬式绝缘子的伞裙伸出差较大, 强降雨条件下绝缘子串的电场云图如图 4 所示, 其大伞边沿悬挂雨柱后电场强度更大, 电场畸变严重, 相比沿面闪络更易形成桥接伞裙间隙的电弧发展通路, 雨柱的存在会降低绝缘子的耐压水平。不同 H 下的电弧发展路径如图 5 所示。由图 5 可知, H 较小时, 较短的雨柱长度使得电弧沿着“雨柱-空气间隙-小伞伞裙表面”发展; H 较大时, 雨柱较长, 雨柱垂直方向空气间隙被直接击穿, 电弧发展路径为“雨柱-垂直方向空气间隙-大伞伞裙表面”。

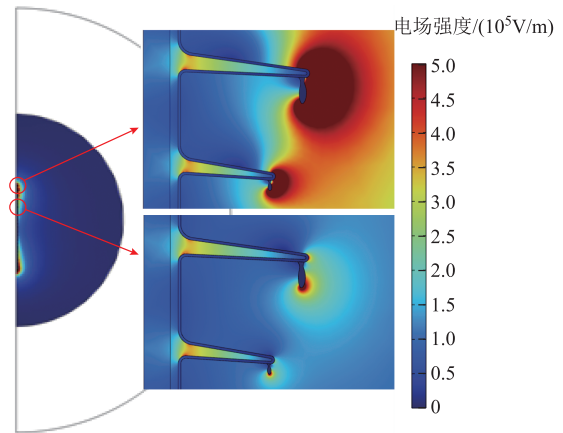


图 4 强降雨条件下绝缘子串电场云图

Fig.4 Insulator string electric field cloud map under heavy rainfall conditions

由图 4 可知, 伞裙和雨柱尖端电场畸变程度较高, 易激发电子促进电弧的发展, 且绝缘子电场强

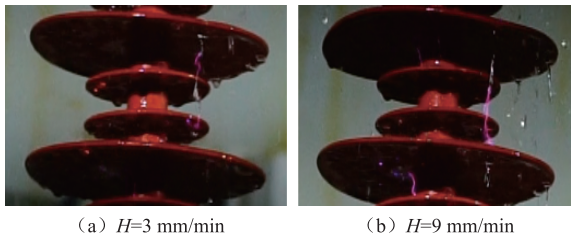


图5 不同H下的电弧发展路径

Fig.5 Development path of electric arc under different H 度呈两端高、中间低的分布规律。绝缘子平均电场强度与雨柱最大长度 x 的关系如图6所示,可知绝缘子大伞尖端处沿干弧距离的平均电场强度随着雨柱最大长度的增大而增大,此时雨柱长度的增大缩短了伞间空气间隙,提高了电场畸变程度,产生局部电弧的概率增大。

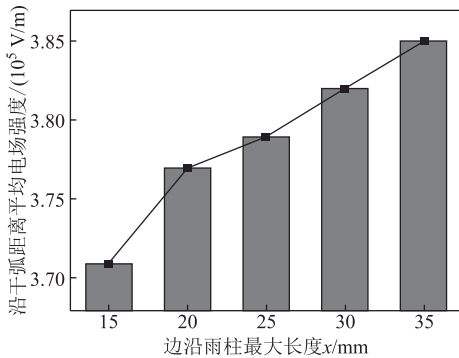


图6 平均电场强度与雨柱最大长度 x 的关系

Fig.6 The relationship between average field strength and x

2) 在相同降雨条件下,雨柱最大长度 $x_{IV} > x_V > x_{III} > x_{II} > x_I$ 。这是因为 x 与伞裙直径、伞间距、伞伸出差、杆径等伞形参数有关,IV、V号绝缘子伞间距较大,上方伞裙遮蔽作用较弱,两个大伞伞裙间受雨范围较大,受雨量较多,形成的悬垂雨柱根部直径和雨柱增长速度更大,形成的雨柱稳定性高,因此雨柱更长。IV号绝缘子大伞伞裙直径最大,不仅会增大伞裙表面受雨量,还会因复合绝缘子伞裙固有倾角的作用而增大雨水下滑的速度,因此会进一步增大雨柱最大长度。III号绝缘子虽然伞间距较大,但伞裙直径较小,因此边沿雨柱长度较小。

