

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.007

车顶绝缘子湿润条件下表面电场分布研究

罗蜀彩¹, 彭刚², 李军², 张血琴³, 杨坤松³, 吴广宁³

(1. 国网四川检修公司, 成都 610042; 2. 成都铁路局, 成都 640031; 3. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 针对冬季雨露、大雾天气下动车组车顶绝缘子闪络问题, 利用电准静态场和有限元理论构建了动车组受电弓支撑绝缘子高压部件以及含水分车顶绝缘子的三维模型, 研究了有分离水珠的绝缘子沿面电场分布特性, 分析了洁净水膜及染污水膜对绝缘子沿面电场分布影响。研究结果表明: 含水珠绝缘子对整体空间上的电场分布影响甚微, 局部电场畸变强烈, 最大场强达原场强 6.31 倍; 绝缘子圆周方向上不对称, 近支架端 (0°) 的最大电场最弱, 远离支架端 (180°) 最大电场最强, 最大场强随圆周角度增大而增大, 且圆周上最大场强均超过空气电晕起始场强; 憎水性丧失染污水膜出现后更易引起车顶绝缘子电晕放电, 比洁净水膜的情况影响更剧烈。

关键词: 车顶绝缘子; 水珠; 水膜; 电场; 有限元; 雾闪

Study of Surface Electric Field Distribution of Railway Coach Roof Insulator Under Wet Condition

LUO Shucui¹, PENG Gang², LI Jun², ZHANG Xueqin³, YANG Kunsong³, WU Guangning³

(1. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610042, China; 2. Chengdu Railway Bureau, Chengdu 640031, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to solve fog flashover problem of the roof insulator on Electric Motor train Unit (EMU) in rainy and foggy winter environment, 3D finite element model (FEM) of EMU pantograph support insulator and the water droplets on the insulator surfaces are established on the basis of quasi-static electric field and the finite element method. The influence of separated water droplets, clean water films and contaminated water films on the surface electric field distribution along the roof insulator is discussed. The results indicate that the water droplets have almost no influence on the whole electric field but distort the neighboring electric field of the insulator, while the maximum field intensity has 6.31 times of the original field. Considering the asymmetry of the insulator, the maximum field intensities increase with the rise of circumferential angle, and all of them exceed the air corona inception field strength. Moreover, with loss of hydrophobicity, water films induce corona discharge easily and contaminated water films even lead to fog flashover.

Key words: roof insulator; water droplet; water film; electric field; finite element model; fog flashover

0 引言

动车组因安全舒适、低耗便捷, 现成为中国重要的运载交通工具。在冬季雨露、大雾天气下动车组车顶绝缘子闪络易破坏动车组安全稳定运行。2012 年 1 月 1 日至 1 月 18 日, 西安铁路局配属的

13 组 CRH2 型动车组中, 就有 8 组在大雾天气下发生了车顶绝缘子雾闪故障。2013 年初北京西至武汉站的动车 D2031 和前来转运乘客的 G525 相继在信阳段发生车顶绝缘子雾闪事故, 出现“爆闪”停车。对闪络后的事故绝缘子和新投入运营的绝缘子进行憎水性试验, 发现事故绝缘子憎水性较差。电晕放电是引起绝缘材料老化、憎水性能下降的首要因素^[1]。因此, 深入研究绝缘子在冬季雨露、大雾环境

收稿日期: 2015-06-19; 修回日期: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51177136)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51177136).

