

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2025.04.010

# 含零值绝缘子串的雷击闪络特性与耐污闪性能 ——以湿污环境 35 kV 输电线路为例

夏燕玲<sup>1</sup>, 姚夏<sup>2</sup>, 万蕾<sup>1</sup>, 姚兆凤<sup>1</sup>

(1. 安庆职业技术学院机电工程学院, 安徽 安庆 246001;  
2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**雷暴发生前空气相对湿度可达 80%, 此时绝缘子表面污秽湿润且不导致污秽流失。在这种情况下, 绝缘子串极易发生雷击污闪事故, 增加设备发生故障的风险。瓷绝缘子在多因素作用下, 内绝缘发生劣化, 形成零值绝缘子, 导致绝缘性能降低。本文选取 35 kV 输电线路中运行年限已超 15 a 的瓷绝缘子, 在不同零值位置开展湿污条件下雷电冲击放电测试。结果表明:雷击污闪电压随等值盐密(equivalent salt deposit density, ESDD)增加而降低, 且成负幂指数关系;正常绝缘子串等值盐密影响特征指数为 0.318, 大于有零值绝缘子串情况;正常绝缘子串雷击闪络电压受到等值盐密的影响更为显著;零值绝缘子位置对雷击闪络电压有明显的影响, 湿污条件下零值位于高压端时闪络电压最小;加装大伞裙后, 绝缘子串雷击闪络电压受到等值盐密的影响程度减弱, 仅为 0.272;大伞裙布置位置不影响电弧干弧距离, 因此对污闪电压变化影响有限;加装大伞裙后, 污闪电压得到提升, 随着大伞裙外径增加, 污闪电压呈现明显的饱和趋势, 相同外径下, 大伞裙的污闪电压提升效果随等值盐密增加而增加。

**关键词:**污闪; 零值绝缘子; 雷电冲击; 放电特性

中图分类号: TM216 文献标志码: A 文章编号: 1673-1891(2025)04-0086-08

## Lightning Flashover Characteristics and Contamination Flashover Withstand Performance of Zero-Value Insulator Strings: Taking 35 kV Transmission Lines in Wet and Contaminated Environments as an Example

XIA Yanling<sup>1</sup>, YAO Xia<sup>2</sup>, WAN Lei<sup>1</sup>, YAO Zhaofeng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Anqing Vocational and Technical College, Anqing 246001, Anhui, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** Before the thunderstorm occurs, the relative humidity of the air can reach 80%, and the surface of the insulator is wet and does not cause pollution loss. In this case, the insulator string is prone to lightning pollution flashover accidents, increasing the risk of equipment failure. Under the action of multiple factors, the internal insulation of porcelain

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重点项目(2023AH053080、2024AH051154); 安徽省高等学校教学研究项目(2024jyxm1069)。

第一作者简介: 夏燕玲(1986—), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能控制、电气工程。E-mail: 654085927@qq.com。

insulators deteriorates to form zero-value insulators, resulting in further reduction of insulation performance. In this paper, porcelain insulators with a service life of more than 15 years in 35 kV transmission lines were selected to carry out lightning impulse discharge tests under wet pollution conditions at different zero values. The results show that the lightning pollution flashover voltage decreases with the increase of equivalent salt deposit density (ESDD), and has a negative exponential relationship. The characteristic index of equivalent salt density of normal insulator string is 0.318, which is greater than that of zero insulator string. The lightning flashover voltage of normal insulator string is more significantly affected by the equivalent salt density. The position of the zero value insulator has a significant effect on the lightning flashover voltage, and the flashover voltage is the smallest when the zero value is located at the high voltage end under wet pollution conditions. After the installation of the large umbrella skirt, the influence of the equivalent salt density on the lightning flashover voltage of the insulator string is weakened, only 0.272. The location of the large umbrella skirt does not affect the dry arc distance of the arc, so it has a limited impact on the change of the pollution flashover voltage. After the installation of the large umbrella skirt, the pollution flashover voltage is improved, and the position of the large umbrella skirt has limited influence on the pollution flashover voltage. With the increase of the outer diameter, there is an obvious saturation trend. Under the same outer diameter, the lifting effect of the large umbrella skirt increases with the increase of ESDD.

