

不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真分析

张 湘¹ 聂鸿宇² 龚奕宇²

(1. 自贡电业局 四川 自贡 643000; 2. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要:已有研究表明,通过涂覆憎水性材料可减少绝缘子覆冰量,并提高其覆冰闪络电压。目前使用较为广泛的为RTV涂料,但近年来,国内外一些研究人员研制出了仿荷叶超疏水涂料,其静态接触角超过 160° ,将其涂覆于绝缘子表面,取得了良好的防覆冰效果。根据普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态,建立了覆冰绝缘子串电场仿真模型,并进行了仿真分析。结果表明,在相同外施电压下,超疏水绝缘子串模型的最大表面电场与电场不均匀系数均低于RTV绝缘子串模型以及无涂层玻璃绝缘子串模型。研究成果对于防止绝缘子串覆冰闪络事故具有积极的指导意义。

关键词:绝缘子;憎水性;覆冰;电场;仿真

Abstract: There are some studies shown that the ice-covered quantity of insulator can be reduced and ice-covered flashover voltage can be improved by coating the hydrophobic materials. At present, the RTV coating materials are more widely used. In recent years, however, the domestic and foreign researchers have developed the lotus leaf imitated super-hydrophobic coatings, whose static contact angle exceeds 160° , and a good anti-icing effect is obtained by coating it on the surface of the insulator. According to the actual ice-covered state of the common glass insulator, the RTV-coated insulator and the insulator coated with super-hydrophobic coatings, the simulation model for the electric field of the iced insulator string is established and the simulation analysis is carried out. The result shows that, under the same applied voltage, both the maximum surface electric field and the electric field uniformity coefficient of the hydrophobic insulator strings model is less than that of the RTV insulator string model as well as the uncoated glass insulator string model. The research has a positive significance to prevent the icing flashover accident of insulator strings.

Key words: insulator; hydrophobic nature; ice coating; electric field; simulation

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)06-0054-04

0 引言

输电线路覆冰易造成导线舞动、断线、倒杆(塔)、绝缘子闪络、线路跳闸、甚至使电网瘫痪等事故,严重威胁电力系统的安全运行,影响人们正常的生产和生活,从而造成巨大的经济损失和一定的社会影响^[1-4]。2012年年初,持续低温雨雪天气导致南方电网部分电力线路出现严重覆冰,贵州和广西电网共有超过20条500 kV输电线路出现闪络导致跳闸等覆冰事故。随着全球气候变暖影响,极端天气事件频繁出现,输电线路发生冰雪灾害事故的概率有所上升,如何防止输电线路防覆冰,提高绝缘子串冰闪电压显得更加重要和迫切。

目前,国内外研究和探索过30多种防冰除冰方

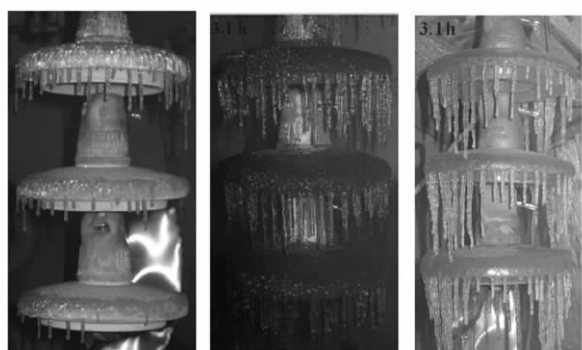
法^[5]。其中,憎水性涂料具有优良的憎水性和低表面性能特性,能最大限度地减小过冷却水的被捕获率或冰的附着力,使其极易脱落和除去,且无需附加能量,有助于限制冰灾,可以达到绝缘子防覆冰的目的^[6]。文献[7]考察了在雨淞环境中,RTV涂层对735 kV绝缘子串覆冰闪络特性的影响,涂覆RTV硅橡胶涂层后,绝缘子串的最大耐受电压提高了11%。近年来,仿“荷叶”超疏水表面的研究有了重大突破,该表面憎水性比RTV涂料更强,水滴静态接触角通常大于 150° ,水滴滚动角可小于 5° 。相关研究表明,超疏水涂料比RTV涂料具有更好的防覆冰效果^[8]。