下表面电场分布特性很重要。

表面水分引起的电晕放电致使绝缘子憎水性下降的研究,最早 1996 年由美国的 Gorur 基于模拟电荷法计算出非陶瓷绝缘子 (non-ceramic insulators, NCI) 表面出现分离水珠后引起的电场变化,提出最大场强点位于伞裙—空气—水的交界处,可能触发放电^[2]。文[3]中讨论了水滴的体积和憎水角大小对平均起晕场强的影响,试验结果指出绝缘子憎水性丧失速率与电场强度大小成正比例;文[4]中结合试验和仿真指出 NCI 表面能明确观察到水珠电晕现象,电晕会使表面材料白化、憎水性丧失以及破裂,通过试验测得的场强阈值 0.38 kV/mm 可以作为能否发生电晕现象的标准;文[5]中通过测试水珠在绝缘子表面的接触角得到清洁绝缘子比污秽绝缘子具有更好的憎水性,且水珠会改变绝缘子沿面电场和电位分布,降低初始起晕电压。上述研究主要集中在分析电晕对绝缘子材料的破坏机理,针对引起水珠电晕放电的源头电场强度的计算以及水珠对其产生的畸变作用尚未分析。文[6-7]中基于真实绝缘子模型,建立了不同特征的水珠、水膜分布子模型,探讨了相应的场强变化。但构建的简化模型不适用于车顶绝缘子。高场强区域聚集在绝缘子不同位置,这对电弧的发展以及表面材料的破坏有重要影响。虽然国内外学者采用多种方法监测输电线路绝缘子运行状态^[8-11],但是车顶绝缘子不同于输电线路中绝缘子的高压部件,有高压端受电弓、支架以及低压端接地车顶平面的影响,空间电场表现出不同的分布特征,绝缘子表面的水珠对空间电场的影响特性有所不同,引起的电场畸变特征复杂。

文中针对动车组冬季常遇低温、雨露、大雾等特殊环境,将较其他车顶绝缘子高度最低、电气间隙最小,最易引发雾闪事件的车顶受电弓支撑绝缘子作为研究对象,分析了水珠对绝缘子表面电场分布特性的影响。考虑绝缘子受车顶高压部件的结构影响,利用电准静态法和有限元理论建立车顶高压设备以及水珠三维模型,分析了水珠分布于绝缘子表面的电场;分析了绝缘子表面憎水性破坏形成水膜后的绝缘子表面电场分布规律,为研究憎水性车顶受电弓绝缘子起弧特性及闪络机理提供了基础。

1 计算模型

1.1 车顶高压设备模型

车顶受电弓绝缘子是车顶高压部件支撑及绝缘的器件。动车组运行过程中,受电弓会升起从接触网导线受流,受电弓及支架、接触线构成高压端,

而车体接地,绝缘子底座为低压端^[12]。图 1 为考虑受电弓支架、受电弓、接触导线、绝缘子底座影响后的求解区域,图 1 中受电弓降落时受电弓支撑绝缘子因周围环境的影响,圆周方向不对称。因此为得出车顶受电弓支撑绝缘子沿面电场分布,必定考虑绝缘子周围环境的影响。

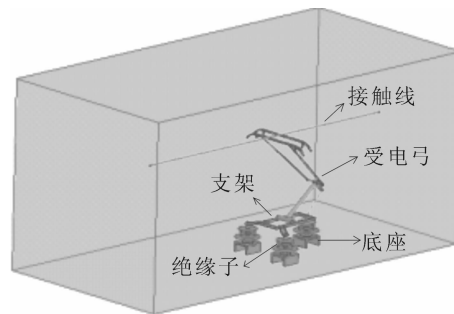


图 1 车顶高压设备求解区域

Fig. 1 Solving scope of roof high voltage equipment

因空间存在大量自由电荷和离子流,绝缘子沿面电场会发生急剧变化,文中在计算中设定空间内未发生起弧的状况,故忽略计算域内自由电荷的影响^[13-15]。

车顶受电弓绝缘子考虑上述周围环境,以及污秽、水珠、干燥带等不均匀分布,建立图 2 三维绝缘子俯视图,并沿绝缘子圆周方向从支架开始,依次命名为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 150° 、 180° 。

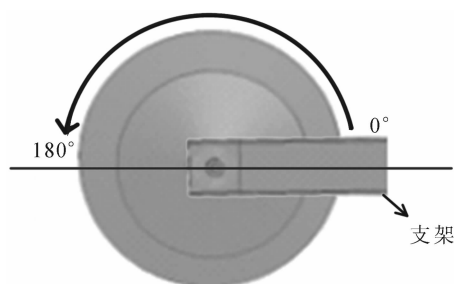


图 2 三维绝缘子俯视图

Fig. 2 The top view of 3D insulator

1.2 三维含水珠绝缘子模型

车顶受电弓绝缘子选用憎水性高的环氧树脂材料,水珠成分离状分布在绝缘子表面,见图 3。冬季凌晨的露珠、雨水颗粒半径较小,水珠半径选取 2 mm ,水珠中溶解有污秽,水珠电导率为 0.01 S/m ^[16]。绝缘子圆周方向不同角度上的水珠为并联关系,并不处于绝缘子表面场强方向上,相互之间的影响可以忽略^[17]。因此,先假设水珠在图示角度上从高压端排列至低压端,水珠间隔距离为 6 mm 。