**Keywords:** dirty flash; zero-value insulators; lightning shocks; discharge characteristics

## 0 引言

瓷绝缘子因其机械强度高、电气绝缘性能强、使用寿命长等优点,在各电压等级的输电线路中得到了广泛的应用。但在长期强电场环境及高机械应力的恶劣工况下,其内部水泥黏合剂膨胀绝缘性能显著下降<sup>[1-2]</sup>。在雷击、操作等过电压作用下,绝缘子内部可能发生击穿,进而形成零值绝缘子<sup>[3-4]</sup>。实际运行数据表明,悬式绝缘子的年劣化率约为0.3%,某省电网多条输电线路4 a内相继发生了多起严重的因零值绝缘子闪络引发的断裂、导线坠落“掉串”事件<sup>[5-7]</sup>。雷暴发生前空气相对湿度可达80%,李春笋<sup>[8]</sup>、柴贾然<sup>[9]</sup>指出中国区域内的雷电活动与相对湿度有密切的关系,湿度增加有利于闪电活动的发生。在大雨前雷电活动剧烈,此时会出现小雨,绝缘子表面污秽湿润且不会导致污秽的流失,极易发生雷击污闪事故,增加设备受损和故障的风险。我国上海、贵州、福建等地发生了多起湿污绝缘子雷击闪络事故<sup>[10-11]</sup>。此时若叠加零值绝缘子劣化效应,输电线路的外绝缘性能将显著下降,增加线路设备受损和故障的风险。因此,研究湿污条件下35 kV含零值绝缘子串雷击闪络特性与耐污

闪性能提高方法有重要的工程意义和学术价值。

零值绝缘子的位置对绝缘子串电场分布具有显著影响。有限元仿真结果显示,当零值绝缘子位于高压端时,电场畸变最严重,可达27.4%;而位于中部时畸变最弱,仅为5.1%<sup>[12]</sup>。王力农等<sup>[13]</sup>通过电场检测仪对其进行了验证,并指出零值绝缘子会导致串旁空间径向电场发生严重畸变。高拓宇等<sup>[14]</sup>通过进一步仿真分析表明,绝缘子串中劣化部分的电压显著降低,零值绝缘子片电压接近为零,而正常绝缘子串电压呈“U”型分布。舒立春等<sup>[15]</sup>指出,绝缘子串雷击污闪电压与海拔高度及气压呈负相关,并拟合出等值盐密(equivalent salt deposit density, ESDD)、气压与50%雷击放电电压数学表达式。朱信翰<sup>[16]</sup>将雷击污闪与交直流污闪特性进行对比,指出二者闪络机理不同的关键在于高电压作用时间不同,并对高拓宇等<sup>[14]</sup>提出的数学表达式进行修正。袁一钧<sup>[17]</sup>认为,湿污绝缘子串的50%雷击污闪电压随平均等值盐密的增大而逐渐降低并满足负幂函数关系,同时指出绝缘性能下降的主要原因与绝缘子沿面电位分布不均有关。

目前的研究主要针对污秽环境中绝缘子交直流闪络特性,而对湿污环境下含零值绝缘子串的雷

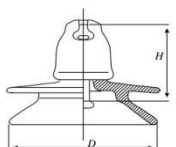
击闪络过程及其防护措施的系统研究较缺乏。因此,本文搭建了 35 kV 瓷绝缘子串雷电冲击放电试验平台,获取并分析污秽程度与零值绝缘子综合作用下的放电特性,通过优化大伞裙结构参数,显著提升绝缘子串的耐污闪能力。研究成果可为雷电活动频繁的重污秽地区输电线路外绝缘选择与设计提供依据。

