

500 kV 输电线路用防冰防雷复合绝缘子 仿真及试验研究

姚 尧¹, 蒋正龙², 吴 伟², 张 致¹, 胡建平², 管皓喆³

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430077; 2. 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; 3. 三峡大学, 宜昌 443000)

摘 要: 500 kV 防冰防雷复合绝缘子同时具有防雷和防冰闪功能。结合实际结构尺寸, 对 500 kV 防冰防雷复合绝缘子在未覆冰状态和覆冰状态下的电场分布进行仿真分析, 重点对均压环和绝缘子伞裙边缘两处局部高场强区域的电场分布进行了研究。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。通过雷电冲击试验确定了均压环绝缘段的间隙距离为 1.8 m。通过雷电冲击闪络电压试验、操作冲击耐受试验、淋雨湿耐受、覆冰耐受试验验证了新型绝缘子的防冰防雷性能。

关键词: 复合绝缘子; 防冰防雷性能; 电位分布; 雷电冲击闪络电压试验; 操作冲击耐受试验; 覆冰耐受试验

0 引言

由 500 kV 输电线路组成的超高压电网已成为我国的骨干网络。由于其输送距离远, 输送通道经常会穿越一些地形复杂、具有微地形微气象特征的地区。在雷电活动频繁和冬季易覆冰时期, 易发生覆冰闪络或雷击闪络, 造成线路跳闸, 甚至停运导致负荷损失, 严重影响骨干电网的安全稳定运行和电能输送^[1-3]。

目前防覆冰闪络和防雷击闪络的技术措施功能都比较单一。防覆冰闪络的主要措施: 对于玻璃或瓷绝缘子, 通常采用增加绝缘子片数、采用大盘径绝缘子与普通绝缘子插花布置的方式, 对于复合绝缘子, 通过采用加大伞径和伞间距以及增加绝缘子长度的方法, 以防止伞裙冰凌桥接和增加绝缘长度来提高绝缘子覆冰闪络电压^[4-5]。对于防止雷击闪络, 除架设避雷线、降低杆塔接地电阻等传统措施外, 加装线路避雷器是运行经验公认最好的防雷击闪络措施。但由于线路避雷器是在塔头上与绝缘子串并联, 安装难度大, 运行维护也比较困难。

国网湖南省电力公司和国网湖北省电力公司依托国网公司总部科技项目“330~500 kV 输电线路防冰防雷复合绝缘关键技术研究及应用”研制了一种 500 kV 输电线路用防冰防雷复合绝缘子, 将绝缘子的防雷击闪络和覆冰闪络功能合二为一, 以期有

效减少输电线路在雨雪冰冻天气和雷电活动频繁情况下发生雷击闪络和覆冰闪络事故, 提高电网供电的可靠性^[6-7]。

本文以 500 kV 防冰防雷复合绝缘子的实际结构尺寸, 开展未覆冰状态和覆冰状态下的电场分布进行仿真分析, 结合雷电冲击试验确定绝缘段间隙距离。并开展了雷电冲击闪络电压试验、操作冲击耐受试验、淋雨湿耐受、覆冰耐受试验以验证新型复合绝缘子的防冰和防雷性能。

1 500 kV 防冰防雷复合绝缘子整体结构

500 kV 防冰防雷绝缘子由内部有环形电阻片的防雷段和带上下均压环的绝缘段组成。正常运行时, 绝缘子承担了绝大部分的线路运行电压。在线路遭受雷击的情况下, 绝缘段两端均压环被击穿, 雷电流冲击能量被避雷段内部的环形氧化锌阀片所吸收, 以保证雷电冲击下不发生闪络。雷击过后, 绝缘段快速恢复绝缘。整个雷击过程中均不发生线路直接对地放电现象, 防止雷击时绝缘子闪络造成线路接地跳闸。为防止伞裙冰凌桥接采用大中小伞交替的方式以避免覆冰时发生闪络。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。500 kV 防冰防雷绝缘子结构如图 1 所示, 结构参数如表 1 所示。

2 电场分布仿真研究

2.1 电场仿真模型

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。仿真计算中，将距离绝缘子 10 m 远处的空气层、铁塔或低压侧避雷器金具赋为零电位，作为仿真的边界条件。导线及金具施加线路运行的相电压峰值^[8-10]，计算模型见图 2。