2 分离水珠对车顶绝缘子的电场分布影响

2.1 单颗水珠对车顶绝缘子不同位置的电场影响

图 4 为车顶受电弓绝缘子高压端电场分布云

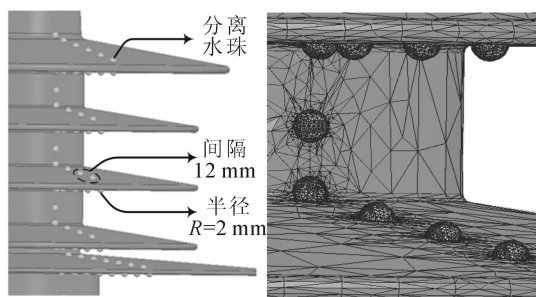


图3 含分离水珠绝缘子三维有限元网格划分图

Fig. 3 The meshing graph of 3-D FEM insulator with distributed water droplets

图。虚线框图内三颗水珠代表绝缘子沿面3种分布特征的水珠——柱体上、拐角处和伞裙表面。绝缘子表面等位线在跨越水珠的位置等位线发生弯曲，最大程度仅偏离原水珠位置的1.5个直径长度。说明水珠对空间电位分布影响有限。

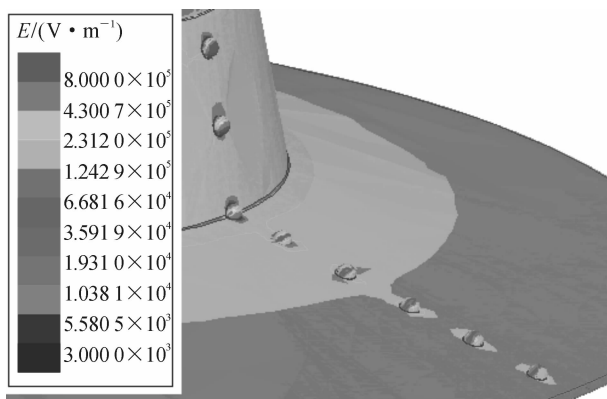


图4 高压端含水珠绝缘子表面电场分布

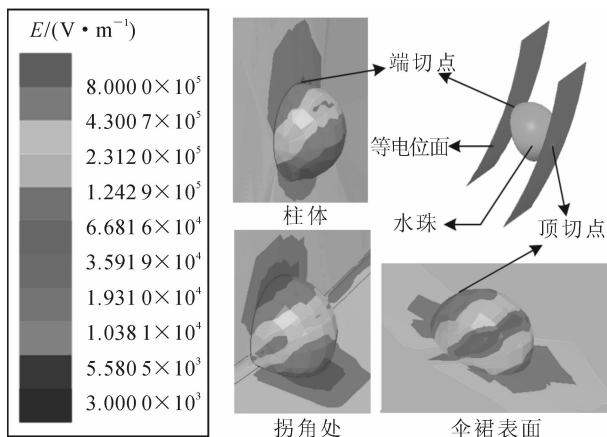
Fig. 4 The electric field distribution of the insulator with distributed water droplets on the high voltage terminal
等势线和水珠切点的示意图见图5。

图5 等势线和水珠切点的示意图

Fig. 5 Equipotential line and the water points of contact schematic diagram

图5中根据切点的位置,可将切点定义为端切点和顶切点。端切点位于水珠、空气、绝缘子分界

处;顶切点位于水珠与空气分界处。如图5所示,柱体和伞裙表面的高场强点均位于顶切点和端切点,伞裙上和拐角处的高场强点位于端切点。因此,沿爬电路径排列的水珠表面电场强度均在平分此列所有水珠的纵截面处,且根据文[17]中所述,位于爬电路径上的水珠间的相互影响远大于圆周方向,分析从高压端排列至低压端的一系列水珠的纵截面电场分布情况即可反应水珠对车顶受电弓绝缘子电场畸变状况。

