

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.002

具有防雷功能的500 kV防冰闪绝缘子结构设计及 电场仿真研究

吴伟, 蒋正龙, 陆佳政, 方针, 胡建平, 王博闻

(国网湖南省电力公司防灾减灾中心, 电网输变电设备防冰减灾国家重点实验室, 长沙 410129)

摘要: 雷击和覆冰是输电线路面临的两大自然灾害, 严重威胁电网的稳定运行。文中将避雷器和绝缘子结合, 通过绝缘段雷电冲击和工频闪络试验, 设计出一种新的500 kV防冰防雷复合绝缘子, 并利用有限元法对该500 kV防冰防雷复合绝缘子电场分布进行仿真计算, 研究了清洁和覆冰工况。结果表明: 局部高场强区域集中在高压段、绝缘段和避雷段交界处, 最大场强为18.1 kV/cm, 满足现场运行要求; 结合间隙雷电冲击试验, 采用带1.8 m均压环间隙的绝缘段和避雷器串联具有较好的防雷保护效果。

关键词: 绝缘子; 防冰防雷; 场强计算; 电弧自熄; 有限元法

Structure Design and Electric Field Simulation Research on 500 kV Anti-icing Flash Insulator with Lightning Protection Function

WU Wei, JIANG Zhenglong, LU Jiazheng, FANG Zhen, HU Jianping, WANG Bowen

(State Grid Hunan Electric Power Company Disaster Prevention and Reduction Center, State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid Transmission and Distribution Equipment, Changsha 410129, China)

Abstract: Lightning and ice-coating are two natural disasters faced by transmission line, serious threat to the stable operation of power grid. Combined arrester with insulation, the paper design a kind of 500 kV lightning and icing protection composite insulator with the method of lightning impulse and AC flashover test; in addition, the electrical field analyzes on 500 kV lightning and icing protection composite insulator is made by finite element method. The study on clean and icing conditions found that the local high field strength region focus on high voltage section as well as the junction between insulation section and lightning protection section; meanwhile, the maximum field strength is 18.1 kV/cm, which meet the requirements of the field operation. By means of gap lightning impulse tests, it can obtain a better lightning protection effect when an insulation segment with 1.8 meters corona ring gap is in series with arrester.

Key words: insulator; lightning and icing protection; field strength calculation; arc self-extinction; finite element method

0 引言

随着中国电力建设的迅速发展, 电网覆盖的区域越来越广, 超高压电网已成为各省公司的骨干网络。超高压输电线路由于输送距离远, 常穿越一些地形复杂、雷电活动频繁、具有微地形微气象特征的易覆冰山区, 当遭遇恶劣天气时, 输电线路很容易发生覆冰闪络或雷击闪络跳闸, 甚至造成事故停

运, 严重影响电网的安全稳定运行^[1-9]。

目前防覆冰闪络和防雷击闪络的方法, 都存在着功能单一的问题, 防冰闪的主要途径是通过加大伞径和伞间距来防止伞裙冰凌桥接和增加绝缘长度提高覆冰闪络电压^[10], 防雷击闪络的措施是加装线路避雷器^[11-14], 但新增线路避雷器存在架设难度大和建设成本高的缺点。笔者在国网科技项目的支持下, 结合防冰与防雷功能要求开展复合绝缘子结构研究和电场仿真计算, 在现有塔头不变、安装方式不变的基础上实现了绝缘子防雷和防冰闪功

收稿日期: 2017-07-07; 修回日期: 2017-09-20

基金项目: 国家电网公司科技项目(5216A015001N)。

Project Supported by Science and Technology Department of SGCC (5216A015001N).

能的二合一^[15]。

1 500 kV 防雷防冰复合绝缘子整体结构设计

1.1 结构设计方案

将环形氧化锌电阻片套装到绝缘子芯棒上,在复合绝缘子一端形成避雷器段,另一端为绝缘子段,在绝缘子段两端均安装均压环,2段共同构成防雷防冰闪复合绝缘子。避雷器段和绝缘子段的伞裙均采用大、中、小3种伞型组合结构,避免覆冰时冰凌桥接。正常情况时,绝缘子承担了90%~95%线路运行电压,雷击时绝缘段的2个均压环构成的间隙击穿,雷电流通过避雷器释放,由于避雷器的作用,防止雷击时绝缘子闪络引起导线直接对地放电造成线路接地跳闸,其结构示意图和实物图见图1、2。

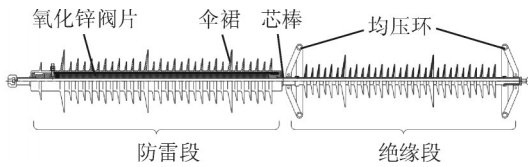


图1 防冰防雷复合绝缘子结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of icing and lightning protection composite insulator