分别计算未覆冰状态和覆冰状态下防冰防雷复合绝缘子的电场分布。

2.2 均压环电场分布

假设 500 kV 线路正常运行时绝缘子两端承受的最大工频过电压全部加在绝缘段。仿真模型中，绝缘子长度为 2 300 mm，两端均压环直径为 370 mm，管径为 48.5 mm。分别计算当均压环间距由 1.0 m 至 2.2 m 时，复合绝缘子表面的电场分布如图 3 所示。不同间隙距离下复合绝缘子最大场强见表 2。由计算结果可见，均压环间距由 1.0 m 至 2.2 m 时，复合绝缘子表面的最大场强均小于空气的击穿场强。

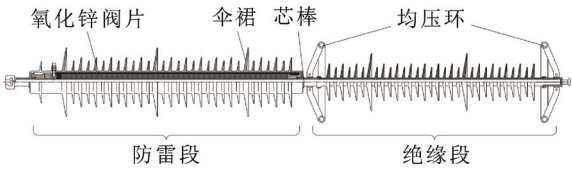


图 1 防冰防雷复合绝缘子结构示意图

表 1 防冰防雷复合绝缘子结构参数

参数	数值
整体结构长度/mm	5 220
避雷段长度/mm	2 890
绝缘段长度/mm	2 330
均压环间距/mm	1 800
伞直径/mm	200~350

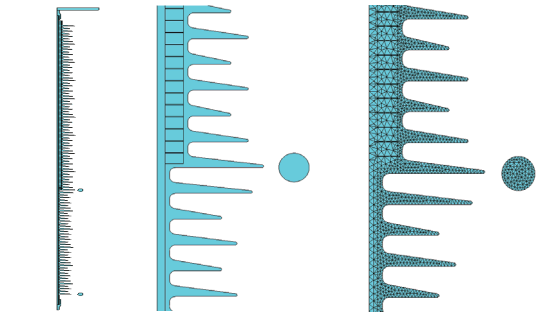
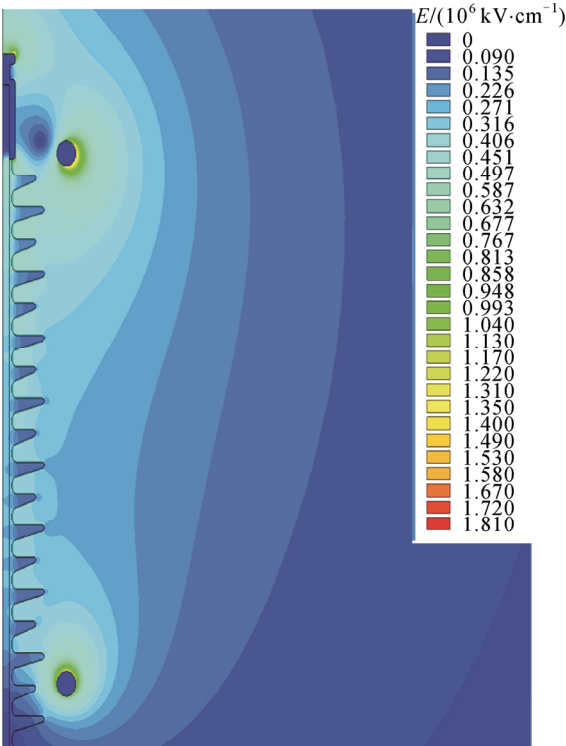