2.2 纵截面上含水珠绝缘子的电场分布

选取平分一系列水珠的纵截面上洁净状况与含分离水珠状况的电场分布云图,见图6。

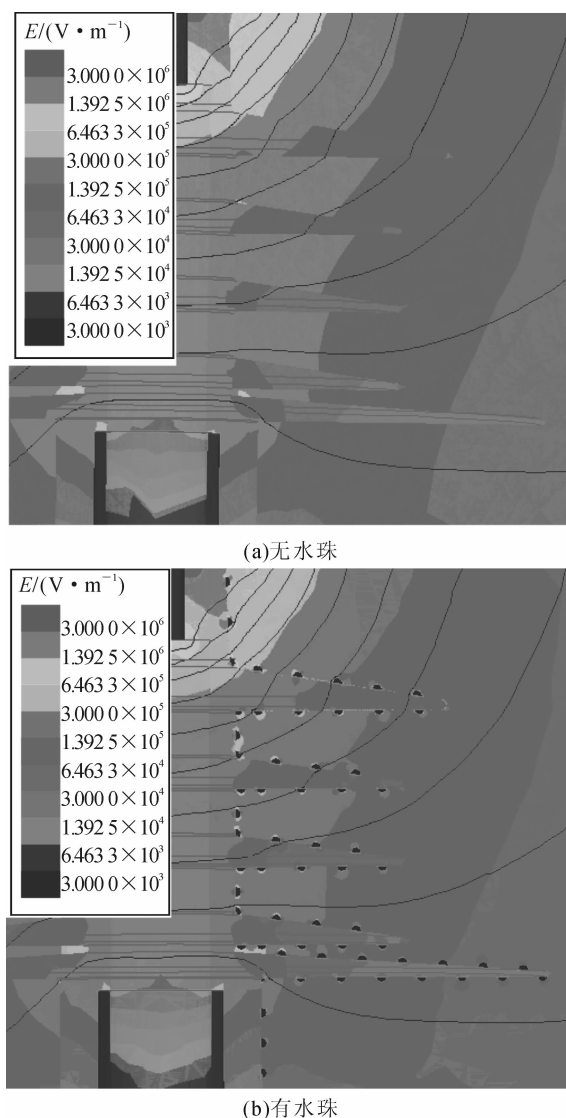


图6 纵截面上洁净和含分离水珠状况下电场分布图

Fig. 6 The electric field distribution on the longitudinal section

从整体分布看出,最大场强聚集处为高压端第1片大伞裙,柱体及柱体伞裙拐角处的水珠周围。有分离水珠时等电位线仍然以高压端金具为中心向

低压端扩散,且越来越稀疏,呈容性分布,相对于无水珠时整体上看不出明显变化。在纵截面上的总体电场分布,分离水珠产生的影响不大,几乎可以忽略。电位分布上,两条曲线几乎重合,见图7,说明从高压端至低压端,连续布置水珠时,水珠对总体电位影响十分微弱,最大相差仅过1.6%。

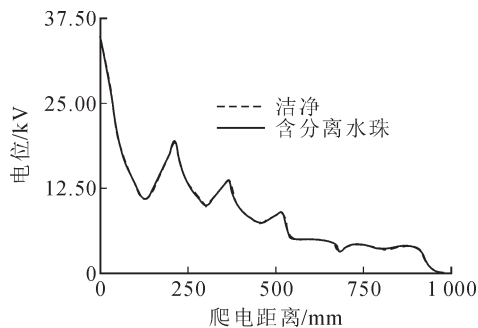


图7 洁净和含水珠绝缘子爬电路径上电位分布

Fig. 7 The potential distribution along the creepage distance

分离水珠的引入对沿面电场的总体趋势影响甚微,然而在2 mm极小的范围内,水珠周围空气中电场产生了强烈的畸变,相对于无水珠时电场强度大幅增加,尤其表现在高压端杆径和第1片伞裙处。这是因为水珠的电导率和介电常数远大于空气本身。洁净和含水珠绝缘子爬电路径上电场分布见图8。如图8所示,最高场强畸变达原场强6.31倍,为39.1 kV/cm,位于高压端第1片伞裙上部 and 杆径交界处。在绝缘子柱体上的分离水珠对空间场强影响剧烈,从高压端至低压端,最大场强畸变比依次达6.31、4.28、4.56、4.70、1.71、3.51,集中在伞裙表面和绝缘子柱体交界处及柱体上。