图2 防冰防雷复合绝缘子实物图

Fig. 2 Physical map of icing and lightning protection composite insulator

1.2 绝缘子及均压环参数选择

500 kV 线路正常运行时绝缘子两端承受的最大工频过电压约为 445 kV,假如该电压全部加在绝缘段,取绝缘子长度为 2 300 mm,两端均压环直径取 370 mm,管径取 48.5 mm 时,均压环间距从 1.0~2.2 m 时,电场分布见图 3。不同均压环间距时最大场强见表 1。均小于空气的击穿场强。

采用 4 200 kV 冲击电压发生器装置及逐级升压法获得绝缘段均压环间隙的 50% 雷电冲击击穿电压,试验接线图见图 4,标准气象条件下试验结果见

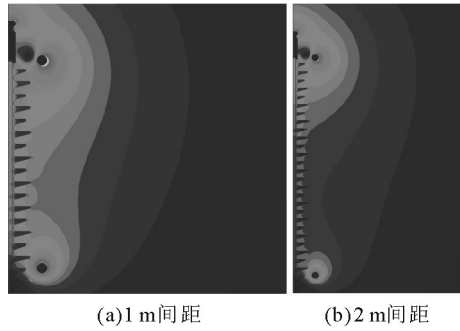


图3 不同间距下的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution under different distance

表1 不同间隙距离下复合绝缘子最大场强

Table 1 The maximum field strength of composite insulator under different gap distance

L/m	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
E/(kV·cm ⁻¹)	22.1	21.4	20.9	20.5	20.0	19.7

图5。试验用均压环直径为 370 mm,管径为 48.5 mm,当绝缘子绝缘段干弧距离控制在均压环间隙距离的 110%~115% 时,所有的击穿路径均出现在远离绝缘子表面的 2 个均压环外管之间。

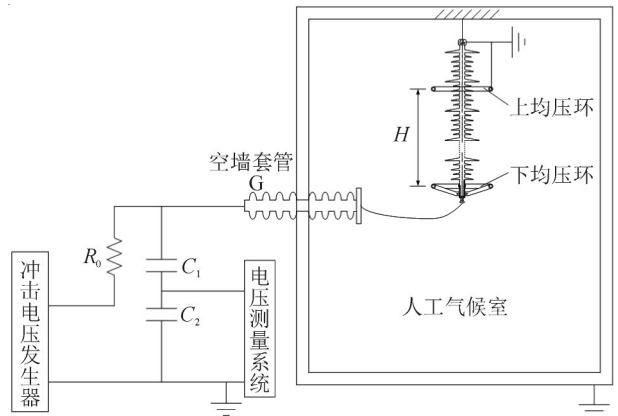


图4 复合绝缘子间隙冲击电压试验接线图

Fig. 4 Wiring diagram of the composite insulator gap surge voltage test

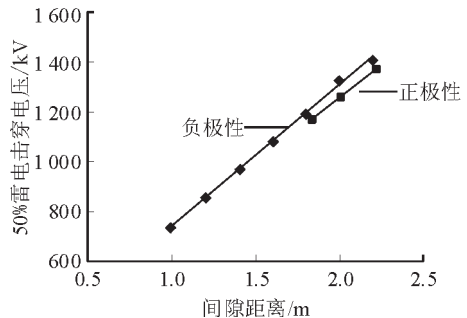


图5 绝缘子均压环间隙距离与雷电冲击击穿电压关系

Fig. 5 Relationship between the gas gap distance for corona ring and lightning breakdown voltage

当间隙距离选取在 1.6~2.2 m 时,绝缘子间隙雷电冲击击穿电压介于 1 100 ~ 1 400 kV,对 500 kV 线

路绝缘子及电网设备具有良好的雷电防护作用。

Aleksandrow 等研究了长空气间隙和绝缘子的工频临界闪络电压, IEC 60071 也示出了空气间隙距离或绝缘子干弧距离 L (m) 与交流临界放电电压峰值 U_c (kV) 的关系曲线, 见图 6; 以及计算公式, 见式(1)。均压环间距选取 1.8 m 时, 工频临界放电电压峰值为 794 kV, 为 500 kV 线路最大工频过电压的 1.26 倍。

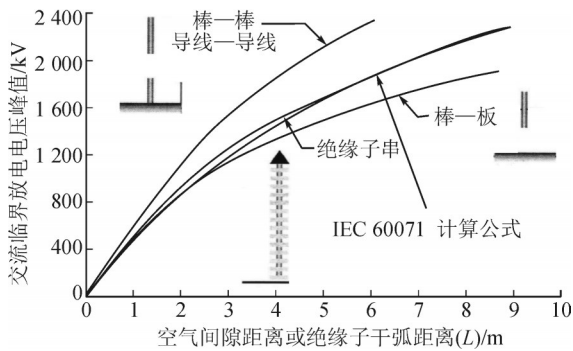


图 6 长空气间隙和绝缘子的工频临界闪络电压

Fig. 6 Relationship between distance and flashover critical voltage of the insulator

