

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.017

均压环加装硅橡胶套对复合绝缘子闪络特性的影响

马御棠¹, 朱钱鑫², 潘浩¹, 张毅², 王前进², 耿浩¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650200; 2. 云南电网有限责任公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100)

摘要: 雷击是引起输电线路跳闸的主要原因, 加强绝缘子的绝缘性能有助于提升架空输电线路抵御雷电灾害的能力。文中主要关注均压环加装硅橡胶套能否改善输电线路耐雷性能这一问题。为此, 文中首先开展了雷电冲击电压下绝缘子闪络放电实验, 获得了新型绝缘子和传统绝缘子的伏秒特性曲线, 结果表明硅橡胶套可以让伏秒特性曲线上移。进一步分析放电发展过程的高速影像发现, 上述改善主要是因为硅橡胶套抑制了流注放电的起始和增大了先导放电的路径。基于实验结果拟合的伏秒特性曲线, 文中仿真计算了均压环的硅橡胶套对输电线路反击耐雷水平和反击跳闸率的影响, 结果表明新型绝缘子可以有效地降低输电线路的反击跳闸率, 降幅介于9.1%~58.9%之间。上述研究成果有可能为输电线路的防雷改造提供一些新思路。

关键词: 复合绝缘子; 均压环; 硅橡胶套; 放电过程; 雷击跳闸率

Influence of Installing A Silicon Rubber Sleeve on the Grading Ring on the Flashover Characteristics of Composite Insulators

MA Yutang¹, ZHU Qianxin², PAN Hao¹, ZHANG Yi², WANG Qianjin², GENG Hao¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Kunming 650200, China; 2. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yuxi Power Supply Bureau, Yunnan Yuxi 653100, China)

Abstract: Lightning strikes are a major cause of transmission line tripping, and strengthening the insulating properties of insulators can help to improve the ability of overhead transmission lines to withstand lightning hazards. In this paper whether the installation of silicone rubber sleeve to the grading ring can improve the lightning withstand performance of transmission lines is focused. To this end, the flashover discharge experiment of insulators under the lightning impulse is performed firstly in this paper, the volt-second characteristic curves of the new designed and traditional insulators are obtained. The results show that the silicone rubber sleeve can shift the volt-second characteristic curves upwards. It is found by the analysis of the high-speed images of the discharge process that the improvement is mainly that the silicone rubber sleeve has suppressed the initiation of the streamer discharge and increased the path of the leader discharge. Based on the volt-second characteristic curves fitted by the experimental results, the influence of silicon rubber sleeve of the grading ring on the lightning withstand level and back-flashover tripping rate of a typical transmission line. The result shows that the new insulator can effectively reduce the back-flashover tripping rate of transmission lines by 9.1% to 58.9%. The above research results may provide some new ideas for the lightning protection renovation of transmission lines.

Key words: composite insulator; grading ring; silicone rubber sleeve; discharge process; flashover rate

0 引言

雷电是导致架空输电线路跳闸的最主要原因

之一^[1-2]。据统计, 电力系统历年事故中, 雷击引起线路跳闸事故约占线路总跳闸事故的40%~70%^[3]。由此可见, 雷害已经严重威胁着电网的安全稳定运行。

目前,提升架空线路的耐雷性能主要分为两步:①对线路的雷击风险进行评估;②对雷击风险等级偏高的线路段,因地制宜地开展防雷改造。架空线路的耐雷性能评估主要借助仿真计算,目前,常用的反击耐雷性能评估模型主要包括电磁暂态分析程序 EMTP^[4](electro-magnetic transient program)、时域有限差分法 FDTD^[5](finite-difference time-domain)、部分元等效电路法 PEEC^[6](partial element equivalent circuit)、矩量法 MoM^[7](method of moments)等,而常用的绕击耐雷性能评估模型主要包括电气几何模型 EGM^[8](electric geometry model)、先导发展模型 LPM^[9](leader progression model)等。基于上述方法,国内外学者均对本国架空线路的雷击风险开展了大量的评估,并有部分工作与实际运行经验数据进行了对比,在一定程度上比较吻合^[10-12]。