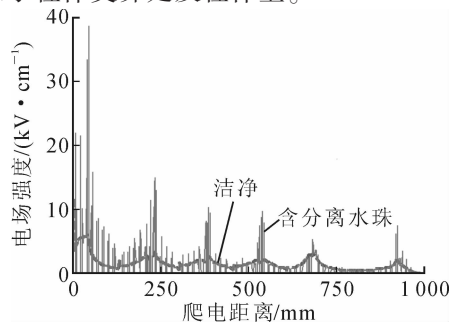


图8 洁净和含水珠绝缘子爬电路径上电场分布

Fig. 8 The electric field distribution along the creepage distance

水珠表面空气中的电晕放电场强阈值与场强的极性、绝缘子材料、气压、湿度等多种因素有关,试验测得其大小为0.34~1.1 kV/mm^[4,18-19],文中设置0.34 kV/mm为水珠电晕放电时环境场强阈值。洁净和含水珠绝缘子高压端表面电场分布见图9。由图9

可见,高压端杆径第1片伞裙上表面电场强度几乎全部大过水珠表面电晕起始场强,出现水珠后在杆径与伞裙交界处水珠表面场强远超空气电晕起始场强,则在正常工况下,高压端柱体及部分伞裙上表面处的水珠必将引起放电,不仅加速伞裙的老化,而且会破坏该处材料的憎水性,加重水分的聚集程度。无水珠时,该段路径上平均场强为2 333.9 V/cm,出现分离水珠后,平均电场强度值达3 263.8 V/cm,提升39.8%,且多处超过起晕场强。在正常工况下,只要高压端柱体和伞裙上存在分离水珠,则会发生电晕放电。在水珠密集分布的状况下,此种电场畸变引起的放电可能进一步加剧,给伞裙表面材料带来极大的破坏。

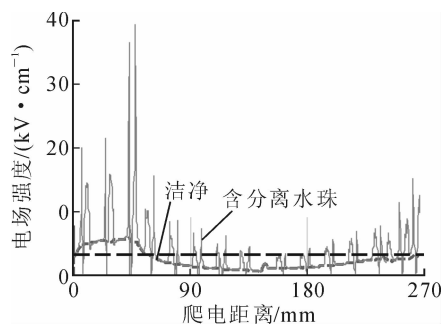


图9 洁净和含水珠绝缘子高压端表面电场分布

Fig. 9 The electric field distribution of the insulator on the high voltage terminal

2.3 不同圆周角度水珠分布对绝缘子沿面电场影响

受电弓及其支架会破坏车顶受电弓绝缘子的圆周对称性,从高压端排列至低压端的水珠位于不同的圆周角度时,水珠对绝缘子沿面的电场畸变特性不同,图10为最大电场强度对应不同圆周角度的变化曲线(图3对应150°)。圆周角为0°时,水珠离受电弓支架最近,最大电场强度最小,圆周角为180°时,最大电场强度最大。这是由于绝缘子沿面的最大场强位于高压端第1片伞裙和柱体的拐角处,近支架端的高压端的电场受到支架的影响,电场更加均匀,最大场强受到削弱,在远离支架端的处,电场增强作用更明显。不管圆周角度如何变化,最大场强均超过空气电晕起始场强,都会引起绝缘子表面放电。

3 水膜对绝缘子表面的电场分布影响

长期雨露、大雾环境中,车顶受电弓绝缘子高压端柱体和第1片伞裙出现水珠后发生电晕放电,其憎水性能逐渐丧失,表面则易有水膜敷在绝缘子上^[20-22]。图11为高压端柱体和第1片伞裙上表面出现连续水膜,其余部位仍为分离水珠的情况下的计算模型。设定水膜宽度为6 mm,厚度为0.2 mm,无污染情况下,水膜电导率很小,设定为 1×10^{-6} S/m。

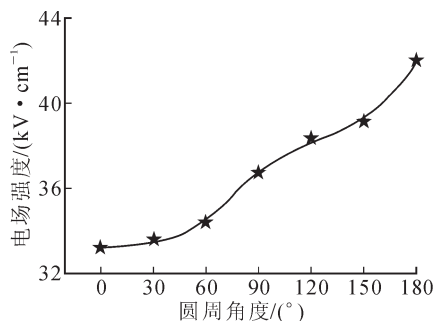


图10 分离水珠位于绝缘子不同圆周角度时最大沿面电场

Fig. 10 The maximum field strength on the different circumferential angle along the surface