IEC 60071 计算公式为

$$U_c = 1061 \times \ln(1 + 0.55L^{1.2}) \quad (1)$$

当均压环间隙击穿后, 间隙间将形成电弧。由于流过间隙的雷电流时间短, 远小于施加在绝缘间隙上交流电压 1/2 周波时间。假如雷电导致间隙击穿期间, 系统电压值维持不变, 雷电过后, 雷电压与系统电压在绝缘子电极间形成雷电弧和交流工频电弧。由于避雷器的作用, 雷电流的能量多被避雷器吸收, 系统电压在避雷器上产生的电流不大于 1 mA。雷电过后虽然弧隙间仍具有一定的电导通道, 根据潜供电弧试验结果进行统计分析得到电弧自熄无重燃的临界长度经验公式^[16]为

$$l_{\min} = (0.53 \sim 0.73) I_{\text{am}}^{0.25} U_{\text{am}} \times 10^{-4} \quad (2)$$

式(2)中: l_{\min} 为电弧自熄的临界长度; I_{am} 、 U_{am} 分别为潜供电流和恢复电压的峰值。避雷器动作后, I_{am} 、 U_{am} 分别取 1 mA、408 kV, 计算得到电弧自熄的临界长度 l_{\min} 为 3.8~5.3 m。水平和垂直安放的绝缘子的电弧试验结果分析表明^[17]: 绝缘子电极之间的距离为 d 时, 垂直安放的绝缘子弧柱长度可达 $5d$; 水平安放绝缘子电极之间的电弧由于热气流上升而弯曲, 弧柱长度可达 $20d$ 。按照垂直悬挂时考虑, 电弧自熄的临界绝缘子长度为 1.06 m。Ishida 等对于工频灭弧特性试验研究表明: 500 kV 带间隙避雷器临界灭弧长度为 1.14 m, 与分析结果较为一致。因此均压环间距取 1.8 m, 在雷电流过零后电弧自动熄弧, 不会出现电弧重燃问题。

1.3 整体结构参数

500 kV 防雷防冰绝缘子由环形电阻片构成的防雷段和带上下均压环的绝缘段组成, 伞裙采用大中小伞交替的方式抑制冰凌桥接, 正常运行时, 运行电压主要由绝缘段承受, 当线路遭受雷击时, 绝缘段均压环放电击穿, 避雷段环形氧化锌阀片吸收冲击能量, 保护避雷段在雷电冲击下不发生闪络, 雷击过后, 绝缘段均压环恢复绝缘, 整个雷击过程中均不发生线路直接对地放电现象, 有效防止了线路雷击跳闸现象的发生。在覆冰状况下, 绝缘子外表面覆冰层增加了防雷段承受的工频电压, 降低了绝缘段电压, 有效防止绝缘段出现覆冰闪络。结合大小伞间距、绝缘子抗拉强度对金具长度要求等因素, 防雷段和避雷段各有大、中、次小、小 4 种伞裙交错排列, 绝缘段共有大伞 4 片, 直径 300 mm, 间距 490 mm; 中伞 9 片, 直径 180 mm, 间距 140 mm; 次小伞 10 片, 直径 130 mm, 间距 140 mm; 小伞 25 片, 直径 100 mm, 间距 70 mm。防雷段共有大伞 42 片, 直径 300 mm, 间距 35 mm; 中伞 42 片, 直径 250 mm, 间距 35 mm。在绝缘段两端各装有 1 个均压环, 外径为 370 mm, 管径 20 mm。

2 电场电位分布仿真研究

绝缘子在运行时的电场电位分布与绝缘子自身的结构参数以及所处的环境有关, 如铁塔、导线、均压环位置和伞裙大小^[18-27]等, 防冰防雷绝缘子的电场为轴对称分布, 可采用二维计算模型简化计算。

2.1 电场仿真分析模型

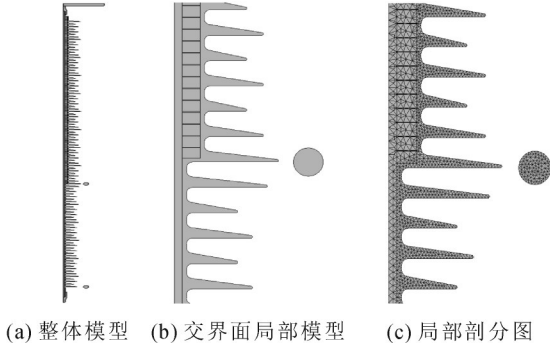
500 kV 防冰防雷复合绝缘子的结构材料仿真参数见表 2。

表 2 防冰防雷绝缘子材料仿真参数

Table 2 Material simulation parameters of 500 kV icing and lightning protection composite insulator