而针对架空线路的防雷改造,目前的措施主要包括降低接地电阻、安装线路避雷器、架设(耦合)地线、增加玻璃或瓷绝缘子片数、增加负荷绝缘子长度等,这些措施在提升架空线路的防雷性能方面取得了较为显著的成效^[2,8,13]。然而,上述改造措施均存在一个弊端,即工程量稍微偏大,例如,降低接地电阻往往需要开挖土方,甚至布置引线至较远的区域^[4];安装线路避雷器需要根据塔型设计金具结构,并上塔作业^[15]等。研发流程更加简化和性价比更加优化的防雷改造方法,将会意义重大。

鉴于此,文中主要针对一种潜在的简单改造方法,即在绝缘子两端的均压环加装硅橡胶套,通过实验和仿真评估该方法的有效性。

1 实验条件

文中采用的实验布置见图1。

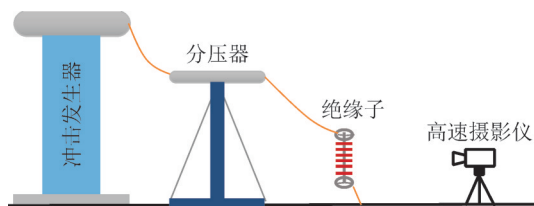


图1 实验布置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

冲击发生器(4 000 kV/400 J)产生的雷电冲击电压(1.2/50 μ s),通过铜导线经分压器后,与绝缘子均压环相连。绝缘子采用 FXBW4-110/100 系列,结构高度为 1 240 mm,最小电弧距离为 1 000 mm。在文中,均压环未加装硅橡胶套的绝缘子称为传统绝缘

子,均压环加装了硅橡胶套的绝缘子称为新型绝缘子。新型绝缘子见图2,在实验中通过行吊垂直布置,其中,“高压侧”与高压引线相连,“低压侧”与接地极相连。

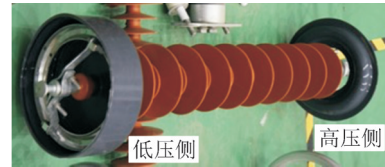


图2 均压环加装硅橡胶套的复合绝缘子

Fig. 2 The composite insulator with silicone rubber bushings for grading rings

针对传统绝缘子和新型绝缘子,分别施加正极性和负极性雷电冲击电压,每种工况开展 20 次实验,通过调整电压峰值,保证每种工况的击穿次数不小于 10 组。每组实验同步测量电压波形和绝缘子放电影像。电压波形通过电容分压器和数字示波器进行测量。绝缘子放电影像通过高速摄影仪 (FASTCAM SA-X2) 进行拍摄,该摄影仪配合尼康镜头 (F1.4/50 mm) 使用,拍摄速度为 30 万帧/s,曝光时间为 2.3 ms,每帧图片的分辨率为 60×256 像素。高速摄影仪通过数字示波器的“Trig-out”信号进行触发,数字示波器通过测量电压进行触发^[16]。

2 实验结果与分析

2.1 绝缘子伏秒特性曲线

当绝缘子击穿时,从相应的电压波形读取电压幅值和击穿时刻,其中,电压绝对值首次超过 5 kV 的时刻定义为电压波形的零点。采用上述方法,获得正极性和负极性雷电冲击电压下绝缘子的伏秒特性曲线分别见图3、4。结果表明,均压环加装硅橡胶套(即新绝缘子)的绝缘性能有所改善,而且在负极性雷电冲击电压下的绝缘性能提升更加明显。

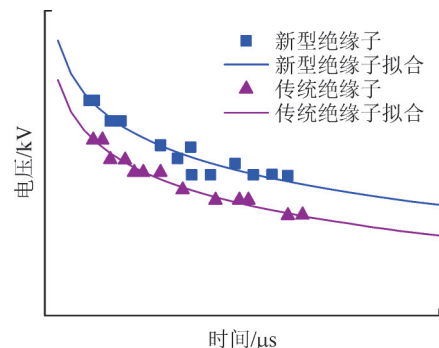


图3 正极性雷电冲击电压下绝缘子的伏秒特性曲线

Fig. 3 Volt-second curves of insulators under the positive lightning impulse voltage

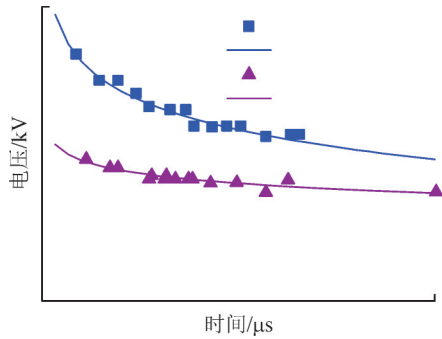


图4 负极性雷电冲击电压下的绝缘子伏秒特性曲线

Fig. 4 Volt-second curves of insulators under the negative lightning impulse voltage