因动车组运行环境中的雾霾现象,水膜易受到污染,假设染污后水膜电导率为0.01 S/m。

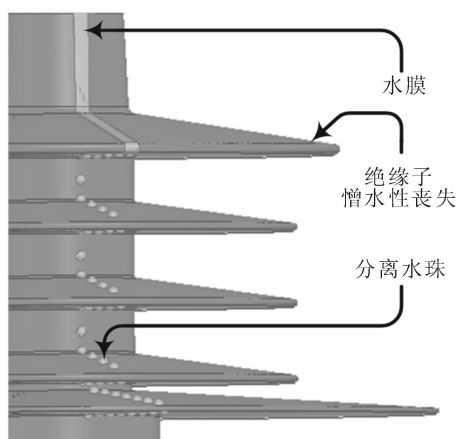


图11 绝缘子高压端出现水膜后有限元模型

Fig. 11 The 3-D FEM model of insulator with water films on the high voltage terminal

图12为无水膜与染污水膜绝缘子高压端沿面电场分布。水膜出现后,高压端柱体和第1片伞裙上表面水膜区电场略微上升,第1片伞裙下表面电场略微下降,其余位置急剧上升,这是由于形成导电性水膜后绝缘子绝缘距离缩短,间接加大水膜周围电场。

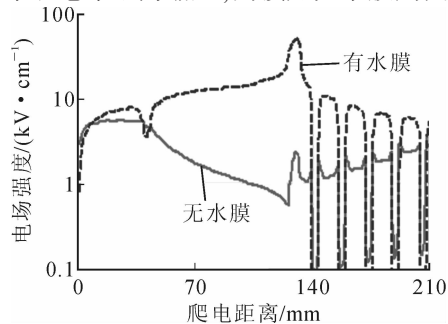


图12 无水膜和有水膜绝缘子高压端沿面电场分布

Fig. 12 The electric field distribution along the surface of the high voltage terminal of the insulator

图13为含清洁水膜和染污水膜绝缘子高压端沿面电场分布。可见染污水膜相对于清洁水膜表现

为更进一步增加水膜附近场强,使绝缘子表面总体上出现的沿面最大场强更大,更有可能引发电晕放电,加速绝缘子表面材料破坏,使水膜进一步发展。泄漏电流大小是交流电弧周期性变化状态的重要影响因素,随着绝缘距离的缩短,绝缘子表面的泄漏电流使绝缘子在交流电压下更不容易出现电弧熄灭^[23]。受电弓支撑绝缘子长期运行时,沿面可能出现大面积的憎水性丧失,沿面出现断断续续的水膜,在雾霾条件下水膜大量染污,导电性能提升。在导电性水膜长度增加的情况下,如果水膜周围空气场强得到持续增强^[24],最终引发电弧快速发展贯通电极而雾闪。

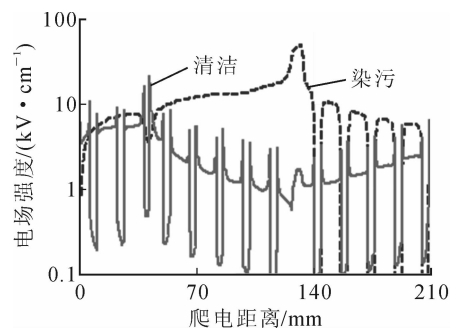


图13 洁净和染污水膜绝缘子高压端沿面电场分布

Fig. 13 The electric field distribution along the surface of the high voltage terminal of the insulator

4 结论

1)通过分析高压端的一片伞裙上部和杆径上3颗代表水珠对车顶受电弓绝缘子的电场分布影响,得出最大电场仅改变1.5个直径,对整体空间电场分布影响甚微,且最大场强均分布在平分沿爬电距离排列水珠的纵截面上;分析纵截面上从高压端到低压端的水珠,即反映水珠对绝缘子沿面电场分布。

2)洁净车顶受电弓绝缘子与含水珠车顶受电弓绝缘子的纵截面电位和电场分布对比分析,整体空间中含水珠绝缘子与洁净绝缘子电位情况一致,但局部电场相比畸变强烈,最大场强畸变为原场强6.31倍,为39.1 kV/cm,位于高压端第1片伞裙上部和杆径交界处。

3)考虑受电弓等高压部件破坏车顶受电弓绝缘子圆周对称性,通过分析含水珠绝缘子圆周角度从0°到180°的最大沿面电场强度,得出不管圆周角度如何变化,所有最大场强均超过空气电晕起始场强,易引起绝缘子表面放电,从而降低绝缘子的憎水性能。