材料	相对介电常数	电阻率/($\Omega \cdot \text{mm}^{-1}$)
空气	1.0	—
伞裙	3.0	—
芯棒	5.0	—
氧化锌电阻片	600.0	1 000
均压环	1.0×10^8	3×10^{-5}
金具和杆塔	1.0×10^8	1×10^{-4}
冰层	70.0	—
融冰水膜	80.0	4×10^{-3}

整个绝缘子处在无限大的空气介质区域。仿真计算的边界条件为: 远离绝缘子 10 m 远处空气层、铁塔或低压侧避雷器金具赋值零电位, 高压金具施加高压电位, 即相电压峰值 408.2 kV, 计算模型见图 7。计算清洁状态和覆冰状态下防冰防雷复合绝缘子的电场分布。

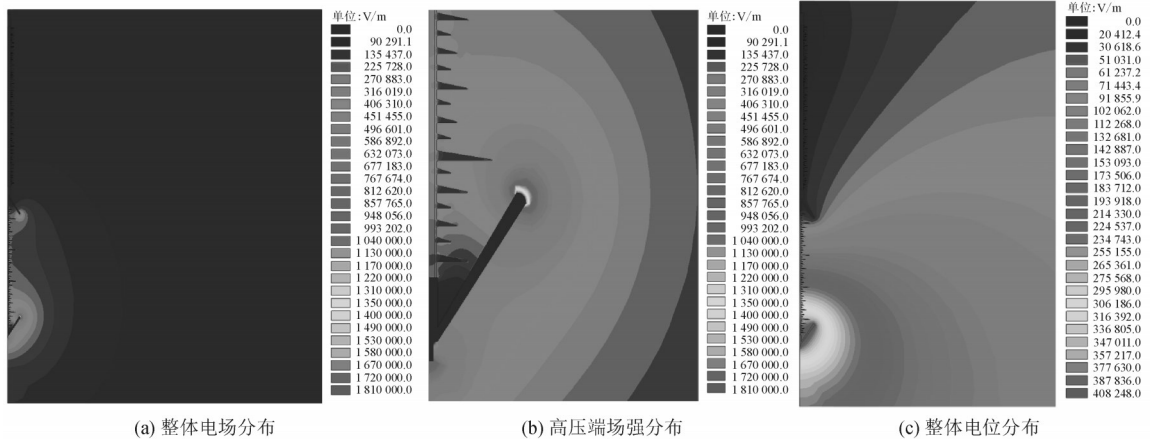


(a) 整体模型 (b) 界面局部模型 (c) 局部剖分图
 图7 500 kV 防雷防冰复合绝缘子计算模型
 Fig. 7 Calculation model of 500 kV icing and lightning protection composite insulator