后文将定量地研究绝缘子绝缘性能的改善对输电线路耐雷性能的影响,为此,文中采用IEC推荐的伏秒特性曲线公式,见式(1)^[17],对图3、4的散点进行拟合,得到的拟合曲线系数见表1。

$$U = A \cdot L + \frac{B}{t^C} \quad (1)$$

式(1)中: U 为击穿电压, kV; t 为击穿时刻, ms; L 为绝缘子最小电弧距离, m, 此处取 1; A 、 B 、 C 为常数, 通过拟合获得。

表1 绝缘子伏秒特性拟合曲线系数

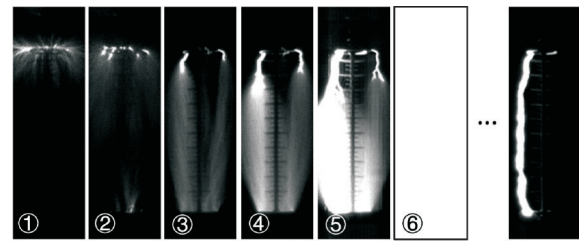
Table 3 Coefficients for fitting volt-second curves of insulators

电压极性	绝缘子类型	系数			拟合度 R -square
		A	B	C	
正	新型	61 198	-60 337	-0.001 05	0.91
	传统	17 466	-16 657	-0.003 58	0.97
负	新型	44 982	-43 801	-0.002 26	0.95
	传统	61 504	-60 632	-0.000 56	0.86

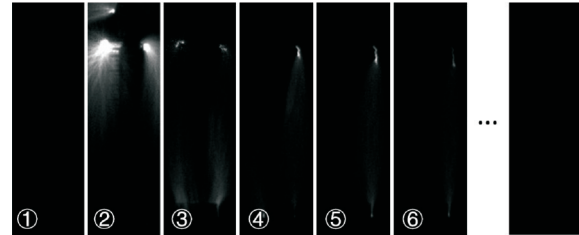
2.2 绝缘子闪络放电发展过程

为了初步探究均压环加装硅橡胶套对绝缘子绝缘性能影响的缘由,本节将根据绝缘子放电过程的高速影像见图5-7,分析硅橡胶套对流注和先导放电的作用。在图5-7中,编号为①的图片对应于高速摄影仪被触发后记录的第一帧画面,编号②③等则为其后连续拍摄的图片。最后一张图片为放电完成(击穿或耐受)后间隔 165 ms(该时间间隔用“...”示意)的影像,主要用于展示击穿情况下闪络通道的路径。

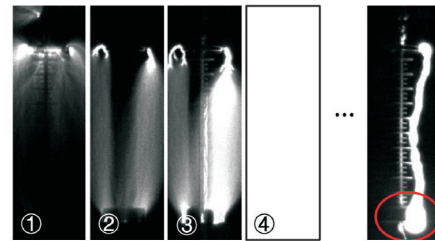
正极性雷电冲击电压下绝缘子放电过程的典型结果见图5。针对传统绝缘子,由图5(a)可知,施加幅值为 633 kV 的雷电冲击电压时,高压侧均压环周围产生一圈电晕流注放电,经过约 2.3 ms,流注丝发展至低压侧的均压环,随后正极性先导从高压侧的均压环起始,数量 > 1,但最终只有一支先导贯穿两个均压环的空气间隙,上述放电过程与正极性雷



(a) 传统绝缘子(633 kV, 闪络)



(b) 新型绝缘子(653 kV, 耐受)



(c) 新型绝缘子(684 kV, 闪络)

图5 正极性雷电冲击电压下绝缘子典型放电过程

Fig. 5 Typical discharge processes of insulators under the positive lightning impulse voltage