### 1 湿污环境下试验研究平台

#### 1.1 瓷绝缘子技术参数

本文选用的瓷绝缘子主要技术参数如表 1 所示,在实验室对 6 组瓷绝缘子进行阻值测量,测试结果如表 2 所示。

表 1 瓷绝缘子主要技术参数

H/mm	L/mm	D/mm	S/cm <sup>2</sup>	结构
155	450	300	4 039	

注:H为绝缘子结构高度;L为爬电距离;D为盘径;S为表面积。

表 2 各组磁绝缘子检测结果

序号	耐受电压/kV	电阻/MΩ
1	70	OL
2	19	5
3	75	OL
4	80	OL
5	8	2
6	68	OL

注:OL为3片绝缘子串阻值超兆欧表量程,即该组均为良好绝缘子。

根据表 2 测试结果可知:第 2 和 5 组的绝缘子串(3 片)中各有 1 支瓷绝缘子在加压过程中发现放电通道,这 2 组绝缘子串中存在零值。

#### 1.2 试验模拟研究平台

本试验平台由±800 kV 冲击电压发生器提供电源,该冲击发生器产生的波形,电压从 0 上升到峰值

的波头时间为(1.2±0.36)μs,从波头至电压下降到峰值 50% 的半峰值时间为(50±10)μs,符合国际电工委员会(international electrotechnical commission, IEC)标准<sup>[18]</sup>。本文选取 1.1 节所述零值绝缘子组成不同片数的瓷绝缘子串进行湿污条件下的雷电冲击放电模拟试验,其试验原理图如图 1 所示。

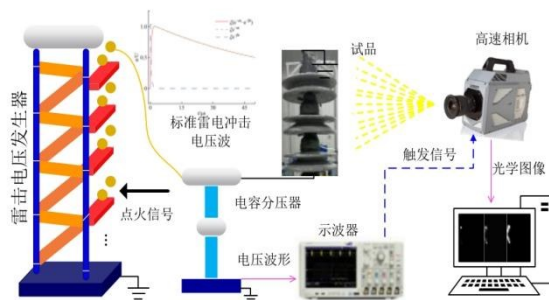


图 1 湿污环境下绝缘子串雷电冲击试验原理

样品处理方法采用固体涂层法<sup>[18]</sup>,根据所需染污的等值盐密以及绝缘子表面积,计算所需的氯化钠及高岭土质量,采用 JE203 型电子天平(精度 0.001 g)称量,加蒸馏水混合,均匀涂抹至试品表面,盐灰质量比为 1:6<sup>[19]</sup>。污闪试验前采用喷雾机对试品表面进行湿润处理,用以模拟雷暴前高湿度环境,每隔 10 min 重处理以保证试验准确性。

在 35 kV 的情况下,本试验在 3 片瓷绝缘子串中加装一片大倾角、大直径硅橡胶伞裙,以提升在湿污环境下的绝缘性能。增大伞裙伸出长度可以增加爬电距离,由于伞裙的良好憎水性,使污液形成孤立水珠,进而分割污闪电弧,有效防止“连锁闪络”,进而提高防污闪性能。伞裙内径为 100 mm,厚度为 5 mm,无塌陷现象。采用室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanizing silicone rubber, RTV)作黏结剂,依照 DL/T 677-2018《绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料》<sup>[20]</sup>进行黏结,固化 1 d 无松动后带电运行。

本文采用升降法加压<sup>[21]</sup>,进行 20 次有效试验,电压级差 ΔU 设定为预估 50% 雷电冲击闪络电压 U<sub>50</sub> 的 3%。U<sub>50</sub> 和 σ 的计算式如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_{50} = \frac{\sum_{i=1}^{20} n_i U(i)}{n} \\ \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} ([U(i) - U_{50}]^2)}{n-1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{50}$  为预估 50% 雷电冲击闪络电压;  $U(i)$  为第  $i$  次施加的电压 ( $1 \leq i \leq 20$ ), 单位 kV;  $n_i$  为相同的施加电压  $U(i)$  下试验的次数;  $\sigma$  为标准偏差;  $n$  为有效试验的总次数。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 35 kV 含零值绝缘子串雷击污闪特性