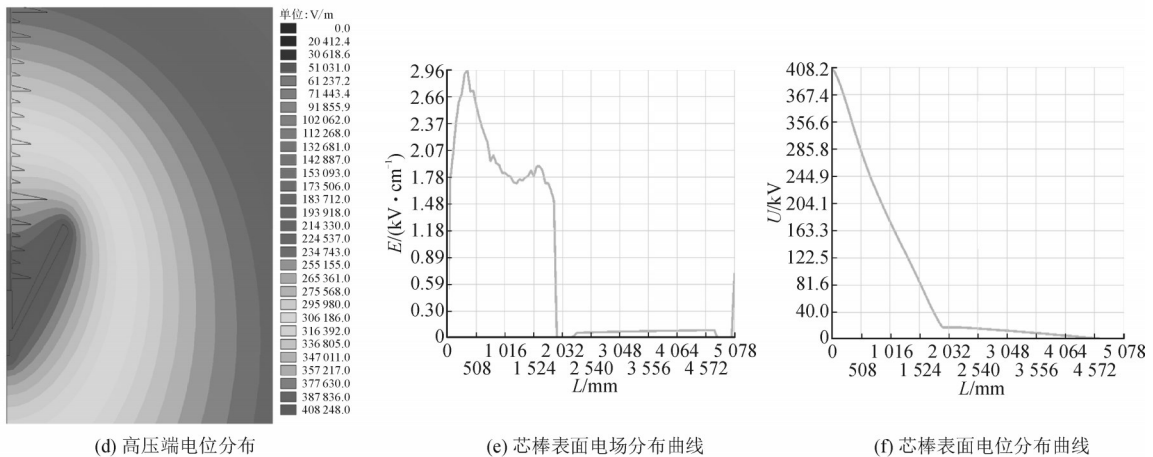
2.2 清洁状态下电场仿真分析

在清洁状况下,500 kV 防雷防冰复合绝缘子两端施加工频电压的电场分布和电位见图8。

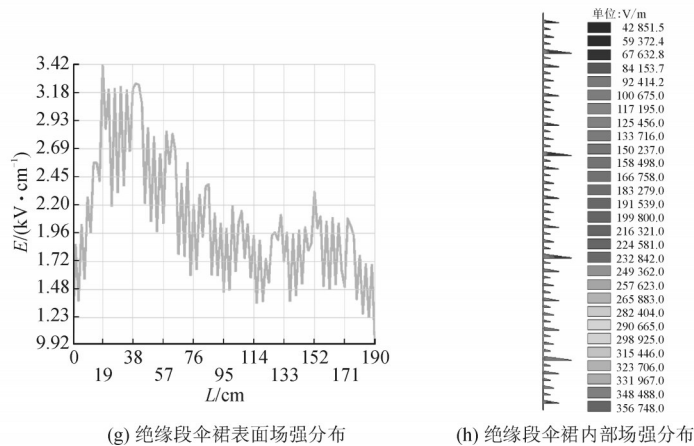
从图8中的电场分布云图可以看出,电压在绝缘段降落很快,临近避雷段电压变化很缓慢;最大场强为 18.1 kV/cm,分布在高压端均压环外侧。对于电位的变化可以如下解释:防雷段的阀片在正常运行状况下电阻远小于绝缘段的电阻,电容远大于绝缘段电容,因而承担的电压很小,约占总电压的5%。下图为沿绝缘子轴向电位分布。



(a) 整体电场分布 (b) 高压端场强分布 (c) 整体电位分布



(d) 高压端电位分布 (e) 芯棒表面电场分布曲线 (f) 芯棒表面电位分布曲线



(g) 绝缘段伞裙表面场强分布 (h) 绝缘段伞裙内部场强分布

图8 500 kV 防雷防冰绝缘子电场电位分布

Fig. 8 Field distribution of 500 kV icing and lightning protection composite insulator

图 8(e)为防冰防雷复合绝缘子场强分布, 高压侧由于均压环的影响由低到高, 在均压环处达到最大后开始下降, 接近上均压环时又出现上升趋势, 两均压环附近绝缘子表面电场出现高点, 绝缘段伞裙内表面场强不超过 3.5 kV/cm。

2.3 覆冰状况下电场仿真分析

结合实际情况建立覆冰状态下的电场分析模型, 建立在 10 mm 覆冰厚度不带冰凌覆冰状况和 10 mm 覆冰厚度带冰凌(冰凌长度为 120 mm)的覆冰模型, 见图 9。500 kV 防雷防冰复合绝缘子两端施加工频电压的电场和电位见图 10。

