

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.019

高海拔地区积雪复合绝缘子沿面电场分布研究

王永强¹, 欧阳宝龙¹, 连莎莎², 潘兵³

(1. 河北省输变电设备安全防御重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003; 2. 国网河北省电力公司物资分公司, 石家庄 050000; 3. 华北油田水电厂, 河北 任丘 062550)

摘要: 雪对电力系统可靠运行构成极大威胁,对积雪复合绝缘子沿面电场分布规律进行研究具有重要工程价值和意义。基于准静态电场有限元方法,提出了雪的三角形模型,开展了雪形态和雪参数对高海拔 110 kV 复合绝缘子沿面电场的影响研究。通过搭建高海拔 110 kV 复合绝缘子二维轴对称模型,研究了大伞积雪时雪面积和雪高度、桥接积雪时空气间隙长度和空气间隙位置对沿面电场的影响,分析了雪参数变化情况下的沿面电场分布。结果表明:大伞积雪时,雪面积和雪高度的变化对沿面电场分布影响较弱;桥接雪能改善沿面电场分布;绝缘子周围最大场强随着相对介电常数的增加而增大;电阻率不影响场强分布;桥接积雪时,雪参数变化严重威胁绝缘子的电气绝缘性能。

关键词: 复合绝缘子; 高海拔; 积雪; 冰雪共存; 沿面电场; 准静态电场有限元法

Study on Electric Field Distribution Along the Surface of Snowed Composite Insulator in High Altitude Area

WANG Yongqiang¹, OUYANG Baolong¹, LIAN Shasha², PAN Bing³

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense(North China Electric Power University), Hebei Baoding 071003, China; 2. State Grid Hebei Procurement Company, Shijiazhuang 050000, China; 3. Water and Electric-power Company in North China Oil Field, Hebei Renqiu 062550, China)

Abstract: Snow will threaten the reliability of a power system. Therefore, it has important engineering value and significance to calculate the electric field distribution along the surface of snowed composite insulators. In this paper, the authors put forward the triangle model of snow. And how the snow shape and parameter affects the electric field along the surface of composite insulators on 110 kV transmission lines on high altitude is studied through the quasi-static electric field finite element method. The two-dimensional axial symmetry models of the snowed composite insulators are given to study electric field distribution along the surface, after changing area and height of snow on the large sheds, air length and position when the large sheds are completely bridged by snow. Also the snow parameters' influence on the electric field along the surface is analyzed. The results show that, when snow only exists on the large sheds, snow height and thickness have little influence on electric field distribution along the surface. And electric field distribution along the surface has improved when the large sheds are completely bridged by snow. The maximum field intensity of insulators increases with the increase of relative permittivity when snow only exists on the large sheds. Electrical resistivity has no influence on the electric field along the surface.

收稿日期:2016-01-23; 修回日期:2016-03-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA050802);中央高校基本科研业务费项目(13MS73);国家电网科技项目(1214414011043)。

Project Supported by National High-tech Research and Development Program of China(863Program)(2012AA050802),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13MS73), Science and Technology Project of the State Grid Corporation(1214414011043).

Snow parameters seriously changed would threaten the electrical insulation properties of the insulators when the large sheds are completely bridged by snow.

Key words: composite insulator; high altitude; icing; ice and snow coexisting; electric field along the surface; quasi-static electric field finite element method

0 引言

青海、西藏、宁夏等高海拔地区雪灾事故频发^[1-2],因积雪覆冰引起的绝缘子闪络严重威胁输电线路的可靠运行^[2]。冰雪的存在是导致绝缘子表面电位电场畸变的主要原因之一,而电场畸变和电位分布不均匀是局部放电、电弧产生的根源,前者会加速硅橡胶的老化从而减少其寿命,后者还易引发闪络^[3-5],电场分布的改善使得临闪电压变高^[6]。因此,对积雪覆冰绝缘子的电场电位分布进行研究十分重要。

目前国内外对复合绝缘子电位电场分布的仿真研究如下。文[7]采用二维和三维相结合的简化模型对复合绝缘子的电场分布进行了研究;文[8]对复合横担的电位分布进行了仿真计算;文[9]综述了国内外覆冰绝缘子闪络机理的研究现状;文[10-11]对覆冰复合绝缘子的电位电场分布进行了研究,分析了冰凌长度、冰凌厚度和干冰湿冰情况对复合绝缘子电位电场分布的影响;文[12-13]对污秽、污秽和冰共存状态下的绝缘子电场分布情况进行了仿真分析,得到了有关污秽、覆冰对电场影响的相关结论;文[14]主要是对绝缘子融冰水膜电导率、水膜厚度以及水膜存在水滴3个因素对电场分布的影响研究。从国内外研究现状来看,对积雪复合绝缘子仿真研究尚未见文献进行过报道,加之青海等高海拔地区昼夜温差大,伞裙表面的积雪容易发生融化和再结冰现象,故仿真分析雪参数变化对绝缘子电场分布的影响同样十分重要。