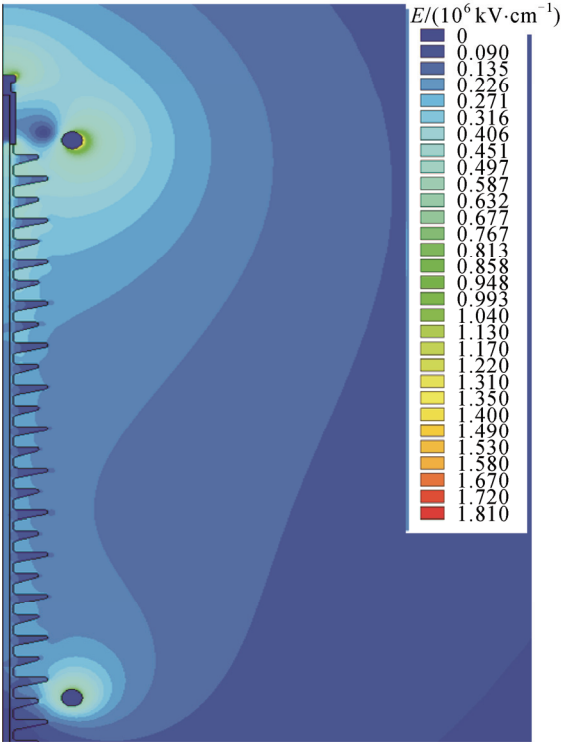
图 2 500 kV 防雷防冰复合绝缘子计算模型

表 2 不同间隙距离 L 下复合绝缘子最大场强 E

L/m	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$E/(\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1})$	22.1	21.4	20.9	20.5	20.0	19.7



(a) 1 m间距



(b) 2 m间距

图 3 不同间距下的电场分布 (kV/cm)

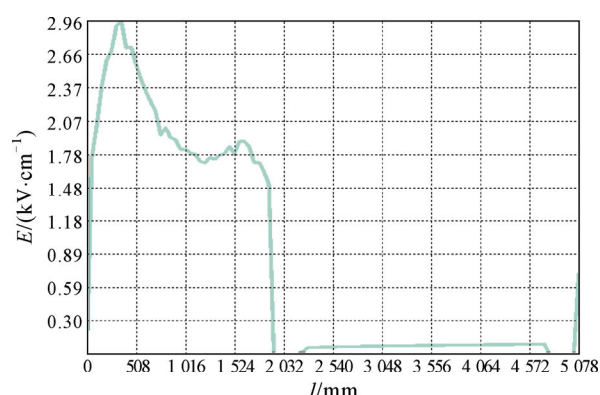
2.3 未覆冰状态下电场分布

在未覆冰状态下, 500 kV 防雷防冰复合绝缘子两端承受运行电压时的电位分布如图 4 所示。

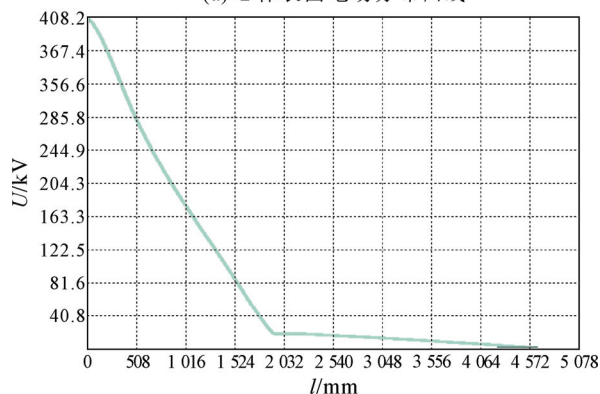
由场强分布可知, 电压在绝缘段降落很快, 靠近绝缘子避雷段时, 电压变化的趋势变缓。由于受均压环的影响, 两均压环附近绝缘子表面电场出现高点, 场强分布呈现出明显的马鞍形。最大场强出现在导线侧均压环外侧, 为 1 810 kV/m, 当达到最大值后开始下降, 接近上均压环时又呈现出上升趋势。而绝缘段伞裙内表面场强不超过 350 kV/m。