电冲击电压下棒—板空气间隙放电类似^[18-19]。而针对新型绝缘子,如图5(b)所示,即使增加电压幅值(由 633 kV 增加至 653 kV),高压侧产生的正极性先导也未能成功生长至低压侧,间隙耐受。对比图5(a)、(b)发现,均压环加装的硅橡胶套,在一定程度上抑制电晕流注放电的起始,从而提高了绝缘强度。图5(c)展示了幅值为 684 kV 的正极性雷电冲击电压下新型绝缘子的闪络过程,与图5(a)所示的传统绝缘子闪络过程相似,但流注和先导的发展速度因电压提高而有所增加。进一步对比图5(a)、(c)的最后一张图片的闪络路径,可以发现新型绝缘子的先导需要从硅橡胶套里面“爬”出来(图中红圈部分所示),意味着先导发展路径的增加,这也可能导致了击穿电压的提高。

负极性雷电冲击电压下绝缘子放电过程的典型实验结果见图6。与正极性实验结果类似,高压侧的均压环周围产生电晕流注放电(见图片②),然后流注发展至低压侧均压环(见图片③),最后在 2.3 ms 内间隙击穿(见图片④)。受限于高速摄影仪的拍摄速度,负极性放电实验均未能捕捉先导发展过程。对比图6(a)、(b),均压环的硅橡胶套对绝缘性能提升

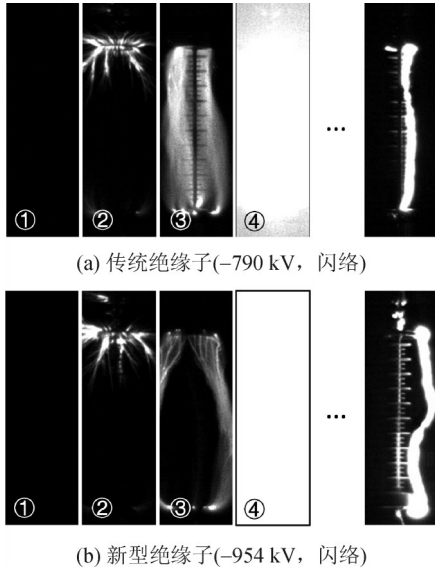


图6 负极性雷电冲击电压下绝缘子典型放电过程
Fig. 6 Typical discharge processes of insulators under the negative lightning impulse voltage

的原因可能主要包含两个方面:①与正极性的放电类似,闪络通道需要“爬”过硅橡胶套,增大了先导路径;②新型绝缘子击穿过程中,流注发展路径远离绝缘子伞裙,而传统绝缘子击穿过程中,流注发展路径围绕在伞裙周围,即前者的路径明显大于后者,导致其后由流注转化而成的先导路径也大大增加。

在文中开展的所有负极性雷电冲击下绝缘子击穿实验中,几乎所有实验的击穿时间都在 20 ms 以内,唯有一组实验的击穿时间高达 30 ms。这组实验针对传统绝缘子,其放电过程见图 7。

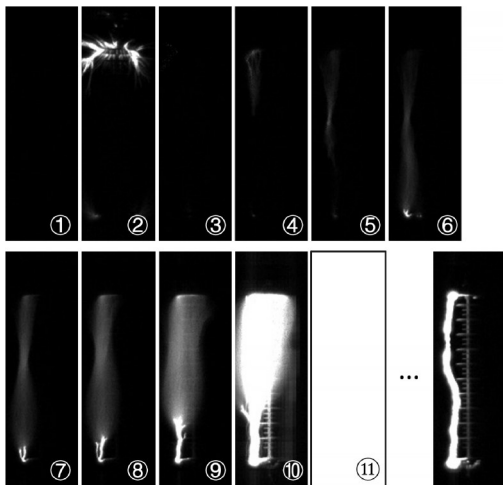


图7 幅值为-760 kV的负极性雷电冲击电压下传统绝缘子的非典型放电过程
Fig. 7 The non-typical discharge process of the traditional insulator under the negative lightning impulse voltage with an amplitude of -760 kV

高压侧初始电晕流注放电(图片②)后,因空间电荷的屏蔽作用,放电进入暗区阶段(图片③);随着

空间电荷的迁移,虽然施加电压逐渐降低,合成电场达到放电阈值,二次流注放电起始(图片④),并朝着低压侧均压环发展,约 6.6 ms 后,两个均压环之间出现了明显的流注贯穿通道(图片⑥),并在低压侧均压环处正极性先导起始;经过约 13.2 ms,低压侧的正极性先导进入末跃阶段(图片⑩),随后绝缘子闪络击穿。图 6(a)中放电过程发展较快,高速摄影仪未能捕捉类似图 7 所示的流注和先导放电的详细过程,但可以合理推测,两者应该类似。因此,图 7 可以帮助理解负极性雷电冲击电压下带均压环的传统复合绝缘子串的闪络放电过程。