3) 五种绝缘子的降雨强度影响特征指数 a 分别为 0.220 7、0.218 7、0.258 5、0.251 6、0.243 3, III、IV、V号绝缘子的 a 值明显大于 I、II号绝缘子,其工频雨闪电压更易受到降雨强度的影响。这是因为 III、IV号绝缘子为“一大两小”型伞裙结构, V号绝缘子为“一大一小一中一小”型伞裙结构,比 I、II号“一大一小”交错布置的伞裙结构的伞间距更大。较大的伞间距将减弱绝缘子上方伞裙的遮

蔽作用,增大下方伞裙受雨面积和受雨量,导致 III、IV、V号绝缘子边沿雨柱长度随降雨强度的增大而增长的幅度较大,伞裙桥接效果更易受到 H 影响,间接地影响绝缘子雨闪电压,故 III、IV、V号绝缘子的 a 值更高。

由于雨柱长度增大不及伞间距增大的效果明显,因此 III、IV、V号绝缘子伞裙边沿雨柱长度在大伞间空气间隙的平均占比小于 I、II号绝缘子,所剩的空气间隙较长,雨水柱难以桥接伞裙间隙,爬距利用率较高。

4) I号和V号、II号和III号绝缘子的雨闪电压梯度拟合曲线均有明显交叉部分。这是因为 I号和V号、II号和III号绝缘子之间的伞形参数虽然差异较大,但是在强降雨条件下的绝缘效果相近,故雨闪电压梯度拟合曲线相距较近,同时由于 III号和V号绝缘子更容易受到降雨强度的影响,拟合曲线斜率较大,因此两组拟合曲线间均存在交叉点。同时,两组曲线的交叉点均出现在 $H=9$ mm/min 附近,这可能与 9 mm/min 恰为极端降雨强度界限有关。在非极端降雨条件下, I、II号绝缘子雨水桥接效果更明显,导致其雨闪电压梯度较小;在极端降雨条件下, III、V号绝缘子的雨水桥接效果同样较为严重,此时两组拟合曲线间的差距并不明显。

2.2 雨水电导率对绝缘子交流闪络特性的影响

对 $H=9$ mm/min 时不同 γ 下的单位绝缘高度交流闪络电压值进行拟合可以发现,复合绝缘子单位绝缘高度交流闪络电压 E_h 与雨水电导率 γ 之间更符合如式(5)所示的负指数幂函数的关系,拟合结果如图7和表5所示。

$$E_h = B\gamma^{-b} \tag{5}$$

式中, B 为系数; b 为雨水电导率影响特征指数。

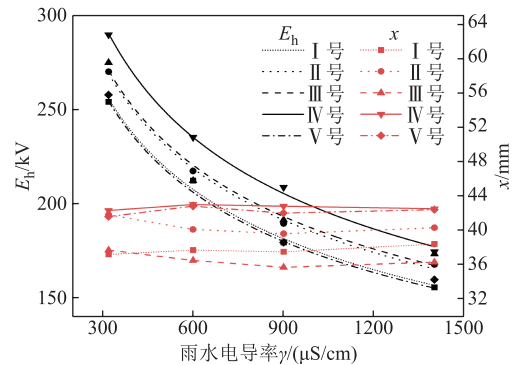


图7 单位绝缘高度淋雨闪络电压 E_h 及雨柱最大长度 x 与雨水电导率 γ 的关系

Fig.7 The relationship between γ and E_h as well as x

表 5 交流闪络电压与雨水电导率拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of E_h and γ

编号	B	b	R^2
I	1 742.41	0.332 7	0.991 8
II	1 802.96	0.329 9	0.997 1
III	1 779.37	0.326 5	0.967 7
IV	2 007.24	0.335 2	0.996 0
V	1 759.19	0.335 3	0.976 9

由图 7 和表 5 可知:

1) E_h 随着 γ 的增大而减小, 且逐渐趋于饱和, 相比在雨水电导率为 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的条件下, E_h 最大降幅可达 43.8%。这是因为 γ 增大使表面水膜中的 Na^+ 、 Cl^- 数量增多, 降低了绝缘子的表面电阻, 增大了泄漏电流, 电弧发展速度和放电强度升高; 同时, 水中带电粒子数增多加剧了伞裙尖端和雨柱的电场畸变程度, 电弧更易沿着雨柱发展, 形成桥接大伞伞裙的局部电弧, 因此降低了绝缘子的雨闪电电压梯度。

2) 五种绝缘子的雨水电导率影响特征指数 b 分别为 0.332 7、0.329 9、0.326 5、0.335 2、0.335 3, 并无明显差异, 说明不同伞形参数的复合绝缘子受雨水电导率的影响基本一致。这是因为伞形参数主要影响伞裙边沿雨柱长度, 而随着 γ 的增大, 雨柱最大长度基本不变, 雨水电导率与复合绝缘子伞沿雨柱长度和伞形参数均无关。