2.4 覆冰状况下电场分布

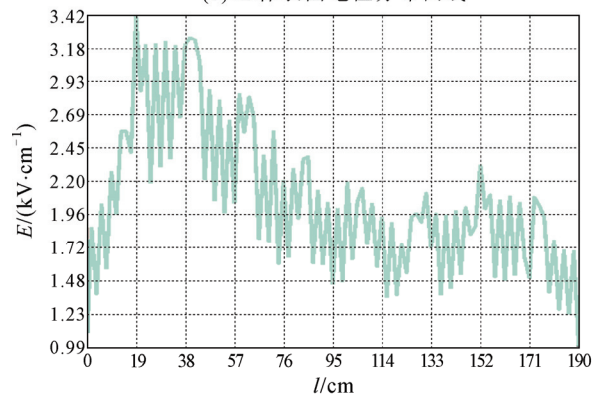
在 5 mm、10 mm 覆冰状况下, 取冰的相对介



(a) 芯棒表面电场分布曲线



(b) 芯棒表面电位分布曲线

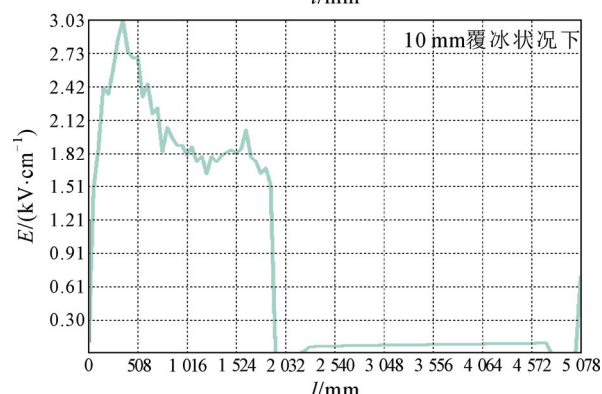
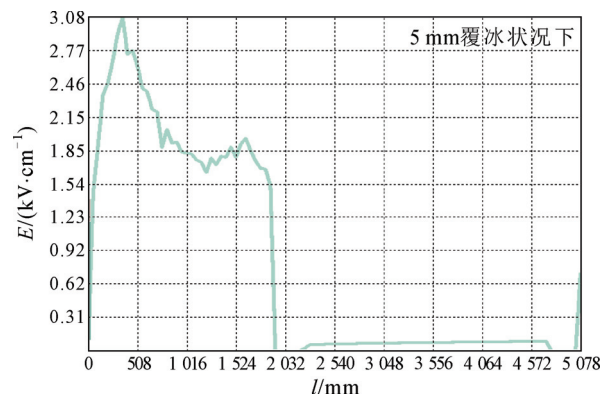


(c) 绝缘段伞裙表面场强分布

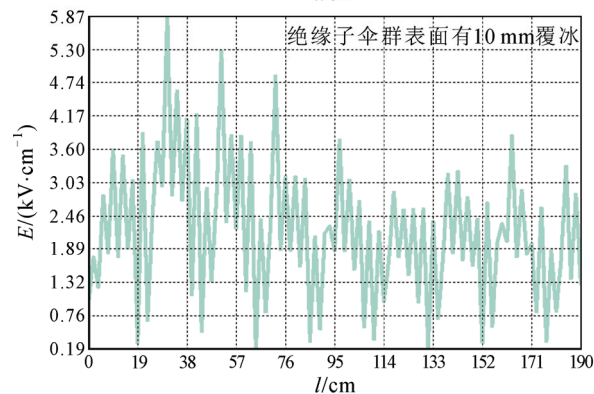
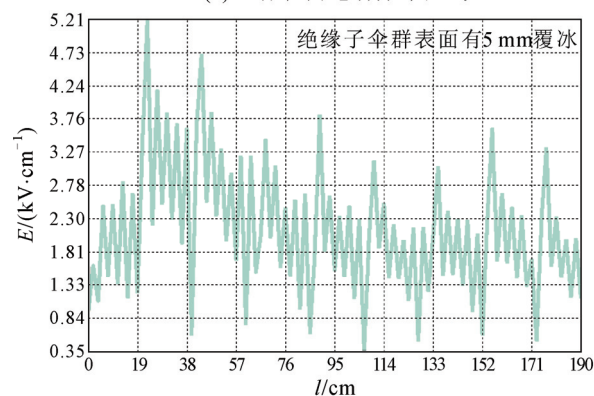
图 4 防雷防冰绝缘子电场电位分布

电常数为 75, 500 kV 防雷防冰复合绝缘子两端施加工频电压的电场分布如图 5 所示。

在覆冰状态下, 整个绝缘子表面的最大场强约为 600 kV/m, 绝缘子表面局部场强均低于空气平均击穿场强。



(a) 整体轴向电场分布曲线



(b) 绝缘段伞裙表面电场分布曲线

图 5 防雷防冰复合绝缘子的电场和电位分布图

2.5 绝缘子伞裙电场分布

通过对未覆冰和覆冰状态下的电场分布进行仿真计算可得出,在高压端、避雷器段和绝缘段交界面处的位置,伞裙场强最高。因此,只需分析交界面处附近伞裙表面的场强,便能判断防冰防雷绝缘子是否满足现场运行条件。