3 新型绝缘子对线路防雷性能的影响

3.1 仿真模型

第 2 章的实验结果表明,均压环加装硅橡胶套后可以提高绝缘子的绝缘强度,本章将通过仿真进一步分析新型绝缘子对输电线路防雷性能的影响。

分析对象为一条 110 kV 输电线路,其中,杆塔采用典型的直线猫头塔,结构见图 8:导线为单分裂,型号为 LGJ-240/30, I 串挂设;地线有两根,型号为 GJ-50,直接与塔顶相连;杆塔的工频接地电阻为 2 W,土壤电阻率为 1 000 Ω·m。因 110 kV 输电线路以反击跳闸为主,文中将重点关注雷击杆塔的情况^[20]。

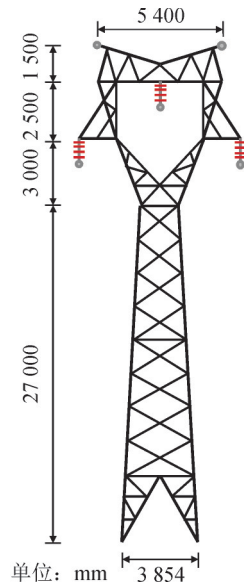


图8 杆塔(ZM₁)尺寸
Fig. 8 Dimensions of the ZM₁ tower

仿真模型在 EMT-P-ATP 软件中实现,其中,杆塔模型采用多波阻抗模型^[21],输电线路采用 J-Marti 模型,杆塔接地采用非线性冲击电阻模型^[22],雷电流源采用双指数波(2.6/50)冲击电源模型,雷电通道波阻抗设置为 400 W^[23]。仿真考虑工作电压,相角设

置为从 $0^\circ\sim 330^\circ$,间隔为 30° 。通过搜索计算每个相角下单相绝缘子闪络的最小雷电流,再将12个雷电流的最小值作为线路的耐雷水平,并计算对应的反击跳闸率。值得注意的是,文中的仿真中绝缘子闪络判断分别采用定义法和相交法^[24],这两种方法采用的伏秒特性曲线来源于表1所拟合的公式,根据这两种方法的原理,相交法的计算结果更加严苛。

3.2 传统与新型绝缘子仿真结果对比

虽然自然雷电中90%以上为负极性^[25-26],但也存在正极性雷电击中输电线路的案例^[27],为此,文中将同时考虑正极性和负极性雷击杆塔的情况。

采用图3(a)中正极性雷电冲击电压下绝缘子伏秒特性曲线,传统绝缘子和新型绝缘子对输电线路的耐雷水平和反击跳闸率的对比情况见图9。结果表明,若闪络判据采用定义法,采用新型绝缘子的线路,耐雷水平从42.4 kA提高至44.6 kA,相应的反击跳闸率从2.204 3次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$]下降至2.004 2次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$],降幅约为9.1%;若采用相交法,采用新型绝缘子的线路,耐雷水平从60.7 kA提高至64.9 kA,相应的反击跳闸率从1.069 3次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$]下降至0.921 1次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$],降幅约为13.9%。

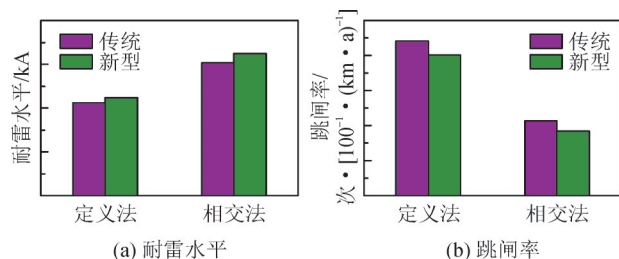


图9 采用正雷电冲击电压下获得的绝缘子伏秒特性曲线时的仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation results when using volt-second curves of insulators obtained at the positive lightning impulse voltages