根据FC100/146型玻璃绝缘子串的实际结构与尺寸,并结合普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态,建立了覆冰绝缘子串电场仿真模型,并进行了仿

真分析。研究内容对于防止绝缘子串覆冰闪络事故具有积极的指导意义。

1 不同憎水性绝缘子串覆冰形态

文献[8]对普通玻璃绝缘子、涂覆 RTV 涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子进行了覆冰试验,在 -5°C 、雨量为 $90\text{ L/h}\cdot\text{m}^2$ 、风速为 3 m/s 的环境下覆冰 3 h 后,这 3 种绝缘子的覆冰形态如图 1 所示。绝缘子局部覆冰形态如图 2 所示。



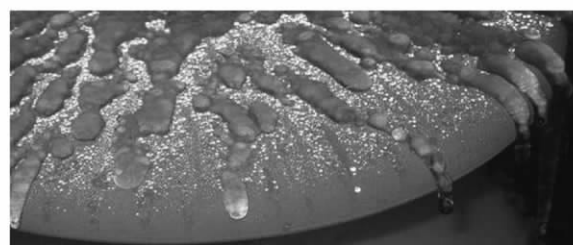
(a) 超疏水绝缘子 (b) RTV 绝缘子 (c) 普通绝缘子

图 1 覆冰约 3 h 后的覆冰形貌图

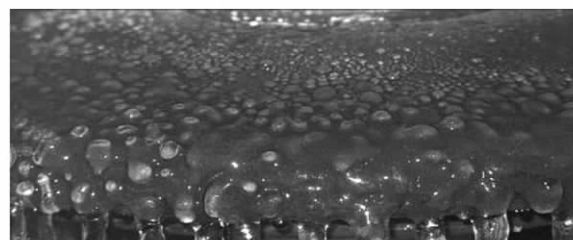
经历约 3 h 人工覆冰实验后,超疏水玻璃绝缘子串上的覆冰量、伞裙边沿的冰凌长度均明显小于其他两种绝缘子串上的覆冰量。图 2 显示,超疏水玻璃绝缘子伞群上表面分布着少量相互孤立的冰珠或条状覆冰,伞裙边沿冰凌较短且稀疏;涂覆 RTV 硅橡胶涂层玻璃绝缘子伞群表面的过冷却水滴已经被冻结成很厚的冰层,冰层表面粗糙,牢固地覆盖在整个伞群表面,局部区域冰层不连续,伞裙边沿的冰凌粗而密集;无涂层玻璃绝缘子表面的过冷却水滴也被冻结成厚厚的冰层,冰层表面相对平整而透明,伞裙边沿的冰凌最密集,长度也最长。

2 覆冰绝缘子串电场仿真模型

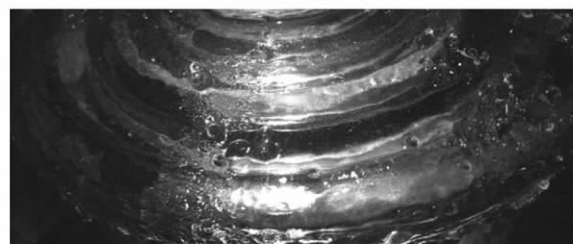
根据 FC100/146 型玻璃绝缘子串的实际结构与尺寸,并结合普通玻璃绝缘子、涂覆 RTV 涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态,利用 Maxwell 电磁场仿真软件建立了二维覆冰绝缘子串电场仿真模型,模型如图 3 所示。FC100/146 型玻璃绝缘子的参数如表 1 所示。