2.3 降雨强度和雨水电导率的共同影响

由 2.1 节和 2.2 节分析可知, 复合绝缘子单位绝缘高度淋雨闪络电压 E_h 与降雨强度 H 和雨水电导率 γ 均呈负指数幂函数的关系, 则令 E_h 与 H 、 γ 满足

$$E_h = CH^{-m}\gamma^{-n} \quad (6)$$

式中, C 为系数; m 为降雨强度影响特征指数; n 为雨水电导率影响特征指数。不同 H 、 γ 下复合绝缘子雨闪电电压梯度拟合曲线和拟合参数分别如图 8 和表 6 所示。

由图 8 和表 6 可知:

1) H 和 γ 越大, E_h 越小, 且降幅越小。这是因为在 H 和 γ 均较大的条件下, 伞裙边沿雨柱较长, 缩短了伞间空气间隙, 悬垂雨柱尖端电场强度增大, 电场畸变程度加剧, 水中带电微粒动能增大^[27]。同时, 水中 Na^+ 、 Cl^- 等带电微粒数量增多, 不仅会增加悬垂雨柱的电场强度, 还会降低伞裙的表面电阻, 增大泄漏电流, 两者的共同作用使绝缘子更易被击

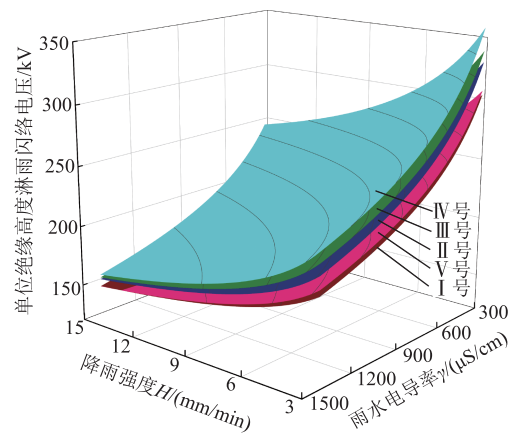


图 8 单位绝缘高度淋雨闪络电压 E_h 与 H 、 γ 的关系

Fig.8 The relationship between E_h and H as well as γ

表 6 交流闪络电压与 H 、 γ 拟合参数

Tab.6 Fitting parameters of E_h with H and γ

编号	C	m	n	R^2
I	2 239.37	0.179 6	0.312 0	0.967 7
II	2 470.21	0.175 3	0.319 0	0.995 4
III	2 513.05	0.222 6	0.304 7	0.955 2
IV	2 839.19	0.237 6	0.313 7	0.950 6
V	2 187.15	0.195 9	0.302 9	0.967 7

穿, 降低复合绝缘子的雨闪电电压梯度。

2) 复合绝缘子单位绝缘高度雨闪电电压近似有 $E_{h-IV} > E_{h-III} > E_{h-II} > E_{h-V} > E_{h-I}$ 。IV 号绝缘子伞间距和伞裙直径均较大, 大伞伞裙遮蔽作用明显, 且雨柱难以桥接伞裙间隙, 爬电距离利用率最高, 绝缘子的绝缘性能最佳, 故 E_h 最大; 反之, 虽然伞间距和伞裙直径均较小的 I 号绝缘子每组伞裙表面受雨量较小, 但雨柱在大伞间长度占比较大, 雨柱桥接效果明显, 故 E_h 最小; V 号绝缘子虽有极大的大伞间距, 但伞裙直径较小, 导致中型伞裙受雨量较大, 使其易与下方大伞桥接形成雨帘, 电弧易沿“大伞边沿雨柱-空气间隙-中伞伞裙-中伞边沿雨柱-大伞伞裙”发展, 故 E_h 较小。

3) 在 H 、 γ 共同影响下, m_{III} 、 m_V 接近, 且均大于相互接近的 m_I 、 m_{II} , 符合降雨强度单独作用下的影响特征。这是因为 I、II 号绝缘子伞裙结构相似, 在三种降雨强度下, 雨柱桥接效应都较为明显, 局部电弧通过悬垂雨柱的产生和发展, 导致 I、II 号绝缘子的 m 值较小; III、IV 号绝缘子伞裙结构相似, 降雨强度较低时雨柱难以完全桥接伞裙, 放电通道往往为空气间隙和伞裙表面相结合的复合路径, 而降雨强度较大时则会出现局部电弧直接沿垂