采用图3(b)中负极性雷电冲击电压下绝缘子伏秒特性曲线,传统绝缘子和新型绝缘子对输电线路的耐雷水平和反击跳闸率的对比情况见图10。

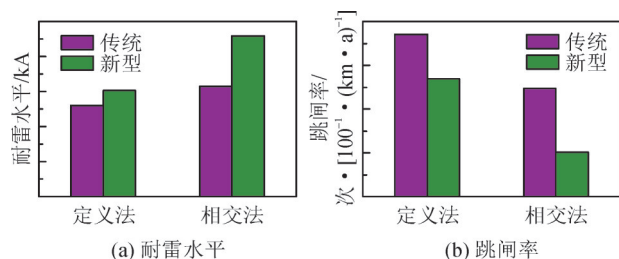


图10 采用负雷电冲击电压下获得的绝缘子伏秒特性曲线时的仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results when using volt-second curves of insulators obtained at the negative lightning impulse voltages

结果表明,若闪络判据采用定义法,采用新型绝缘子的线路,耐雷水平从52.1 kA提高至60.5 kA,相应的反击跳闸率从1.481 9次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$]下降至1.075 3次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$],降幅约为27.4%;若采用相交法,采用新型绝缘子的线路,耐雷水平从62.9 kA提高至91.8 kA,相应的反击跳闸率从0.986 1次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$]下降至0.404 8次/[$100\cdot(\text{km}\cdot\text{a})$],降幅约为58.9%。

图9、10的对比结果表明,均压环加装硅橡胶套有助于提升输电线路的防雷水平,尤其是按照负极性雷电冲击电压下获得的伏秒特性曲线,雷击跳闸率降低约58.9%。考虑到自然雷电多为负极性,雷击杆塔时,横担电位为负极性,将图2中标注为“高压侧”的一端与杆塔横担相连,而标注为“低压侧”的一端与导线相连,这将可能有效地降低输电线路的雷击跳闸率。

值得注意的是,文中的工作主要在于初步研究均压环硅橡胶套对绝缘子绝缘性能的提升作用,后续工作将进一步优化硅橡胶套的结构,一方面提升绝缘子绝缘性能,另一方面满足工程安装的安全需要等,并选择典型的线路开展示范应用和验证。

4 结论

文中通过实验研究了均压环加装硅橡胶套对绝缘子绝缘性能的影响,并基于绝缘子放电过程的高速影像分析了产生上述影响的缘由,最后通过仿真研究了均压环加装硅橡胶套对典型输电线路耐雷性能的影响,得到的主要结论如下:

- 1)均压环加装硅橡胶套后,绝缘子伏秒特性曲线会上移,而且负极性雷电冲击电压下,上移更加明显。
- 2)均压环的硅橡胶套增强绝缘子绝缘性能的原因主要是抑制流注放电起始和增加先导放电路径长度。
- 3)绝缘子的均压环加装硅橡胶套可有效地降低输电线路的反击跳闸率,降幅介于9.1%~58.9%之间,与闪络判据类型和伏秒特性曲线类型相关。
- 4)负极性雷电冲击电压下,绝缘子放电过程由低压侧的正极性先导放电主导。

参考文献:

- [1] 何俊佳,蔡汉生,贺恒鑫,等.南方电网超/特高压输电线路防雷性能评估技术研究进展[J].南方电网技术,2016,10(9):1-10.
HE Junjia, CAI Hansheng, HE Hengxin, et al. Review on lightning performance estimation of EHV and UHV overhead transmission