(a) 超疏水绝缘子

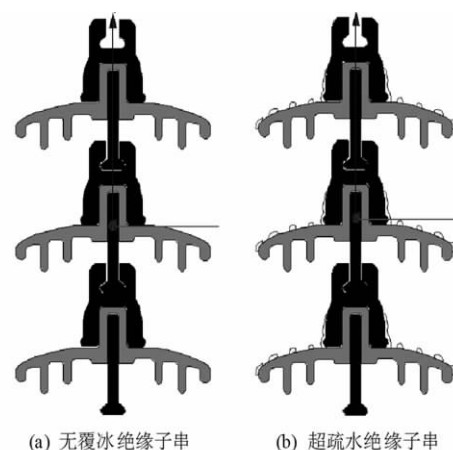


(b) RTV 绝缘子



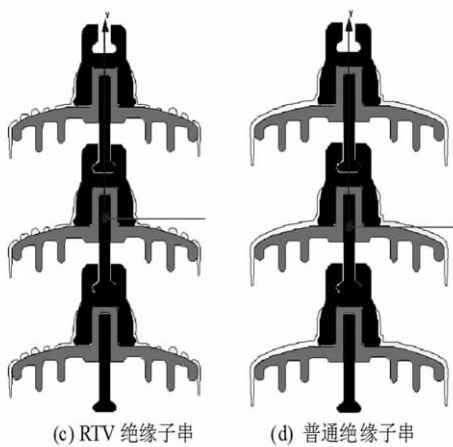
(c) 普通绝缘子

图 2 覆冰约 3 小时后不同绝缘子上的覆冰形貌



(a) 无覆冰绝缘子串

(b) 超疏水绝缘子串



(c) RTV 绝缘子串

(d) 普通绝缘子串

图 3 不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真模型

表1 FC100/146 玻璃绝缘子参数

型号	结构高度 H/mm	盘径 D/mm	爬电距离 L/mm
FC100/146	146	255	320

3 仿真及结果分析

建立好模型后,按照以下步骤进行电场仿真。

(1) 选择求解器。这里选择静电场求解器。

(2) 设置材料属性,包括电导率、介电常数、磁导率。这里所有材料均选择材料库中默认材料。

(3) 设置激励源和边界条件。将外加激励电压设置为 35 kV,施加于底部绝缘子挂钩处,顶端绝缘子高帽设置为零电位。

(4) 自适应网格剖分。

(5) 设置有限元计算参数,包括步长、精度、收敛条件等。这里选择默认设置。

(6) 有限元计算。

(7) 后处理。在后处理模块中,可以观察电场强度云图、电场大小等参数。

仿真时,忽略了实际输电线路中输电导线、铁塔等对绝缘子串表面电场的影响。仿真所得到的绝缘子串电场云图如图4所示。

将绝缘子串从上至下分别编号为1、2、3号绝缘子。由仿真结果可知绝缘子串钢帽、挂钩钢脚处电场强度较高,易引起局部电弧,从而导致绝缘子闪络;覆冰后,钢帽处电场强度有所下降,而挂钩钢脚处电场强度明显增强,说明覆冰后绝缘子串闪络很可能由挂钩处开始发展;绝缘子伞群边沿冰棱越长,绝缘子底部电场分布越不均匀,冰棱尖端电场明显加强,这将导致电弧会沿着冰棱尖端发展,缩短了绝缘子的爬电距离,增大了绝缘子串闪络概率。将电场不均匀系数 f 定义为表面最高电场强度 $E_{\max}$ 与平均电场强度 E_a 的比值^[9-10],即