直空气间隙发展,因此III、IV号绝缘子受 H 的影响更明显。 n_I 、 n_{II} 、 n_{III} 、 n_{IV} 、 n_V 相近,说明雨水电导率对不同伞形结构绝缘子的影响基本一致,符合雨水电导率单独作用下的影响特征。

为了验证在降雨强度和雨水电导率综合影响下雨闪电电压梯度拟合公式的准确性,本文进一步开展不同条件下的人工淋雨交流闪络试验, E_h 的试验值及计算值见表7。由表7可知,试验值与计算值之间的相对误差均小于6%,说明式(6)的拟合结果与试验结果基本一致,验证了综合考虑双重影响因素的拟合公式的准确性。

表7 雨闪电电压梯度 E_h 的试验值及计算值

Tab.7 Experimental and calculated values of the rain lightning voltage gradient E_h

编号	$\gamma/(\mu\text{S}/\text{cm})$	$H/(\text{mm}/\text{min})$	试验值/ (kV/m)	计算值/ (kV/m)	相对误差 (%)
I	500	6	241.2	233.5	3.2
	500	12	210.7	206.2	2.1
	1 200	6	184.0	177.7	3.4
	1 200	12	160.6	156.9	2.3
II	500	6	254.9	248.5	2.5
	500	12	227.5	220.1	3.3
	1 200	6	186.1	188.0	1.0
	1 200	12	162.4	166.5	2.5
III	500	6	263.8	253.9	3.8
	500	12	225.7	217.6	3.6
	1 200	6	206.3	194.4	5.8
	1 200	12	175.0	166.6	4.8
IV	500	6	260.3	264.0	1.4
	500	12	218.5	223.9	2.5
	1 200	6	194.1	200.6	3.3
	1 200	12	164.9	170.2	3.2
V	500	6	239.5	234.4	2.1
	500	12	207.9	204.6	1.6
	1 200	6	184.0	179.8	2.3
	1 200	12	161.2	157.0	2.6

2.4 复合绝缘子交流淋雨闪络电弧发展过程

为探究绝缘子淋雨闪络前电弧发展过程和放电通道形成的规律,以IV号绝缘子为例,拍摄 $H=9\text{ mm}/\text{min}$ 、 $\gamma=900\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 条件下从起弧($t=0\text{ s}$)到闪络时刻的淋雨闪络过程,如图9所示;其电弧发展路径示意图如图10所示。