- lines in China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(9):1-10.
- [2] 周政, 丁瀚, 岳灵平, 等. 输电线路差异化防雷技术研究综述[J]. 电气开关, 2019, 57(1):5-7.
ZHOU Zheng, DING Han, YUE Lingping, et al. Summary of research on differential lightning protection technology for transmission lines[J]. Electric Switcher, 2019, 57(1):5-7.
- [3] 李德斌. 基于 ATP-EMTP 输电线路多脉冲雷电响应研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
LI Debin. Research on multi pulse lightning response of ATP - EMTP transmission lines[D]. Chengdu: Xihua University, 2019.
- [4] 陈鹏辉, 周羽生, 葛天科, 等. 基于 ATP-EMTP 的交直流同塔多回输电线路耐雷性能分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(3):111-117.
CHEN Penghui, ZHOU Yusheng, GE Tianke, et al. The analysis on lightning withstand performance of AC/DC multi circuit transmission lines on same tower based on ATP - EMTP[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):111-117.
- [5] ZHU Qianxin, ZHANG Yi, MA Yutang, et al. Experimental and analytical studies on lightning surge response of the quadruple - circuit transmission line[J]. IEEE Access, 2023(11):6879-6886.
- [6] CAO Jinxin, DU Yaping, DING Yuxuan, et al. Lightning surge analysis of transmission line towers with a hybrid FDTD-PEEC method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2):1275-1284.
- [7] 陶亚琴. 雷击火电厂时对低压配电系统的电磁影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
TAO Yaqin. Research on the electromagnetic effects of lightning strike on low voltage distribution systems in thermal power plants [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [8] 梁振, 曾玲丽, 戴何笠, 等. 基于改进电气几何模型的某 500 kV 山区输电线路差异化防雷改造[J]. 电瓷避雷器, 2019(1):145-151.
LIANG Zhen, ZENG Lingli, DAI Heli, et al. Differential lightning protection reconstruction of a 500 kV mountainous transmission line based on improved electrical geometry model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(1):145-151.
- [9] 谭启德, 潘超, 陈铁, 等. 特高压直流输电线路雷电绕击影响因素研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(2):157-162.
TAN Qide, PAN Chao, CHEN Tie, et al. The research on influencing factors of shielding failure to UHVDC transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(2):157-162.
- [10] VISACRO S, SILVEIRA F H, VALE M H M, et al. Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non - conventional measures[J]. Electric Power Systems Research, 2021(195):107134.
- [11] ZALHAF A S, HAN Yang, YANG Ping, et al. Analysis of lightning transient performance of 132 kV transmission line connected to miramar wind farm: A case study[J]. Energy Reports, 2022, 8(1):257-265.
- [12] ZHAO Xiangen, XIE Yaoheng, HE Hengxin, et al. Lightning performance assessment of 500 kV transmission lines in Southern China [C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Canada: IEEE, 2013:1-5.
- [13] 王录亮, 韩来君, 黄松. 海南强雷区典型配电线路差异化防雷措施研究[J]. 电气技术, 2022, 23(3):103-108.
WANG Luliang, HAN Laijun, HUANG Song. Research on differentiated lightning protection measures for the typical distribution line in strong lightning district of Hainan[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(3):103-108.
- [14] 曾挺, 吴哲, 孔祥美, 等. 柔性石墨缆在山区线路杆塔接地中的应用[J]. 电气技术, 2020, 21(3):130-132.
ZENG Ting, WU Zhe, KONG Xiangmei, et al. Application of flexible graphite cable in grounding of mountain line pole tower[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(3):130-132.
- [15] 许军, 肖佩, 傅智为, 等. 线路避雷器安装布点策略研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(2):152-156.
XU Jun, XIAO Pei, FU Zhiwei, et al. Research on the installation point strategy of line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(2):152-156.
- [16] JIANG Zhenglong, HE Junjia, ZHAO Xiangen, et al. Distribution of stems around the HV electrode in a 0.74 m air gap under positive pulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1):372-375.
- [17] General definitions and test requirements: IEC 60060-1:2010 [S]. 2010.
- [18] GÜRLEK A. Breakdown process on rod - rod air gap under oscillating lightning impulse voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(3):319-326.
- [19] WU Shaoheng, WANG Linong, GAO Jiachen, et al. Breakdown voltage characteristics of combined air gaps under negative lightning impulse[J]. Energy Reports, 2022, 8(13):1230-1236.
- [20] HU Jianping, ZHU Ting, HU Jianlin, et al. Study on the lightning protection performance for a 110 kV non - shield - wired overhead line with anti - thunder and anti - icing composite insulators[J]. Energies, 2023, 16(2):815.
- [21] 张永记, 司马文霞, 张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006, 32(7):93-97.
ZHANG Yongji, SIMA Wenxia, ZHANG Zhijin. Summary of the study of tower models for lightning protection analysis[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7):93-97.
- [22] 李恒真, 何子兰, 陈斯翔, 等. 基于 EMTP 的输电杆塔与接地系统的暂态过电压建模分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(5):107-114.
LI Hengzhen, HE Zilan, CHEN Sixiang, et al. Modeling and analysis of transient overvoltage of transmission tower and grounding system based on EMTP[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5):107-114.
- [23] DATSIOS Z G, MIKROPOULOS P N, TSOVILIS T E. Effects of lightning channel equivalent impedance on lightning performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(3):623-630.
- [24] 崔涛. 输电线路防雷计算中绝缘子串闪络判据研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
CUI Tao. Research on the criterion of insulator string flashover in lightning protection calculation of transmission lines[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [25] 吴安坤, 吴仕军, 曾勇, 等. 云贵高原闪电活动特征分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(2):74-79.
WU Ankun, WU Shijun, ZENG Yong, et al. Analysis of the