4)憎水性一旦被破坏,表面水珠易附着在车顶受电弓绝缘子表面积累成水膜,形成水膜后与动车运行环境中的污秽融合,导电性能上升。导电水膜长度持续增加,水膜周围空气场强若持续增强,最

终引发电弧快速发展贯通电极而雾闪。

参考文献:

- [1] HACKAM R. Outdoor HV composite polymeric insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 557-585.
- [2] EL-KISHKY H, GORUR R S. Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(3): 450-456.
- [3] PHILLIPS A J, CHILD D J, SCHNEIDER H M. Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1081-1089.
- [4] PHILLIPS A J, CHILD D J, SCHNEIDER H M. Water drop corona effects on full-scale 500 kV non-ceramic insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 999-1020.
- [5] GAO Haifeng, JIA Zhidong, MAO Yingke, et al. Effect of hydrophobicity on electric field distribution and discharges along various wetted hydrophobic surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 435-443.
- [6] 王仲奕, 王琪, 陈青. 湿润复合绝缘子表面的电场分析[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 53-58.
WANG Zhongyi, WANG Qi, CHEN Qing. Calculation of AC electric field distributions along polluted polymer insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 53-58.
- [7] 徐志钮, 律方成, 李和明. 分离水珠对支柱绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2278-2284.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming. Influence of separated globules on post insulator electric field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2278-2284.
- [8] 张强, 王维庆. 大规模风电场高压输电线路绝缘子整体电场分布特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 15-20.
ZHANG Qiang, WANG Weiqing. Research on the entire electric field distribution characteristic of high-voltage line insulator for large-scale wind farm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6): 15-20.
- [9] 刘辉, 沈庆河, 雍军, 等. 基于多光谱法的复合绝缘子检测技术的应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 69-75.
LIU Hui, SHEN Qinghe, YONG Jun, et al. Research on application of composite insulator detection technology based on multispectral method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 69-75.
- [10] 文志科, 孔晨华, 闵绚, 等. 高光谱遥感检测复合绝缘子运行状态技术研究[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 75-79.
WEN Zhike, KONG Chenhua, MIN Xuan, et al. Working state detection of composite insulator by hyperspectral remote sensing[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 75-79.
- [11] 黄建才, 朱永利. 提取绝缘子泄漏电流特征时母小波的选择[J]. 电瓷避雷器, 2012(6): 14-18.
HUANG Jiancai, ZHU Yongli. Mother wavelet selection for feature extraction of insulator leakage current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6): 14-18.
- [12] 范兴明, 马世伟, 张鑫, 等. 超声无损检测及其在电力绝缘子探伤中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 109-114.
FAN Xingming, MA Shiwei, ZHANG Xin, et al. Application of ultrasonic non-destructive testing to power insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 109-114.
- [13] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [14] 司马文霞, 武坤, 李立涅, 等. ± 800 kV 线路直流复合绝缘子均压环结构研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 33-36.
SIMA Wenxia, WU Kun, LI Licheng, et al. Optimization of corona ring design for ± 800 kV UHV DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 33-36.
- [15] 杜思思, 张雪峰, 杨军. 复合绝缘子不同憎水性下的电场分布研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 11-16.
DU Sisi, ZHANG Xuefeng, YANG Jun. Study on electric field distribution of composite insulator under different hydrophobicity levels[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 11-16.
- [16] 宿志一, 李中新. 考虑离子流影响时 ± 800 kV 特高压直流六分裂导线附近绝缘子串表面电场分布模拟计算[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [17] 王仲奕, 王琪, 陈青. 复合绝缘子憎水性表面水滴的电场特性分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 5-11.
WANG Zhongyi, WANG Qi, CHEN Qing. Electric field analysis of water droplet on hydrophobic surface of polymer insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 5-11.
- [18] GUAN Zhicheng, WANG Liming, BO Yang, et al. Electric field analysis of water drop corona[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 964-969.
- [19] MORENO V M, GORUR R S. Effect of long-term corona on non-ceramic outdoor insulator housing materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 117-128.
- [20] ALLEN N L, GHAFAR A. The conditions required for the propagation of a cathode-directed positive streamer in air[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1995, 28(2): 331.
- [21] 姚刚, 文习山, 蓝磊. 湿润污秽绝缘表面电场及针板电极下的沿面放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1407-1414.
YAO Gang, WEN Xishan, LAN Lei. Electric field of wet contamination on dielectric surface and creeping discharge in needle-board electrodes[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1407-1414.
- [22] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠放