根据 GB/T 16434—1996《高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准》<sup>[22]</sup>, 按照 1.2 节的试验方法对绝缘子试样进行雷电冲击闪络试验, 雷电冲击污闪电压如表 3 所示。

绝缘子雷电冲击污闪电压与等值盐密之间的关系如式(2)<sup>[16]</sup>所示。

$$U_{50} = B \times (E_{\text{SDD}})^{-b} \quad (2)$$

式中:  $B$  为与绝缘子结构有关的系数;  $E_{\text{SDD}}$  为等值盐密, 单位  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $b$  为污秽影响特征指数, 数值越大则  $E_{\text{SDD}}$  变化对  $U_{50}$  的影响越明显。

对表 3 数据按照式(2)拟合得到  $U_{50}$  和  $E_{\text{SDD}}$  的拟合系数, 结果如表 4 所示。表 4 中,  $R^2$  为决定系数, 是衡量线性回归模型拟合优度的指标, 其值大于 0.9, 说明公式拟合度较好。

由表 3 和表 4 可知:

1) 4 种情况下拟合  $R^2$  值均大于 0.95, 拟合度较高, 其雷击污闪电压均随等值盐密增大呈负幂指数降低。GB/T 16434—1996 指出交直流电压等值盐密影响特征指数  $b$  值范围为 0.486~0.511, 表明雷电冲击作用下, 等值盐密对闪络电压影响不大。

2) 零值绝缘子处于上中下不同位置时, 当等值盐密从 0.15  $\text{mg}/\text{cm}^2$  上升至 0.25  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 、0.35  $\text{mg}/\text{cm}^2$  时, 绝缘子雷电冲击污闪电压分别降低了 10.80 kV、10.12 kV、2.09 kV, 下降幅度分别为 9.57%、10.70%、

表 3 雷击污闪试验结果

零值绝缘子位置	等值盐密/ $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	雷击污闪电压/kV
无	0.15	197.81
	0.25	170.54
	0.35	160.76
上	0.15	100.94
	0.25	95.39
	0.35	90.14
中	0.15	105.80
	0.25	101.40
	0.35	95.68
下	0.15	97.12
	0.25	91.06
	0.35	95.03

表 4 绝缘子串雷击污闪电压与等值盐密拟合参数

零值绝缘子位置	$B$	$b$	$R^2$
无	108.620	0.318	0.975 8
上	76.735	0.131	0.966 7
中	85.342	0.120	0.957 6
下	74.869	0.136	0.995 8

2.15%, 其等值盐密影响特征指数  $b$  分别为 0.131、0.120、0.136, 无零值情况下等值盐密影响特征指数  $b$  为 0.318, 存在零值时等值盐密对闪络电压的影响程度变小。

3) 当零值绝缘子处于下部时, 其污闪电压较其他位置小, 同时其  $b$  值较其他位置最大, 代表其受等值盐密变化影响程度最深。

与输电线路大面积发生的交直流污闪事故不同的是雷电冲击电压作用时间极短, 仅为 50~100  $\mu\text{s}$ 。与交直流污闪“电弧干区”理论并不相同, 热过程时间极短, 电弧爬升过程产生的焦耳热可以忽略, 湿污绝缘子表面没有来得及形成干区。主要原因为: (1) 雷电冲击作用下污闪电压降低主要是由于绝缘子表面污秽的沿面分布不均匀, 导致绝缘子径向电阻大小存在差异性, 从而导致径向电位分布不均