- SIMA Wenxia, ZHENG Haoyuan, YANG Qing, et al. Three-dimensional method of calculating shielding failure flashover times of transmission line in complex terrain area[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):662-668.
- [18] HUANG Li, LIU Peng, HUANG Junjie, et al. Algorithm for solving trip-out rate due to shielding failure of bent transmission line[J]. Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(12):1738-1747.
- [19] 余 军, 蓝 磊, 孙泽中, 等. 考虑地面倾角下 ± 1 100 kV重要输电通道内邻近线路间雷电屏蔽效应仿真计算[J]. 电网技术, 2018, 42(2):366-373.
- YU Jun, LAN Lei, SUN Zezhong, et al. Simulation of lightning shielding between adjacent lines considering ground slope angle in important ± 1 100 kV DC transmission channel[J]. Power System Technology, 2018, 42(2):366-373.
- [20] 王鹏宇. 220 kV同塔多回输电线路绕击特性的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- WANG Pengyu. Study on shielding failure characteristics of 220 kV multi-circuit transmission lines on the same tower[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019.
- [21] 龚 磊, 郭 恒. 一种计及雷电入射角的改进电气几何模型[J]. 电瓷避雷器, 2017(6):92-96.
- GONG Lei, GUO Heng. An improved electrical geometry model considering lightning strike angle[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6):92-96.
- [22] 杨明浩, 安韵竹, 胡元潮, 等. 改进EGM模型对特高压输电线路的适用性与验证[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1):93-100.
- YANG Minghao, AN Yunzhu, HU Yuanchao, et al. Applicability and verification of an improved EGM model for UHV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1):93-100.
- [23] 范 冕, 李振强, 魏 明, 等. 750 kV同塔四回路输电线路雷电性能分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6):1-7.
- FAN Mian, LI Zhenqiang, WEI Ming, et al. Lightning performance of 750 kV quadruple-circuit transmission line on the same Tower [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6):1-7.
- [24] 吕 政, 郑皓元, 杨 庆, 等. 复杂地形下紧凑型输电线路绕击跳闸率计算方法[J]. 高压电器, 2013, 49(11):117-122.
- LYU Zheng, ZHENG Haoyuan, YANG Qing, et al. Calculation method of shielding failure flashover rate of compact transmission line in complex terrain area[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11):117-122.
- [25] 路永玲, 周志成, 刘 洋, 等. 典型500 kV双回路直线转角塔雷击故障分析与思考[J]. 高压电器, 2016, 52(9):179-183.
- LU Yongling, ZHOU Zhicheng, LIU Yang, et al. Analysis on typical lightning failure of 500 kV double-circuit straight angle tower[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):179-183.
- [26] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S]. 2014.
- Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: GB/T 50064—2014[S]. 2014.
- [27] 跨越电力线路架线施工规程: DLT 5106—2017[S]. 2017.
- Operation code of cross power transmission line in installing the conductor: DLT 5106—2017[S]. 2017.
- 周春天(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术研究(通信作者)(E-mail:617592593@qq.com)。

(上接第143页)

- characteristics of lightning activities in Yunnan Guizhou plateau [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2):74-79.
- [26] 吴 清, 梁亚峰, 黄 松. 海南省雷电分布特征分析[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(s1):1-7.
- WU Qing, LIANG Yafeng, HUANG Song. Analysis of lightning distribution characteristics in Hainan province[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(s1):1-7.
- [27] MOTOYAMA H, SHINJO K, MATSUMOTO Y, et al. Observation and analysis of multiphase back flashover on the Okushishiku test transmission line caused by winter lightning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4):1391-1398.
- 马御棠(1986—), 男, 高工, 研究方向为电网防灾减灾(E-mail:1277396850@qq.com)。
- 朱钱鑫(1992—), 男, 工程师, 研究方向为输电运维检修、防灾减灾(通信作者)(E-mail:508378321@qq.com)。