为解决上述问题,笔者基于准静态电场有限元方法,以青海省格尔木—察尔汗牵110 kV线路工程典型绝缘子为研究对象,建立二维轴对称模型,研究了大伞积雪时雪面积和雪高度、桥接积雪时空气间隙长度和空气间隙位置对沿面电场的影响,对比分析了雪参数变化情况下的绝缘子沿面电场分布,从而为高海拔地区积雪复合绝缘子的设计运行维护提供参考。

1 准静态电场有限元原理

工频条件下,由于其频率较低,在电场场域内存在雪或冰等不良导体时,传导电流密度与位移电流密度数量级十分接近,故在计算时需要同时考虑两

种电流^[15]。所以积雪复合绝缘子的沿面电场分布既不是完全意义上的静电场,也不是恒定的电流场,而是属于准静态电场的范畴^[14]。

由于工频频率低,磁场变化产生的感应电场强度可以忽略不计,按正弦情况考虑,采用向量符号,忽略感应电场,电场满足环路定理。

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0. \quad (1)$$

由恒等式

$$\nabla \times \nabla \varphi = 0. \quad (2)$$

可设

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (3)$$

考虑位移电流密度,电流连续性可表示为

$$\nabla(\gamma \mathbf{E} + j\omega \varepsilon \mathbf{E}) = 0. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得准静态电场电位的基本方程

$$(\gamma + j\omega \varepsilon) \nabla^2 \varphi = 0. \quad (5)$$

式(5)中: γ 、 ε 分别表示材料的电导率和介电常数, ∇^2 为拉普拉斯算子; φ 为电位相量。

在不同电介质分界面处,电位应满足一定的分界面衔接条件,由式(3)可得,在两种电介质分界面上

$$\mathbf{E}_t = -\frac{\partial \varphi}{\partial t}, \mathbf{D}_n = -(\gamma + j\omega \varepsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial n}. \quad (6)$$

式(6)中: t 代表分界面的切线方向; n 代表分界面的法线方向。

将式(6)代入场向量的分界面衔接条件 $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_1$, $\mathbf{D}_{2n} = \mathbf{D}_{1n}$ 中,可得场域内部两种材质的分界面衔接条件

$$\varphi_2 = \varphi_1, (\gamma_2 + j\omega \varepsilon_2) \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = (\gamma_1 + j\omega \varepsilon_1) \frac{\partial \varphi_1}{\partial n}. \quad (7)$$

由于自由度为电位 φ ,则在场域外边界上,电位 φ 满足狄利克莱边界条件,即

$$\varphi|_r = \varphi_0. \quad (8)$$

2 复合绝缘子参数与模型

2.1 结构参数

以FXBG9-110/100复合绝缘子为研究对象,结构参数见表1。高/低压端金具长度为135 mm/130 mm,均压环管径/环径为50 mm/250 mm,均压环抬高距为25 mm,大/中/小伞裙数量为7/7/28片。模型所用电介质物理参数^[3-4,12]见表2。

2.2 有限元模型

轴对称的三维体用其轴截面的一半以轴对称方

表 1 复合绝缘子结构参数

Table 1 Parameters of the composite insulator mm						
结构	爬电距离	绝缘高度	大/中/小伞径	大伞间距	GFRP棒直径	主体直径
1 660	4 500	1 460	220/155/90	165	34	41

表 2 电介质物理参数

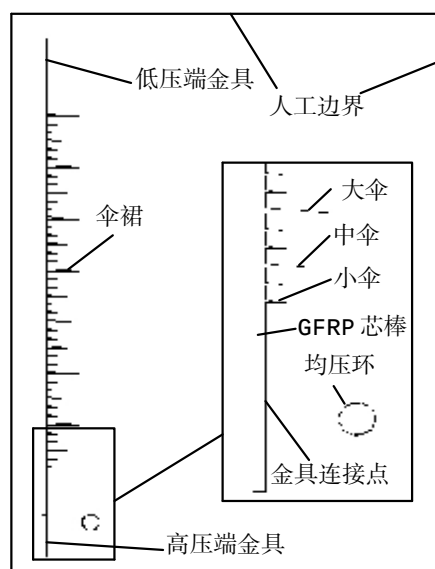
Table 2 Parameters of the medium physics							
参数	空气	硅橡胶	GFRP	铁	雪	水	冰
相对介电常数 ϵ_r	1.006	3.500	3.000	10^{10}	—	81.000	75.000
电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	10^{50}	10^{13}	10^{13}	8.7×10^{-8}	—	250	10^{10}