图6为高压端附近5片伞裙的电场分布曲线,横坐标表示轴线距离。由图6可见,伞裙的最大场强在200~250 kV/m间变化,高压端伞裙及附近区域的电场分布很均匀,高压端伞裙场强较小。

图7为防雷段和避雷器段交界处伞裙最大场强分布。由图7可见,防雷段和绝缘段交界处沿轴向路径的电场在90~450 kV/m之间,远远小于空气的平均击穿场强3 000 kV/m。

3 间隙参数试验研究

采用逐级升压法以获取绝缘段均压环间隙的50%雷电冲击击穿电压,试验设备为4 200 kV的冲击电压发生器,试品的均压环直径为370 mm,管直径为48.5 mm。在标准气象条件下,试验结果如图8所示。

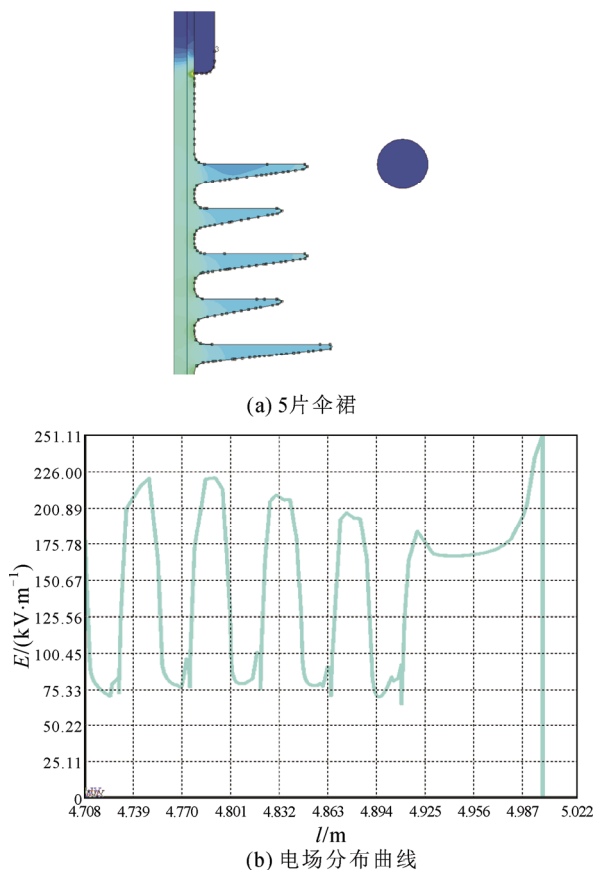


图6 高压端绝缘子外表面路径电场分布曲线

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两均压环外管之间,且远离绝缘子表面,不会对绝缘子表面产生的影响。当间隙距离为1.6~2.2 m时,绝缘子间隙的50%雷电冲击击穿电压值集中在1 100~1 400 kV范围内。