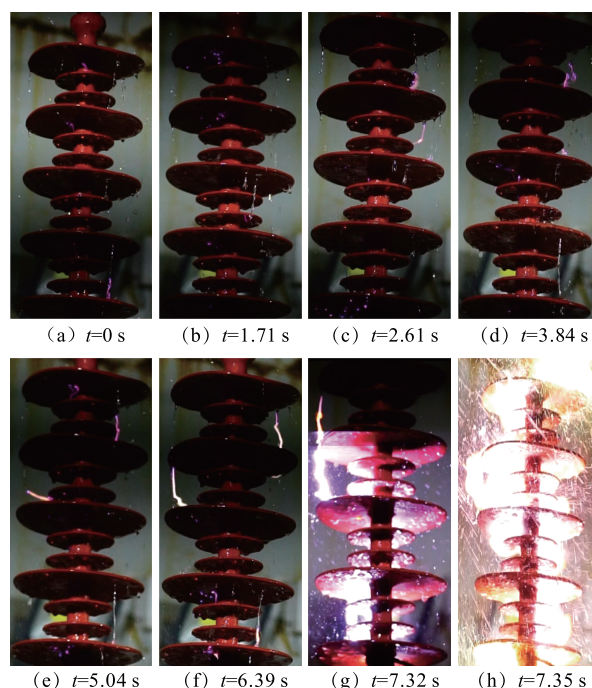


图9 IV号绝缘子交流闪络过程

Fig.9 The AC flashover process of Type-IV insulator

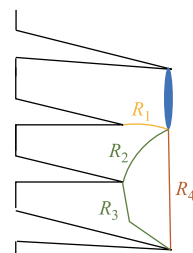


图10 IV号绝缘子电弧发展路径示意图

Fig.10 Schematic diagram of arc development path on Type-IV insulator

在初始放电阶段,当施加电压使雨柱尖端电场强度超过空气介电强度时,雨柱尖端电子获得大量能量,加速撞击空气分子并使其电离,引发的连锁反应将形成电子雪崩,增大绝缘子伞间空气间隙电场强度,并导致电离区域在雨柱尖端继续向伞裙表面发展,形成瞬态的流光放电^[28],如图9a、图9b所示。由于IV号绝缘子大伞间距较大,雨柱难以直接桥接伞裙间隙,在初始放电阶段短,雨柱尖端激发的电弧放电通道有多种路径,电弧可能沿着“ R_1/R_2 空气间隙-伞裙表面”或“ R_2 -伞裙边沿- R_3 ”等路径发展,电弧经过上述路径所利用的爬电距离均大于直接桥接大伞间隙,如图9a~图9d、图10所示。因此,伞间距增大将显著提高绝缘子爬距利用率和绝缘水平。

随着电压进一步升高,亮度较低、直径较细、长度较短的流光放电逐渐发展成明亮的电弧放电,

且放电通道的直径和长度均增大，单位时间内形成的电弧数量增多，此时对于长度较小的雨柱，极高的电场强度仍能击穿雨柱垂直方向上的空气间隙，从而完全桥接大伞伞裙，在降雨和强电场的作用下进一步降低爬电距离利用率，局部电弧更易发展成完全闪络，如图 9g 和图 9h 所示。

为进一步解释伞形结构对电弧放电通道的影响，采用高速摄像机拍摄 I 号、V 号绝缘子的闪络过程，如图 11 所示。可以看到，I 号绝缘子电弧基本桥接伞裙间隙，爬距利用率较低；而 V 号绝缘子电弧除桥接最大伞裙与其下方某一小伞伞裙外，其余伞裙电弧沿面发展居多；图 9h 所示的 IV 号绝缘子闪络通道同样显示出电弧沿面发展与间隙击穿同时存在，且爬距利用率较高的特点。这是因为相比于 I 号绝缘子，IV 号和 V 号绝缘子的伞间距和伞伸出差较大，在相同强降雨条件下，伞裙结构比雨柱长度对电弧发展过程的影响更大，雨柱难以桥接大伞间隙，故电弧多沿绝缘子表面发展，IV 号和 V 号绝缘子的绝缘水平更高。

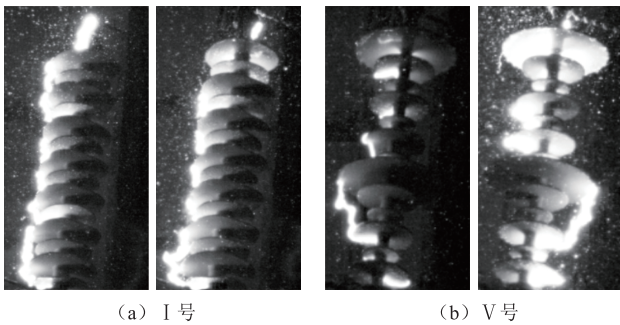


图 11 I 号和 V 号绝缘子完全闪络时电弧发展路径
Fig.11 Arc development path when Type-I and Type-V insulators experience complete flashover

2.5 淋雨闪络过程泄漏电流分析

本文采用临界泄漏电流 I_{CR} 对强暴雨天气下复合悬式绝缘子的交流闪络放电机理进行分析。以 I 号绝缘子为例，其临闪时刻泄漏电流波形如图 12 所示。由于强暴雨天气下复合悬式绝缘子交流闪络过程中的泄漏电流分散性较大，故计算并比较大量试验后的临界泄漏电流平均值，其结果见表 8。

由表 8 可知，临界泄漏电流 I_{CR} 平均值随 H 和 γ 的增大而增大。这是因为在降雨强度和雨水电导率均较大的条件下，水膜覆盖绝缘子表面的范围较大，表面雨水流速较快，且水中带电粒子数较多，将极大地降低绝缘子表面电阻，在所施电源电压不变时，表面电阻的降低将导致泄漏电流增加，使得