在覆冰状态下, 整个绝缘子表面的最大场强接近 6 kV/cm, 绝缘子表面没有出现局部场强高于空

气平均击穿场强的区域。

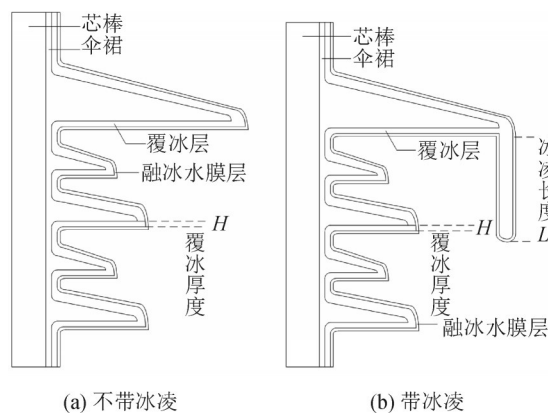
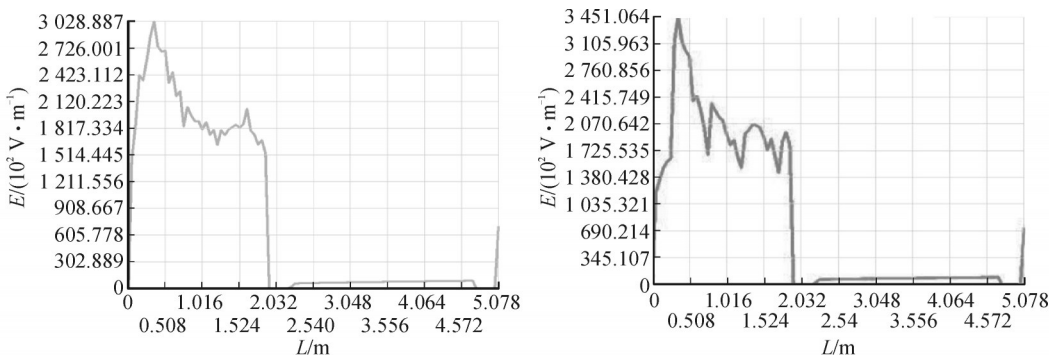
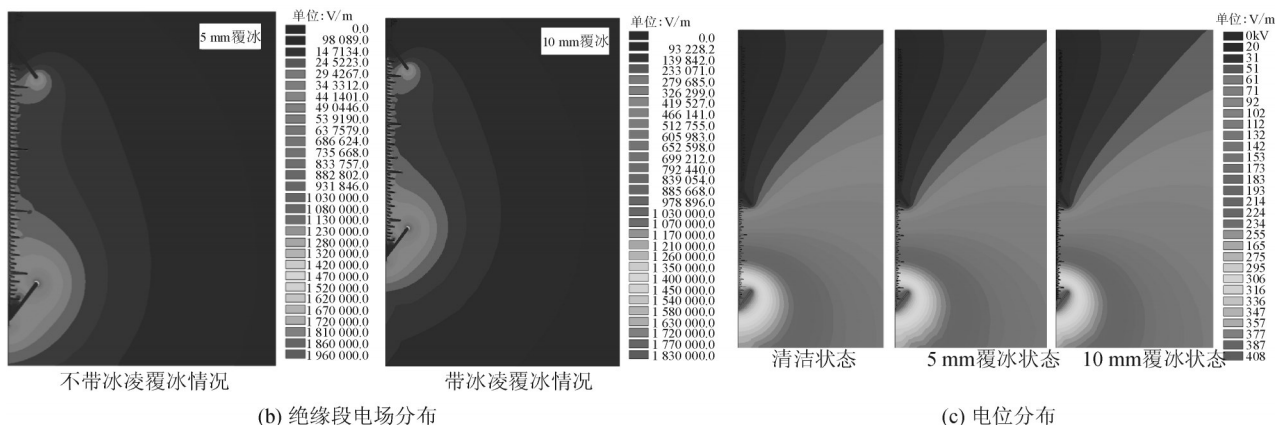


图 9 500 kV 防冰防雷复合绝缘子覆冰模型

Fig. 9 Ice model of 500 kV icing and lightning protection composite insulator



(a) 整体轴向电场分布曲线



(b) 绝缘段电场分布

(c) 电位分布

图 10 500 kV 防雷防冰复合绝缘子的电场和电位分布图

Fig. 10 Field and potential distribution of 500 kV icing and lightning protection composite insulator

2.4 防冰防雷绝缘子伞裙电场分布分析

通过对清洁和覆冰状态下的电场分布进行计算发现: 场强最大的伞裙分布在高压端、避雷器段和绝缘段交界面处, 分析该区域附近的伞裙场强便能掌握整个伞裙最大场强分布, 确定防冰防雷绝缘子是否满足现场运行条件。

高压端附近 5 片伞裙的电场分布曲线见图 11。横坐标表示轴线距离。伞裙的最大场强在 2.0~2.5 kV/cm 变化, 高压端的伞裙电场分布很均匀, 场强较小。

高压端附近电场的很均匀。

防雷段和避雷器段交界处伞裙最大场强分布见图 12。在 0.9~4.5 kV/cm 变化, 远远小于空气的平均击穿场强 30 kV/cm。

3 结论

文中对基于 500 kV 防冰防雷复合绝缘子结构进行了设计, 研究了清洁状态和覆冰状态下电场分布仿真分析, 对局部高场强区域进行了研究, 结合间隙

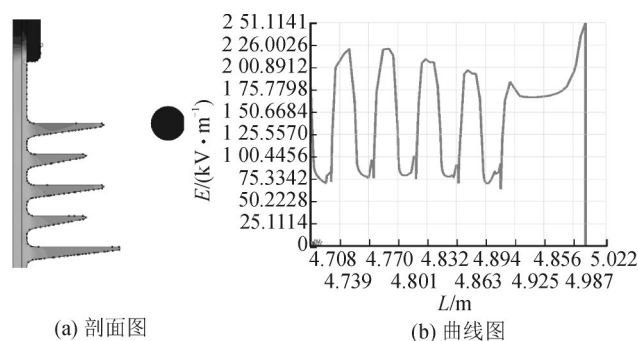


图 11 高压端绝缘子外表面路径电场分布曲线

Fig. 11 Path field distribution of insulator on high voltage side surface (with wire and tower)