匀。当某部分电阻较大时,承担了较大的电压,此部分首先出现闪络,剩余污秽区域的电场强度增加。当局部电弧数量和长度到达一定值时,引起了该绝缘子表面的连锁性的分段闪络,降低了其在雷电冲击作用下的闪络电压。(2)尽管高幅值雷电冲击电压作用时间短,不会出现干区,但绝缘子钢脚钢帽处仍会因强电场作用出现局部电弧,电弧头部附近的强烈热电离会增加绝缘子表面带电粒子浓度。在雷电冲击作用下,带电粒子向两极移动,污层湿润的情况下 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 溶于水膜中,易在电场扰动下发生电离。湿润情况下污秽度越大,绝缘子表面带电粒子越多,越有利于电弧的发展,闪络电压降低。(3)零值绝缘子由于其内部存在贯穿性导电通道,相当于一个良好导体,电弧路径从内部发展,零值绝缘子表面积污程度不影响电弧发展。此外,由于绝缘子闪络电压存在一个饱和特性,当存在零值时闪络电压很低,故此时污秽等对其影响程度减弱。(4)由于试验采用的固体涂层法对绝缘子上下表面进行均匀染污,对绝缘子原电场分布影响不大。胡文<sup>[23]</sup>认为,当零值绝缘子处于高压端时,其电场畸变程度最严重,尤其是其电场法向分量起弧后在电弧头部又形成了强法向分量的电场 $E_n$ ,二者矢量叠加后使得带电粒子与表面的碰撞更加激烈,并在电场切向分量上,向上延伸,使得污层中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 及表面空气产生电离。故零值处于下端时其 $b$ 值最大,受污秽程度影响最大。

## 2.2 大伞裙参数对雷击闪络电压的影响规律

### 2.2.1 大伞裙位置对雷击污闪电压的影响

采用外径为560 mm的大伞裙,改变大伞裙位置以及污秽程度,研究大伞裙对雷击污闪电压的影响。

对图2的数据按式(2)拟合得到 $U_{50}$ 和等值盐密的拟合系数,如表5所示。

由图2和表5可知,加装大伞裙后,其 $R^2$ 值均大于0.93,其雷击污闪电压均随等值盐密增大呈负幂

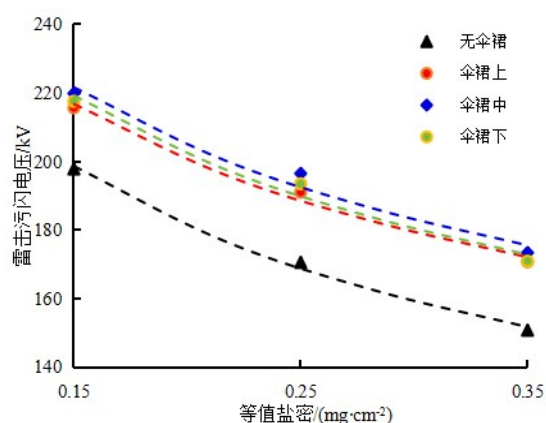


图2 不同位置大伞裙雷击污闪电压与等值盐密的关系

表5 绝缘子串雷击污闪电压与等值盐密拟合参数

伞裙位置	$B$	$b$	$R^2$
无	108.620	0.318	0.975 8
上	129.261	0.272	0.940 2
中	131.450	0.275	0.965 7
下	128.752	0.280	0.932 4

指数降低,加装大伞裙仅增加了绝缘子串干弧距离,不改变其污闪影响规律。

加装大伞裙后,其雷电冲击作用下的污闪电压略有提高,随着等值盐密升高其提升效果随之提高。随着等值盐密在0.15~0.35 mg/cm<sup>2</sup>范围内逐渐增加时,加装伞裙后污闪电压提高效果有限,分别为9.01%、12.00%、13.35%;同时随着污秽程度增加,加装大伞裙对雷击污闪电压提升效果增加,但呈现饱和趋势。此外,大伞裙放置在绝缘子串3个不同位置,3者 $B$ 值相近,对绝缘子串雷击污闪电压提升效果差异不大,自下而上分别为9.02%、15.01%、13.91%。

分析原因为:

1) 增爬裙放置在中部时,会起到一个分割电弧的作用,因此大伞裙放置在中部时其污闪电压较其他位置提升效果更好。

2) 大伞裙位置不同本质上并没有改变整体的爬电距离,所以由大伞裙位置引起的雷击污闪电压差异并不大。

3)如前面的分析,随着等值盐密的增加,雷击污闪电压 $U_{50}$ 会减小,击穿所需的电场强度也会减小。由于雷电冲击作用时间短,其污闪热过程可以忽略不计。在小电场强度下,电弧发展速度变缓。因此随着污秽程度增加,加装大伞裙对雷击污闪电压提升效果增加;同时等值盐密增加导致污湿层中导电离子增多,在小场强下电弧发展速度也会变快,因此呈现一个饱和趋势。