根据试验结果,绝缘段间隙距离取为1.8 m时,对500 kV线路绝缘子及电网设备具有良好的雷电防护作用,此时50%雷电冲击击穿电压和工频击穿

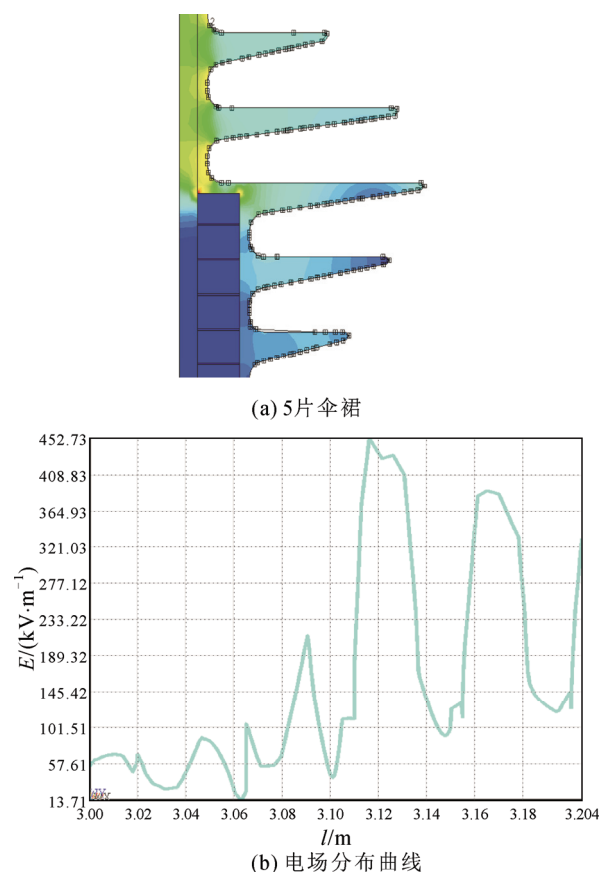


图7 防雷段和绝缘段交界处路径电场分布曲线

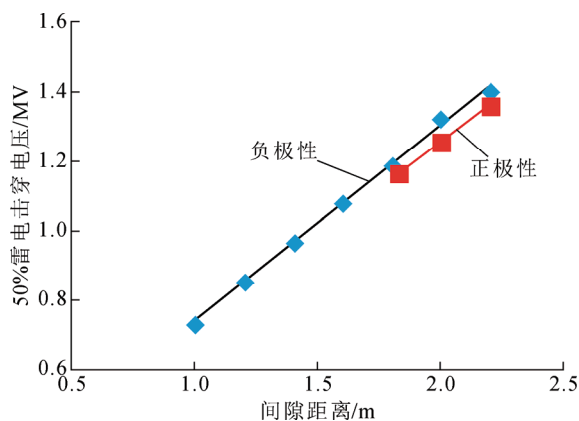


图8 绝缘子均压环间隙距离与雷电冲击击穿电压关系

均满足规程要求^[11], 在雷电流过零后电弧自动熄灭, 不会出现电弧重燃问题。

4 性能试验研究

为获取绝缘子的防冰防雷性能, 在湖南防灾减灾中心的高压试验大厅和人工气候室, 对整支绝缘子进行了雷电冲击 50% 闪络电压试验、操作冲击耐受试验、淋雨湿耐受、覆冰耐受试验。

1) 雷电冲击 50% 闪络电压试验

采用波形为 1.2/50 μ s 标准负极性雷电波形, 分别对 1.0~2.0 m 内 6 个不同均压环间隙距离进行试验, 每个间隙试验次数为 15 次, 在同一电压下出现 7~8 次间隙击穿时, 该电压作为 50% 闪络电压。试验获得的 50% 雷电击穿电压曲线见图 9。

当均压环间隙为 2.0 m 时, 50% 雷电冲击闪络电压约为 1 300 kV, 而且当绝缘子绝缘段干弧距离不小于均压环间隙距离的 105% 时, 所有的击穿路径均出现在远离绝缘子表面的两均压环之间。考虑雷电波衰减和进线段保护, 绝缘子均压环选择 2 m 及以下间隙是完全可行的, 整支绝缘子呈现出良好的雷击保护效果, 满足变电站防雷保护的要求。

2) 操作冲击耐受试验

采用波形为 250/2 500 μ s 标准正极性操作波形, 分别对 1.50、1.78、2.0 m 共 3 个不同均压环间隙距离进行试验, 每个间隙试验次数为 15 次, 在同一电压未出现 1 次间隙击穿时, 该电压作为间隙能够耐受的冲击电压, 试验结果如表 3 所示。

500 kV 电网操作过电压小于 900 kV (峰值), 因此, 无论是串接避雷器, 1.78 m 及以上间隙均能承受操作过电压的作用。

3) 淋雨湿耐受试验

调整试验用水的电导率至 100 μ S/cm, 在试验环境温度为 14 $^{\circ}$ C 的条件下, 按规程开展淋雨湿耐受试验, 试验电压有效值为 510 kV。试验结果表明, 绝缘段通过了 5 min 的湿耐受试验, 未发生绝缘子闪络。

4) 覆冰耐受试验

在覆冰气候室内环境温度为 -5 $^{\circ}$ C 的情况下, 对整支绝缘子进行覆冰耐受试验。试验时电导率为 50 μ S/cm^[12-13]。当覆冰为 10 mm 时, 绝缘子段大伞裙上出现 11 cm 长的冰凌。为模拟最严苛的环境, 试验中施加 450 kV 的耐受电压 (有效值), 该电压高于 500 kV 线路可能出现的最大工频过电压。试验结