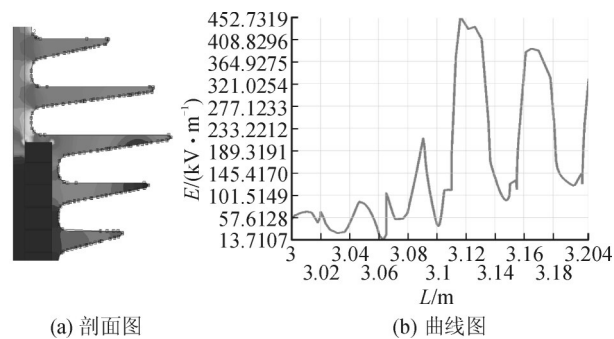


图 12 防雷段和绝缘段交界处路径电场分布曲线

Fig. 12 Path field distribution curve of the junction between insulation section and lightning protection section

的雷电冲击试验及灭弧能力分析,得到了以下结论:

1)500 kV 新型防冰防雷绝缘子采用芯棒穿心结构,整体结构由绝缘段和避雷段构成,雷击时绝缘段两均压环之间的间隙击穿,雷电流通过避雷器释放,达到防雷的目的。

2)根据试验结果和理论分析,绝缘段间隙距离取为 1.8 m 时具有较好的防雷性能,此时 50% 雷电冲击击穿电压和工频击穿均满足规程要求,不会出现电弧重燃问题。

3)研究了其清洁和覆冰状态下的电场分布,最大场强为 18.1 kV/cm,;电压在绝缘段降落很快,最大场强集中在高压端、绝缘段和避雷段交界处,高压段附近伞裙最大场强为 2.0~2.5 kV/cm,交界处伞裙的最大场强为 0.9~4.5 kV/cm,500 kV 防冰防雷绝缘子场强分布满足现场运行要求。

文中设计的防雷防冰闪绝缘子能够满足现场运行要求,在线路遭受雷击时防止导线直接对地放电引起线路跳闸。

参考文献:

- [1] 蒋兴良,董冰冰. 绝缘子覆冰闪络研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 317-335.
JIANG Xingliang, DONG Bingbing. Research and development on flashover of ice-covered insulators[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 317-335.
- [2] 于昕哲,周军,刘博,等. 全尺寸超、特高压交流绝缘子串的覆冰闪络特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1454-1459.
YU Xinzhe, ZHOU Jun, LIU Bo, et al. Icing flashover characteristics of full-scale EHV and UHV AC insulator strings[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1454-1459.
- [3] 贾志东,李智宁. 110 kV 玻璃绝缘子串交流覆冰的闪络特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1074-1081.
JIA Zhidong, LI Zhining. AC electric characteristics of the ice-covered 110 kV glass insulator strings[J]. High Voltage

Engineering, 2011, 37(5): 1074-1081.

- [4] 蒋兴良,向泽,张志劲,等. 覆冰程度对瓷、玻璃和复合绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 227-233.
JIANG Xingliang, XIANG Ze, ZHANG Zhijin, et al. Influence of icing degree on AC icing flashover performance of porcelain, glass and composite insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 227-233.
- [5] 陆佳政,蒋正龙,雷红才,等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19, 1.
LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai, et al. Analysis of Huan Power Grid ice disaster accident in 2008[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [6] 弥璞. 目前线路避雷器存在问题的分析和一种新型线路避雷器的研究[J]. 电瓷避雷器, 2004(4): 21-24.
MI Pu. Development of a new type line MOA based on reviewing prevalent ones[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(4): 21-24.
- [7] 黄斌,徐姗姗,苏文宇. 输电线路覆冰研究综述[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 27-32.
HUANG Bin, XU Shanshan, SU Wenyu. Summary of research on icing of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 27-32.
- [8] JIANG X L, CHAO Y F, ZHANG Z J, et al. DC flashover performance and effect of sheds configuration on polluted and ice-covered composite insulators at low atmospheric pressure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 97-105.
- [9] 蒋正龙,陆佳政,雷红才,等. 湖南 2008 年冰灾引起的倒塔原因分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2468-2474.
JIANG Zhenglong, LU Jiazheng, LEI Hongcai, et al. Analysis of the causes of tower collapses in hunan during the 2008 ice storm[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2468-2474.
- [10] 蒋兴良,卢杰,苑吉河,等. 输电线路绝缘子串防冰措施研究[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 19-24.
JIANG Xingliang, LU Jie, YUAN Jihe, et al. Study on measures to prevent icing flashover of insulation strings[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 19-24.