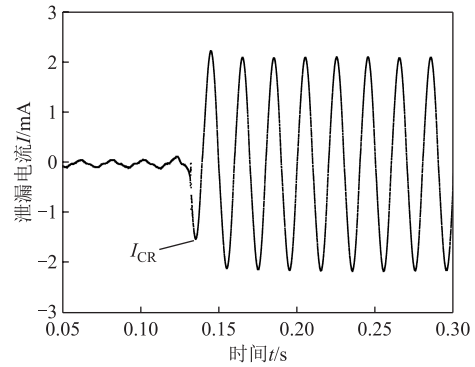


图 12 I 号绝缘子临闪时刻泄漏电流波形

Fig.12 Leakage current waveform at the moment of flashover of Type-I insulator

表 8 I 号绝缘子临界泄漏电流 I_{CR} 统计结果

Tab.8 Statistical results of critical leakage current for Type-I insulator

$\gamma/(\mu\text{S}/\text{cm})$	$H/(\text{mm}/\text{min})$	I 号绝缘子临界闪络电流 I_{CR}/mA		
		最小值	最大值	平均值
320	3	0.11	0.46	0.24
	9	0.38	0.92	0.51
	15	0.53	1.15	0.83
600	3	0.22	0.64	0.35
	9	0.41	1.09	0.74
	15	0.63	1.60	1.06
900	3	0.36	1.37	0.57
	9	0.62	1.59	0.93
	15	0.87	1.54	1.38
1 400	3	0.77	1.63	0.99
	9	0.95	1.88	1.43
	15	1.45	2.92	2.19

电弧所获得的能量增加，促进局部电弧的发展和闪络通道的形成。

3 结论

1) 复合绝缘子单位绝缘高度交流淋雨闪络电压与降雨强度呈负指数幂函数的关系，最大降幅可达 41.9%。伞沿雨柱最大长度随降雨强度的增大而增大，且各绝缘子的雨柱最大长度受伞裙直径和伞间距的影响而有所不同。伞裙直径、伞间距较大的绝缘子更易受降雨强度的影响。

2) 随着雨水电导率的增加，复合绝缘子单位绝缘高度交流雨闪电压呈负指数幂函数关系下降，最大降幅可达 43.8%。不同伞形参数的复合绝缘子受雨水电导率的影响基本一致。

3) 提出降雨强度和雨水电导率综合影响下的

复合绝缘子单位绝缘高度交流闪络电压计算公式,拟合计算值与试验值相对误差小于6%,一致性良好。

4)不同伞形参数的绝缘子电弧发展路径有显著区别,伞间距和伞裙直径较大的绝缘子电弧放电通道为空气间隙和伞裙表面相结合的复合路径,爬电距离利用率较高。

5)临界泄漏电流平均值随降雨强度和雨水电导率的增大而增大。在强暴雨天气下,为降低复合绝缘子表面泄漏电流,并避免雨水桥接伞裙而形成“雨柱-垂直方向空气间隙”的贯通电弧路径,更推荐在强暴雨频发地区选用伞间距、伞裙直径较大的复合绝缘子。

参考文献

- [1] 韦晓星,黎建平,楚金伟,等.换流站复合外绝缘应用及雨闪事故分析[J].高电压技术,2017,43(12): 3958-3963.
Wei Xiaoxing, Li Jianping, Chu Jinwei, et al. Application of composite insulators and analysis of rain flashover in converter stations[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3958-3963.
- [2] McDermid W, Black T. Experience with preventing external flashovers in HVDC converter stations[C]// Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, 2008: 81-84.
- [3] 周龙武.强暴雨条件下绝缘子串交流闪络特性与闪络模型研究[D].重庆:重庆大学,2013.
Zhou Longwu. Study on AC flashover performance and flashover model of insulator strings under heavy rainstorms[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [4] 李晓刚,谢敏,刘祝鸿,等.基于BP神经网络模型的复合绝缘子伞裙优化技术[J].高压电器,2022, 58(11): 98-105.
Li Xiaogang, Xie Min, Liu Zhuhong, et al. Optimization technology of composite insulator shed based on BP neural network model[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 98-105.
- [5] 张福增,赵锋,王黎明,等.高海拔地区复合支柱绝缘子的污雨闪特性[J].中国电机工程学报,2010, 30(1): 14-19.
Zhang Fuzeng, Zhao Feng, Wang Liming, et al. Wet flashover characteristic of composite post insulators at high altitudes[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 14-19.
- [6] 梁允,李哲,周龙武,等.强降雨条件下试验方式对瓷和玻璃绝缘子串交流闪络特性的影响[J].高压电器,2015,51(11): 199-204.
Liang Yun, Li Zhe, Zhou Longwu, et al. Effect of electrical test method on AC flashover voltage of porcelain and glass insulators in heavy rain[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 199-204.
- [7] 刘琴,谢梁,南敬,等.高压复合支柱绝缘子外绝缘特性及防冰伞应用[J].高电压技术,2020,46(8): 2872-2879.
Liu Qin, Xie Liang, Nan Jing, et al. External insulation characteristics and anti-ice umbrella application of HV composite post insulators[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2872-2879.
- [8] Yang Lin, Shang Gaofeng, Liao Yifan, et al. Full-time domain deformation characteristics of water drop on sheds edge causing insulation failure of large-diameter composite post insulators under heavy rainfall[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2022, 16(3): 181-192.
- [9] Sun Yijie, Yang Lin, Shang Gaofeng, et al. Effects of dynamic deformation of pendant water drops on the electric field between hollow porcelain insulator sheds under extreme rainfall[J]. High Voltage, 2022, 7(1): 86-97.
- [10] Yang Lin, Kuang Zhiqiang, Sun Yijie, et al. Study on surface rainwater and arc characteristics of high-voltage bushing with booster sheds under heavy rainfall[J]. IEEE Access, 2020, 8: 146865-146875.
- [11] Hao Yanpeng, Liao Yifan, Kuang Zhiqiang, et al. Experimental investigation on influence of shed parameters on surface rainwater characteristics of large-diameter composite post insulators under rain conditions[J]. Energies, 2020, 13(19): 5011.
- [12] 刘蕾,申萌,郝宇亮,等.强降雨下不同安装角度的空心复合绝缘子冲击闪络特性研究[J].电瓷避雷器,2021(4): 184-190.
Liu Lei, Shen Meng, Hao Yuliang, et al. Impulse flashover characteristics of hollow composite insulators with different installation angles under heavy rainfall[J]. Insulators and Surge Arresters,