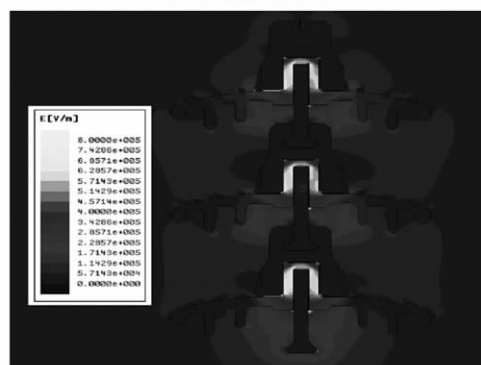
$$f = E_{\max} / E_a \quad (1)$$

不同憎水性绝缘子串不同位置绝缘子表面最高电场强度 $E_{\max}$ 与平均电场强度 E_a 分别如图5与图6所示。根据式(1)计算出来的不均匀系数 f 如图7所示。

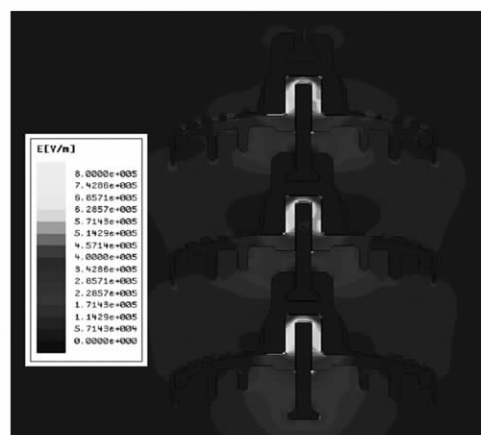
由图5可知,与没有覆冰的绝缘子串相比,覆冰后,RTV绝缘子模型和无涂层普通绝缘子模型表面最高电场几乎不变,而超疏水绝缘子模型表面最高