### 2.2.2 大伞裙外径对雷击闪络电压的影响

大伞裙外径自300 mm逐次增大,加装在绝缘子串上部,外径如表6所示。

表6 试验采用的大伞裙外径

外径编号	外径/mm
1	320
2	380
3	440
4	500
5	560

对完整绝缘子串开展不同外径下雷击污闪试验,大伞裙外径自300 mm逐次增大,加装在绝缘子串上部,试验结果如图3所示。

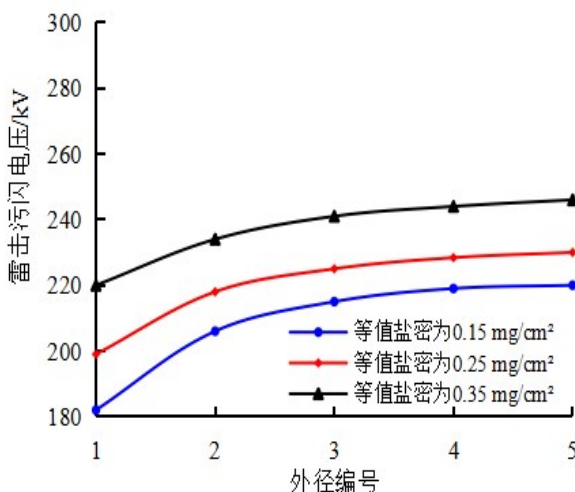


图3 不同外径大伞裙雷击污闪电压与等值盐密的关系

由图3可知,加装大伞裙后,污闪电压得到有限的提升。随着外径增加,呈现明显的饱和趋势。当等值盐密分别为0.15、0.25、0.35 mg/cm<sup>2</sup>,伞裙外径

自320 mm增加至560 mm时,污闪电压分别增加了32.1 kV、35.2 kV、43.5 kV,增幅依次为14.87%、15.02%、17.55%,表明随着等值盐密增加,对污闪电压抑制提升效果越好。

由上面分析可知:(1)随着伞裙外径增加,电弧爬电距离也随之增加,电弧需更高的能量贯通两极。(2)污闪过程主要以热游离为主,外径增加对分割小电弧效果有限,抑制热游离过程效果减弱,因此呈饱和状态。(3)随着等值盐密的增加,热游离过程加剧,大伞裙对其抑制程度增加,因此对污闪电压抑制提升效果越好。

### 2.3 闪络过程分析

本文采用FASTCAM SA-Z型高速摄像机摄录电弧发展的全过程,拍摄速度设置为480 000 FPS。通过示波器锚定击穿时刻电流突增的上升沿并同步输出触发信号。设每张放电照片的时刻分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,其中 $\Delta t=1.43 \mu\text{s}$ 。闪络过程如图4(a)、图4(b)所示。

由图4可知:

1)加装大伞裙后,电弧沿着大伞裙缓慢爬升的过程,使得电弧发展时间增长 $8\Delta t$ ,增幅达66.7%,雷击污闪电压提高。

2)在起始时刻,高压端处所承受的电场强度超过空气的击穿场强时,发生碰撞游离,产生电晕放电,表现为团状的电晕形式,随着能量的逐渐提升,电晕放电逐渐强烈,电晕转化为局部电弧,绝缘子完成起弧。同时,由于人工污染造成的分散性,导致绝缘子表面径向电阻分布不均,绝缘子表面电阻较大的部分承受较大的电压,该部分首先出现局部放电现象。电弧内压降较小,导致剩余污秽区承受的电压升高,电场强度增加。