- 2021(4): 184-190.
- [13] 黎鹏, 黎子晋, 王申华, 等. 基于微波透射法的复合绝缘子硅橡胶老化状态检测方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6503-6513.
Li Peng, Li Zijin, Wang Shenhua, et al. Aging state detection method of composite insulator silicone rubber based on microwave transmission method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6503-6513.
- [14] 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.
- [15] 国家能源局. 土500kV及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件: DL/T 810—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [16] 宋治波, 杨昊, 申巍, 等. 交流电压下伞型结构对染污绝缘子电弧路径及绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4116-4126.
Song Zhibo, Yang Hao, Shen Wei, et al. Influence of umbrella structure on the arc path and insulating properties of contaminated insulators under AC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4116-4126.
- [17] 国家能源局. 污秽条件高压瓷套管的人工淋雨试验方法: DL/T 383—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [18] Mizuno Y, Kusada H, Naito K. Effect of climatic conditions on contamination flashover voltage of insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(3): 286-289.
- [19] 侯纪勇, 徐志军, 程政, 等. 高海拔高电压等级调相机升压变压器套管的防雨闪措施[J]. 浙江电力, 2023, 42(4): 88-94.
Hou Jiyong, Xu Zhijun, Cheng Zheng, et al. A study on rain flashover protection measures for bushings of high voltage class stepup transformer with synchronous condenser at high altitudes[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(4): 88-94.
- [20] Liao Yifan, Wang Qiao, Yang Lin, et al. Discharge behavior and morphological characteristics of suspended water-drop on shed edge during rain flashover of polluted large-diameter post insulator[J]. Energies, 2021, 14(6): 1652.
- [21] 张东东, 罗威, 黄宵宁, 等. 染污绝缘子放电空间电场时频特性研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2873-2886.
Zhang Dongdong, Luo Wei, Huang Xiaoning, et al. Time and frequency domain characteristics of spatial electric field during the discharge of polluted insulator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2873-2886.
- [22] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 风雨对导线一杆塔空气间隙工频放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 845-850.
Hu Yi, Wang Linong, Shao Guiwei, et al. Influence of rain and wind on power frequency discharge characteristic of conductor-to-tower air gap[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 845-850.
- [23] 董冰冰, 宋家乐, 李特, 等. 强暴雨条件下棒-板间隙雨柱断裂特征仿真与试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6230-6240.
Dong Bingbing, Song Jiale, Li Te, et al. Simulation and experimental study of break-up characteristics of water streams in rod-plate air gap under heavy rain conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6230-6240.
- [24] 胡建林, 石璧, 杨晓辉, 等. 强降雨条件下空气间隙长波前操作冲击放电特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3888-3895.
Hu Jianlin, Shi Bi, Yang Xiaohui, et al. Discharge characteristics of air gap subject to long wavefront switching impulse voltage under heavy rain condition [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3888-3895.
- [25] 彭华东, 伍炜卫, 胡琴, 等. 雾水电导率对交流输电线路电晕放电量的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 548-553.
Peng Huadong, Wu Weiwei, Hu Qin, et al. Influence of impurity water conductivity on corona discharge quantity of AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 548-553.
- [26] 迟潇潇, 尹占娥, 王轩, 等. 我国极端降水阈值确定方法的对比研究[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 186-190.
Chi Xiaoxiao, Yin Zhane, Wang Xuan, et al. A comparison of methods for benchmarking the