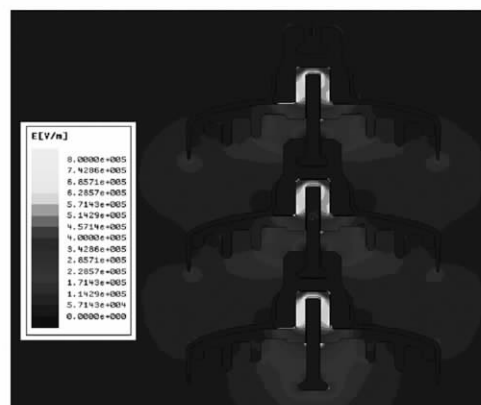
(a) 无覆冰绝缘子



(b) 超疏水绝缘子串



(c) RTV 绝缘子串



(d) 普通绝缘子串

图4 不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真模型

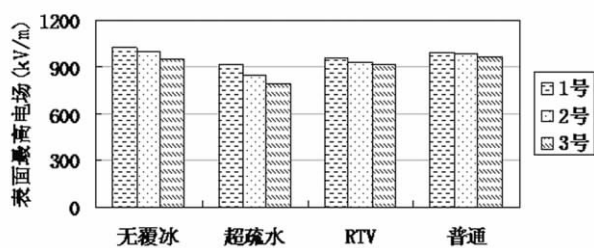


图5 不同位置覆冰绝缘子表面最高电场强度

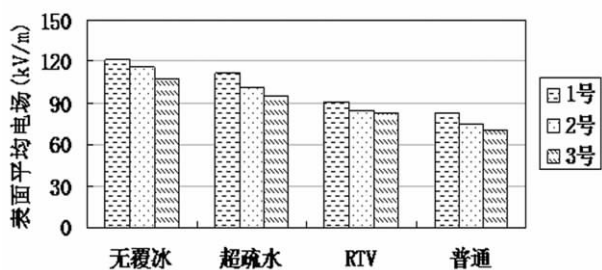


图6 不同位置覆冰绝缘子表面平均电场强度

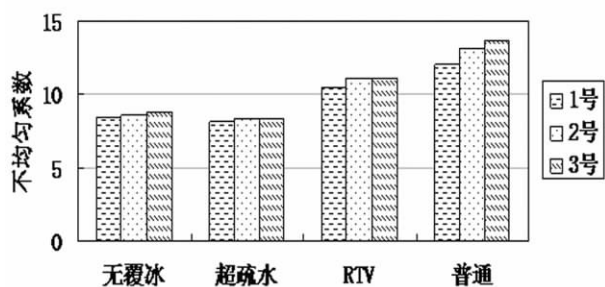


图7 不同憎水性绝缘子表面电场不均匀系数

电场下降约9%。由图6可知,与没有覆冰的绝缘子串相比,覆冰后3种绝缘子模型表面平均电场强度均有所下降。

表面电场不均匀系数结果表明,RTV绝缘子模型和无涂层普通绝缘子电场不均匀系数均高于没有覆冰时的电场不均匀系数,且无涂层普通绝缘子电场不均匀系数最高,而超疏水绝缘子电场不均匀系数与没有覆冰时的电场不均匀系数相差不大。

相关研究表明,绝缘子沿面闪络电压的大小与表面电场不均匀系数成反比^[11],因此可以推断,覆冰后,普通绝缘子串的覆冰闪络电压最低,RTV绝缘子串的覆冰闪络电压稍高,而涂覆超疏水涂层后的绝缘子串闪络电压最高。表明憎水性涂料可提高覆冰后绝缘子的覆冰闪络电压,且憎水性越强,效果越好。

4 结 论

根据FC100/146型玻璃绝缘子串的实际结构

与尺寸,并结合普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态,建立了二维覆冰绝缘子串电场仿真模型,并进行了电场仿真分析,以上工作可总结如下。

①覆冰后,钢帽处电场强度有所下降,而挂钩钢脚处电场强度明显增强,说明覆冰后绝缘子串闪络很可能由挂钩处开始发展。

②绝缘子伞群边沿冰棱越长,绝缘子底部电场分布越不均匀,冰棱尖端电场明显加强。

③与没有覆冰的绝缘子串相比,覆冰后,RTV绝缘子模型和无涂层普通绝缘子模型表面最高电场几乎不变,而超疏水绝缘子模型表面最高电场下降约9%。同时3种绝缘子模型表面平均电场强度均有所下降。

④表面电场不均匀系数结果表明,超疏水绝缘子电场不均匀系数最小,与没有覆冰时的电场不均匀系数相差不大。

⑤憎水性涂料可提高覆冰后绝缘子的覆冰闪络电压,且憎水性越强,效果越好。

参考文献

- [1] 孙才新,司马文霞,苏立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社,2002.
- [2] 蒋兴良. 输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学,1997.
- [3] 张宏志. 大面积导线覆冰舞动事故的调查与分析[J]. 东北电力技术,2001(12): 15-19.
- [4] 逸梅,史惠萍. 绝缘子的覆冰及覆冰绝缘子的放电特性[J]. 广西电力技术,1995(3): 20-24.
- [5] 蒋兴良,张丽华. 输电线路除冰防冰技术综述[J]. 高电压技术,1997,23(1): 73-76.
- [6] 蒋兴良,肖代波,孙才新. 憎水性涂料在输电线路防冰中的应用前景[J]. 南方电网技术,2008,2(2): 13-18.
- [7] M. J. Mashmool, C. Volat, M. Farzaneh. A New Method for Measuring Ice Adhesion Strength at an Ice-substrate Interface[J]. Hydrol. Process, 2006, 20: 645-655.
- [8] 赵玉顺. 绝缘子超疏水涂层的制备方法与防冰性能研究[D]. 重庆: 重庆大学,2010.
- [9] 邱毓吕,施围,张文元. 高电压工程[M]. 西安: 西安交通大学出版社,1994.
- [10] 朱德恒,严璋. 高电压绝缘[M]. 北京: 水利电力出版社,1980.
- [11] 成俊奇,丁立健. 绝缘子表面电场分布的数值仿真[J]. 电磁避雷器,2009(6): 16-18.

(收稿日期:2012-10-23)