3)随着时间推移,绝缘子表面出现断断续续互不连通的黄色编织状小电弧。当局部电弧的数量和长度达到一定值时,剩余污区的电场强度超过临

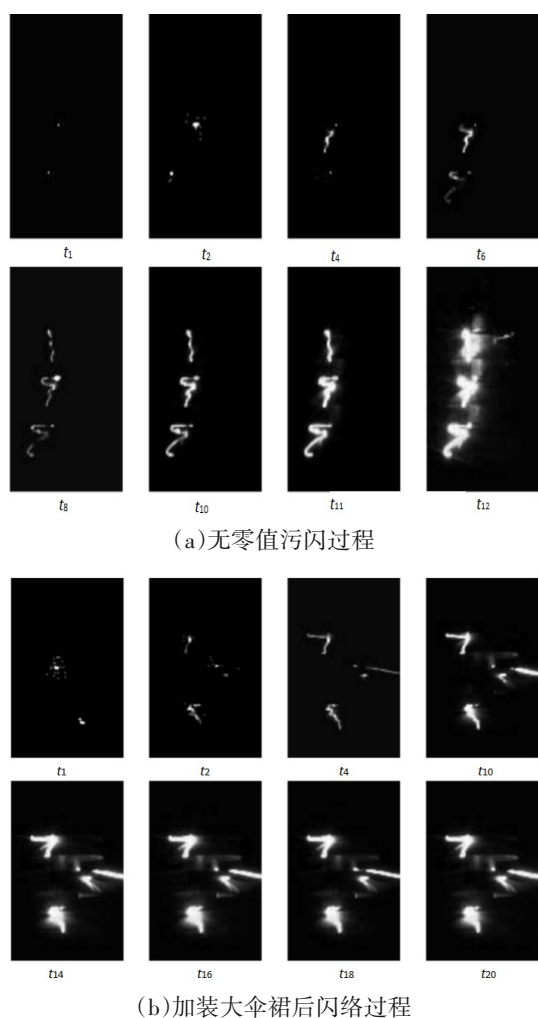


图4 湿污环境下含零值绝缘子串闪络过程

界值,绝缘子最终发生连锁性的沿面分段闪络。在电弧发展阶段,沿面放电的电弧被电场法线分量紧

紧压在水柱和绝缘子伞裙表面上,在切线分量作用下,电弧与介质表面摩擦,向绝缘子接地端和高压端延伸。电场畸变到一定程度后,绝缘子接地端出现放电痕迹,与迅速发展的沿面放电电弧相接,电弧直径变粗,亮度提升,形成明亮的放电通道,绝缘子发生闪络。

### 3 结论

1)瓷绝缘子串在有/无零值绝缘子情况下,其雷击污闪电压随等值盐密增加而降低,且成负幂指数关系。正常绝缘子串受等值盐密影响更加显著,其特征指数为0.318,含零值绝缘子串最高仅为0.272。

2)零值绝缘子位置对雷击闪络电压有明显的影响,重污秽条件下零值位于下部时闪络电压最小。主要是由于高压端零值绝缘子电场畸变程度最高,污秽对电场分布几乎不影响。

3)加装大伞裙后,绝缘子串雷击闪络电压受到等值盐密的影响减弱。大伞裙位置不同对污闪电压变化影响不大,主要是因为大伞裙增大了电弧爬电距离,高速照片表明加装大伞裙后电弧发展时间增长11.44  $\mu\text{s}$ ,增幅达66.7%。