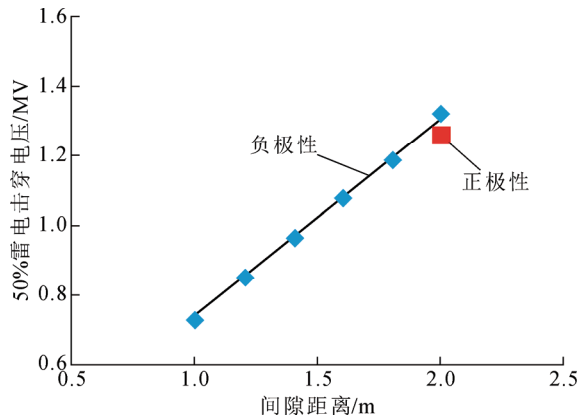


图 9 50% 雷电闪络电压随间隙距离变化曲线

表 3 操作冲击耐受试验结果

均压环间距/m	操作冲击次数	操作电压峰值/kV	击穿闪络情况
1.5	15	850	未发生
1.78	15	1 100	未发生
2.0	15	1 200	未发生

果表明, 整支绝缘子通过了 5 min 的覆冰耐受试验, 未发生覆冰闪络。

为考核融冰情况下绝缘子的耐受, 试验中将覆冰气候室的温度升高至 0.5~1 $^{\circ}$ C。此时, 绝缘子表面的覆冰开始融化, 此时再次施加 450 kV 耐受电压, 整支绝缘子依然通过了 5 min 的覆冰耐受试验, 未出现融冰闪络现象。

4 结论

本文结合 500 kV 防冰防雷复合绝缘子的实际结构, 开展了未覆冰状态和覆冰状态下的电场分布仿真分析, 重点对均压环和绝缘子伞裙边缘两处局部高场强区域的电场分布进行研究, 通过雷电冲击试验确定绝缘段间隙距离, 开展雷电冲击闪络电压试验、操作冲击耐受试验、淋雨湿耐受、覆冰耐受试验以验证新型绝缘子的性能, 得到了以下结论:

1) 根据试验结果和仿真分析, 500 kV 防冰防雷绝缘子绝缘段采用 1.8 m 的间隙距离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。

2) 通过未覆冰和覆冰情况下电场分布的仿真分析, 最大场强出现在高压端、绝缘段和避雷段交界处, 绝缘子表面局部场强均低于空气平均击穿场强。即使在覆冰情况下, 绝缘上出现的最大工作场强远低于空气的击穿场强, 电场分布比较均匀, 场强分布满足现场运行要求。

3) 试验表明, 绝缘段能承受 500 kV 输电线路运行中可能出现的最大工频过电压和操作过电压而不发生闪络。即使在避雷器段氧化锌电阻片损毁, 线路仍然能正常运行。

4) 防冰防雷绝缘子的均压环选择 2 m 及以下间隙时, 整支绝缘子呈现良好的雷击保护效果。

参考文献

- [1] 蒋正龙, 陆佳政, 雷红才, 等. 湖南 2008 年冰灾引起的倒杆断线原因分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2468-2474.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 蒋正龙, 吴 伟, 尹小根, 等. 具有防雷功能的 500 kV 线路绝缘子优化设计及防雷防冰闪试验分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(12):

3843-3849.

- [7] 吴 伟, 蒋正龙, 陆佳政, 等. 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[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 9-15.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 孙 振, 王建国. 110 kV~500 kV 复合绝缘子的雷电闪络特性[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 43-46.
- [12] 蒋兴良, 袁 超. 220 kV 防冰闪型复合绝缘子冰闪特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2506-2513.
- [13] 刘 毓, 蒋兴良, 舒立春, 等. 复合绝缘子伞裙结构特征参数对其冰闪特性的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 319-326.

姚 尧

1979—, 男, 博士, 高工

主要从事高电压技术和电力系统过电压, 输电线路防灾减灾方面的研究工作

E-mail: jefferson_yao@163.com

收稿日期 2018-07-10 编辑 卫李静