(下转第 49 页)

- approach to EHV direction comparison protection using digital signal-processing techniques[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(2): 24-34.
- [7] 全玉生,王欢,李学鹏,等. 新型直流输电行波电流极性比较式方向保护[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 106-110. QUAN Yusheng, WANG Huan, LI Xuepeng, et al. New directional protection based on traveling wave current polarity comparison used on HVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 106-110.
- [8] 胡文丽,焦彦军,崔鸿斌. 基于小波变换的新型暂态行波方向保护[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 68-71. HU Wenli, JIAO Yanjun, CUI Hongbin. A novel transient travelling wave based directional protection using wavelet transform[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 68-71.
- [9] 吴浩,李群湛,南晓强,等. 基于行波信息的广域后备保护故障判别新原理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 83-89. WU Hao, LI Qunzhan, NAN Xiaoqiang, et al. New principle of fault identification for wide-area back-up protection based on traveling wave information[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(6): 83-89.
- [10] 王全,徐习东. 基于行波差动原理的线路保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 86-89. WANG Quan, XU Xidong. Applied criterion for line protection based on traveling-wave differential principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 86-89.
- [11] 邹贵彬,高厚磊,江世芳,等. 新型暂态行波幅值比较式超高速方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 84-90. ZOU Guibin, GAO Houlei, JIANG Shifang, et al. Novel transient travelling wave based amplitude comparison ultra high speed directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 84-90.
- [12] 袁兆强,张承学. 超(特)高压输电线路高速行波差动保护[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 13-17. YUAN Zhaoqiang, ZHANG Chengxue. High speed traveling wave differential protection for EHV/UHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 13-17.
- [13] 李小鹏,何正友,陈双,等. 基于电流行波固有频率的输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 121-129. LI Xiaopeng, HE Zhengyou, CHEN Shuang, et al. A novel pilot protection for transmission lines based on natural frequencies of current[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 121-129.
- [14] 刘兴茂,林圣,何正友,等. 基于S变换的新型波阻抗方向继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 113-119. LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. A novel surge impedance directional relay based on S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 113-119.
- [15] 李小鹏,何正友,武骁. 基于S变换能量相对熵的高压输电线路极性比较式纵联保护[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2250-2256. LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao. Polarity comparison pilot protection based on S-transform energy relative entropy for high voltage transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2250-2256.
- [16] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007.
- [17] 束洪春,彭仕欣. 配电网单相故障馈线的S变换检测新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2963-2969. SHU Hongchun, PENG Shixin. S-transform approach for detecting the single-phase fault feeder in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2963-2969.
- [18] 唐求,滕召胜,高云鹏,等. 基于S变换的平方检测法测量电压闪变[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 60-67. TANG Qiu, TENG Zhaosheng, GAO Yunpeng, et al. Voltage flicker measurement using square demodulation method based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 60-67.

吴浩(1980—),男,博士研究生,从事电力系统保护与控制方面的研究。

(上接第41页)

- 电特性的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 7-9. SIMA Wenxia, LIU Zhenyao, JIANG Xingliang, et al. Study of discharge characteristics of discrete water drops on the silicone rubber surface[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2): 7-9.
- [23] 王建武,文习山,刘海燕,等. 憎水性表面水珠的电场计算及放电研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 49-52. WANG Jianwu, WEN Xishan, LIU Haiyan, et al. Calculation of electric field and study of discharge on water droplets on the hydrophobic surface[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 49-52.
- [24] 徐志钮,律方成. 绝缘子交流泄漏电流中周期与陡脉冲分量分离方法的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 12-18. XU Zhiniu, LYU Fangcheng. Study of separation of periodic component and steep impulsive component in insulator AC leakage current[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 12-18.
- 罗蜀彩(1990—),女,硕士研究生,从事过电压与绝缘配合研究。
- 杨坤松(1989—),男,硕士研究生,从事过电压与绝缘配合研究。
- 吴广宁(1969—),男,教授,博导,从事高压电气设备绝缘评估及状态检修,高压绝缘的电磁模拟与数值仿真研究。