4)加装大伞裙后,污闪电压得到提升,大伞裙位置对污闪电压影响有限;随着外径增加,呈现明显的饱和趋势,相同外径下,大伞裙提升效果随等值盐密增加而增加。

#### 参考文献:

- [1] 赵建坤,王森,安凯月,等.盘形悬式瓷绝缘子炸裂事故原因分析及防范措施[J].内蒙古电力技术,2019(1):94-97.
- [2] 张博禹.瓷质劣化绝缘子串非接触式电场检测方法研究[D].北京:华北电力大学,2023.
- [3] 陶玉宁,方春华.考虑环境相对湿度和污秽度的零值绝缘子红外检测方法[J].电力工程技术,2022(1):141-148.
- [4] 周友维.环境因素对劣化绝缘子发热影响及诊断策略研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [5] 李瑶琴,霍锋,南敬,等.含零值绝缘子高压架空输电线路绝缘子串空间电场分布特性[J].湖南电力,2024(5):37-44.
- [6] 邹佳宸.基于温度分布特征的零值绝缘子检测方法研究[D].北京:华北电力大学,2023.
- [7] 李振宇,戴罕奇,王建,等.考虑低零值绝缘子串的输电线路故障分析及防护[J].高压电器,2019(8):234-239.
- [8] 李春笋.地面湿度对雷暴云微物理及电过程影响的研究[D].南京:南京信息工程大学,2020.
- [9] 柴贾然.武汉地区闪电活动与温湿条件的相关性研究[D].南京:南京信息工程大学,2012.
- [10] 蒋兴良,舒立春,孙才新.电力系统污秽与覆冰绝缘[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [11] 孙才新,司马文霞,舒立春.大气环境与电气外绝缘[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [12] 程洋,夏令志,孙昊,等.基于电场分布曲线的瓷质绝缘子零值检测技术研究[J].高压电器,2023(11):74-83.

- [13] 王力农,李小春,宋斌,等.输电线路劣化绝缘子电场分布仿真与检测研究[J].高压电器,2018(10):49-55.
- [14] 高拓宇,汪仁杰,包翔,等.超高压V型绝缘子串含零值绝缘子的空间电场畸变特性研究[J].电瓷避雷器,2024(2):182-188.
- [15] 舒立春,袁前飞,蒋兴良,等.低气压下绝缘子雷电冲击的污闪特性[J].高电压技术,2010(6):1347-1352.
- [16] 朱信翰.低气压污秽绝缘子雷电冲击闪络特性研究[D].重庆:重庆大学,2022.
- [17] 袁一钧.极不均匀污秽绝缘子冲击放电特性研究[D].重庆:重庆大学,2022.
- [18] 舒立春,王晓峰,蒋兴良,等.染污方式对复合绝缘子交流覆冰闪络特性的影响[J].电网技术,2010(5):216-219.
- [19] 蒋兴良,周仿荣,胡建林,等.预染污方式对复合绝缘子人工覆冰直流闪络电压的影响[J].高电压技术,2009(3):551-556.
- [20] 国家能源局.绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料:DL/T 677—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [21] 姚建刚,关石磊,陆佳政,等.相对温度分布特征与神经网络相结合的零值绝缘纸识别方法[J].电网技术,2012,36(2):170-175.
- [22] 国家技术监督局.高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准:GB/T 16434—1996[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [23] 胡文.特高压直流输电线路绝缘子自然积污特性研究[D].武汉:华中科技大学,2015.

责任编辑:李远辉

(上接第19页)

- [22] 刘伟江,刘冰琪.农村数字基础设施建设赋能乡村振兴的路径——基于数字化与现代农业产业融合的视角[J].山西财经大学学报,2024(10):72-88.
- [23] 周兵,李艺,张弓.数字乡村建设赋能乡村振兴的影响机制与空间效应[J].中国流通经济,2023(7):3-16.
- [24] 黄群慧,余泳泽,张松林.互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J].中国工业经济,2019(8):5-23.
- [25] 赵涛,张智,梁上坤.数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J].管理世界,2020(10):65-76.
- [26] STOCK J H, YOGO M. Testing for weak instruments in linear IV regression [M]//ANDREWS D W K, STOCK J H. Identification and inference for econometric models: essays in honor of thomas rothenberg. Cambridge: Cambridge University Press, 2005:80-108.
- [27] 刘颖,赖凯丰.数字乡村建设对乡村振兴发展的影响——基于1 804个县域经验证据[J].浙江农业学报,2024(7):1694-1708.
- [28] 向琳,郑长德.乡村振兴与民族地区高质量发展[J].广西民族研究,2021(1):126-135.

责任编辑:蒋召雪