- threshold of daily precipitation extremes in China[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 186-190.
- [27] 董冰冰, 宋家乐, 李特, 等. 强暴雨条件下 110 kV 硅橡胶绝缘子雷电冲击电弧发展过程与闪络特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 525-535.
- Dong Bingbing, Song Jiale, Li Te, et al. Lightning impulse arc development process and flashover characteristics of 110 kV SIR insulators under heavy rainstorms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 525-535.
- [28] 葛自良, 马宁生, 章昌奕. 空气中固体电介质上纳秒正脉冲表面放电过程[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 708-710.

Ge Ziliang, Ma Ningsheng, Zhang Changyi. Study on formation of surface discharge on dielectric plate under positive ns impulse voltage in air[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(6): 708-710.

作者简介

胡琴 男, 1981年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂环境电气外绝缘、电网防冰减灾技术。

E-mail: huqin@cqu.edu.cn

陈旭烨 男, 1999年生, 硕士研究生, 研究方向为复杂环境电气外绝缘及防护。

E-mail: 1085407010@qq.com (通信作者)

AC Flashover Characteristics of Composite Suspension Insulators under Heavy Rainstorm

Hu Qin¹ Chen Xuye¹ Wen Jun² Rong Wenqi¹ Wei Ya'nan²

(1. Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station

Chongqing University Chongqing 400044 China

2. State Grid Wenzhou Power Supply Company Wenzhou 325000 China)

Abstract With global climate warming, the frequency of heavy rainstorm events is increasing. During heavy rainstorms, composite suspension insulator strings are prone to reduced creepage distance utilization and potential rain flashover accidents due to the sudden increase in rain intensity and rain columns bridging the skirt gaps. Since the rod diameter and skirt diameter of composite suspension insulators are smaller than those of large-diameter composite pin insulators, and there are significant differences in skirt structure and creepage distance, the rain flashover characteristics of suspension insulators cannot be equated with pin insulators. Hence, there is insufficient data on the rain flashover characteristics of composite suspension insulators.

This paper conducts artificial rain flashover tests under strong rainfall conditions using five different skirt structures of composite insulators. It investigates the effects of rain intensity and water conductivity on insulator AC flashover characteristics by analyzing the rain column length at the skirt edge, simulation models, arc development paths, and critical leakage currents. A formula for calculating the unit insulator height AC flashover voltage under the combined effects of rain intensity and water conductivity is proposed and verified for accuracy.

Results indicate that the unit insulator height rain flashover voltage is negatively correlated with rain intensity and water conductivity, following an exponential decay function. The voltage gradient reduction can reach 41.9% and 43.8% respectively due to these factors. The rainfall intensity of 9 mm/min can be considered the tipping point between non-extreme and extreme rainfall. Additionally, composite insulators with larger skirt diameters and skirt spacings are more significantly affected by rain intensity, while the impact of water conductivity is consistent across different skirt parameters. When the rainfall intensity is low, the shorter rain column causes the arc to develop along the path of "rain column-air gap-small skirt surface". When the rainfall intensity is high, the rain column is longer, and the vertical air gap within the rain column is directly broken down, leading to the arc development path of "rain column-vertical air gap-large skirt surface".

In addition, the maximum length of the rain column at the skirt increases with rain intensity and varies with skirt diameter and spacing. The arc development path differs significantly among insulators with different skirt parameters. Insulators with larger skirt diameters and spacings exhibit a combined air gap and skirt surface

discharge path, with reduced rain column bridging the skirt gap due to effective skirt coverage, resulting in higher creepage utilization. Therefore, insulators with larger skirt diameters and spacings can effectively enhance the insulation strength. Due to the influence of the number of charged particles in the water and the area covered by the water film, the average critical leakage current increases with rain intensity and water conductivity, which increases the energy gained by the electric arc and promotes the development of local arcs and the formation of discharge channels. During heavy rainstorms, to reduce surface leakage current on composite insulators and prevent rainwater from bridging the skirts to form a “rain pillar-vertical air gap” continuous arc path, it is recommended to use composite insulators with larger inter-skirt spacing and skirt diameters in regions prone to frequent heavy rainfall.

Keywords: Heavy rainstorm, AC flashover, composite suspension insulators, shed configurations, insulator selection

(编辑 李 冰)