- [11] 陈锡阳, 尹创荣, 葛 栋, 等. 110 kV 线路复合绝缘子防雷保护并联间隙的应用研究[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 60-70.
CHEN Xiyang, YIN Chuangrong, GE Dong, et al. Application investigation on parallel gap lightning protection device of composite insulators for 110 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2):60-70 .
- [12] 梁胜勇, 李振国, 李志强, 等. 220 kV 绝缘子并联间隙电场计算[J]. 华北电力技术, 2013, 10(14):48-51.
LIANG Shengyong, LI Zhenguo, LI Zhiqiang, et al. Calculation of electric field for 220 kV insulator with parallel gap [J]. North China Electric Power, 2013, 10(14):48-51.
- [13] OHKI Y, YASUFUKU S. Lightning arresters developed for 500 kV transmission lines[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1994, 10(4):61-62.
- [14] 杨 杰, 郑宇清, 吕晓燕, 等. 应用电网雷害分布合理布置500 kV 线路避雷器[J]. 高压电器, 2013, 49(9):86-89.
YANG Jie, ZHENG Yuqing, LYU Xiaoyan, et al. Reasonable arranging arresters for 500 kV transmission line by use of lightning distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9):86-89.
- [15] 罗正经, 陆佳政, 赵 纯, 等. 防雷防冰闪合成绝缘子自适应电场分布仿真分析[J]. 湖南电力, 2013, 33(3):13-17.
LUO Zhengjing, LU Jiazheng, ZHAO Chun, et al. Simulation analysis of adaptive electric field distribution of an anti-ice-flashover composite insulator with the function of lightning protection[J]. Hunan Electric Power, 2013, 33(3):13-17.
- [16] JOHILS A T, AGGARWAL R K, SONG Y H. Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission system[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission Distribution, 1994, 141(2): 148-154.
- [17] 陈天祥, 曹荣江. 330 kV 线路潜供电弧自灭特性的研究[J]. 电网技术, 1988, 12(2):1-10.
CHEN Tianxiang, CAO Rongjiang. Research on self-extinction behavior of secondary arc in 330 kV transmission line[J]. Power System Technology, 1988, 12(2):1-10.
- [18] 刘 振, 卞星明, 王黎明, 等. 特高压直流复合绝缘子均压环设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(12):137-141.
LIU Zhen, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Calculation of electric field distribution along composite insulator strings and design of grading ring of UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12):137-141.
- [19] 陈树挺, 李日隆. 复合绝缘子均压环应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2004(3):8-10.
CHEN Shuting, LI Rilong. Study on application of grading ring for composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(3):8-10.
- [20] 杨 杰, 吉晓波, 周国华, 等. 均压装置对复合绝缘子电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(2):24-25.
YANG Jie, JI Xiaobo, ZHOU Guohua, et al. The influence of voltage grading fittings on electrical performance of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2):24-25.
- [21] 毛凤麟, 王雪松. 复合绝缘子均压环对电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(4):40-42.
MAO Fenglin, WANG Xuesong. Effects of grading ring of polymer insulator on the field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4):40-42.
- [22] 江 汛, 王仲奕, 金 强. 棒形悬式复合绝缘子电场计算与优化[J]. 高压电器, 2005, 41(5):340-342.
JIANG Xun, WANG Zhongyi, JIANG Qiang. Calculation and optimization of electric field and voltage distribution along long-rod composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5):340-342.
- [23] 刘渝根, 程 溪, 田金虎, 等. 750 kV 输电线路悬式绝缘子的均压特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(9):2132-2139.
LIU Yugen, CHENG Xi, TIAN Jinhu, et al. Voltage sharing characteristics of suspension insulator for 750 kV transmission lines maintenance[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9):2132-2139.
- [24] 邓 桃, 李庆峰, 张学军, 等. ± 800 kV 特高压直流线路均压环优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22):100-105.
DENG Tao, LI Qingfeng, ZHANG Xuejun, et al. The optimization of grading ring design for ± 800 kV UHV DC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 100-105.
- [25] 黄道春, 阮江军, 刘 佳, 等. 330 kV 绝缘子串电压分布和屏蔽环位置的优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):91-94.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, LIU Jia, et al. Calculation of voltage distribution along insulator string of 330 kV transmission line and position optimization of grading ring[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):91-94.
- [26] 张 强, 王维庆, 李长凯. 均压环对改善复合绝缘子的电场分布影响[J]. 电瓷避雷器, 2010(4):26-29.
ZHANG Qiang, WANG Weiqing, LI Changkai. Effect of grading rings for improving the electric field distribution of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(4):26-294.
- [27] ZHAO T, COMBER M G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):313-318.
- 吴 伟(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高电压试验技术、输电线路防灾技术研究。
- 蒋正龙(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网防灾减灾。
- 陆佳政(1969—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为电力系统防灾减灾技术。