注:①表中空气电阻率为无穷大,设置为 $1\ 050\ \Omega \cdot m$;铁的相对介电常数也为无穷大,设置为 10^{10} ;②雪的相对介电常数和电阻率受环境因素影响较大,地区、海拔高度、雪中化学成分和雪状态的差异等原因都会导致雪的相对介电常数和电阻率变化^[16-18]。

式建模误差较小^[19],计算量较小,故采用二维轴对称有限元计算模型。

文中做如下简化:杆塔和导线距离复合绝缘子较远,在计算中忽略杆塔和导线的影响;金具实体与圆柱体相似,所以在二维轴对称模型中把金具简化成长方形^[14]。

加载荷及边界条件设置如下:高压端金具应加载相电压的幅值,取为 $89.8\ kV$ ^[14],低压端加载零电位。复合绝缘子的场域为无界电场问题,人工边界到绝缘子间的距离远远大于绝缘子本身的长度并在边界上加载零电位^[14]。 $110\ kV$ 清洁复合绝缘子计算模型见图 1。

图 1 $110\ kV$ 复合绝缘子计算模型Fig. 1 Calculation model of $110\ kV$ composite insulator

路径选取为从高压端金具连接点到低压端金具连接点;清洁时,电场分布线沿着绝缘子外沿;积雪时,清洁伞裙的电场分布线沿着绝缘子外沿,积雪伞裙的电场分布线沿着雪外沿。

3 雪形态对沿面电场分布的影响

从大伞积雪面积、大伞积雪高度、伞裙桥接积雪间隙长度和伞裙桥接积雪间隙位置 4 个方面,研究积雪对绝缘子沿面电场特性的影响。该节采用海拔 $3\ 000 \sim 4\ 000\ m$ 地区洁净雪的参数,相对介电常数取 1.4 ,电导率取 $10\ \mu S/cm$,即电阻率为 $1\ 000\ \Omega \cdot m$ ^[16-18]。

青海省现场应用绝缘子积雪照片见图 2。其中文[20]中,复合绝缘子在横向风作用下积雪试验照片见图 2(c)-(e)。观察图 2(a)-(d)可以发现,积雪轴截面近似为锐角三角形,见图 2(a)-(c)中的三角形。基于上述分析,文中提出了雪的三角形模型,见图 3(a)。综合考虑图 2(e)、(f)积雪形态,提出桥接积雪模型,见图 3(b)-(e)。

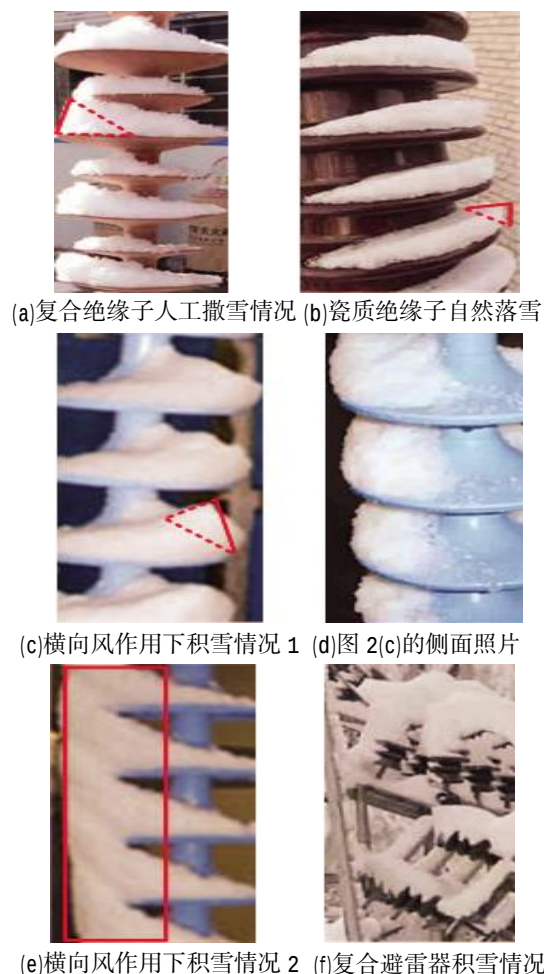
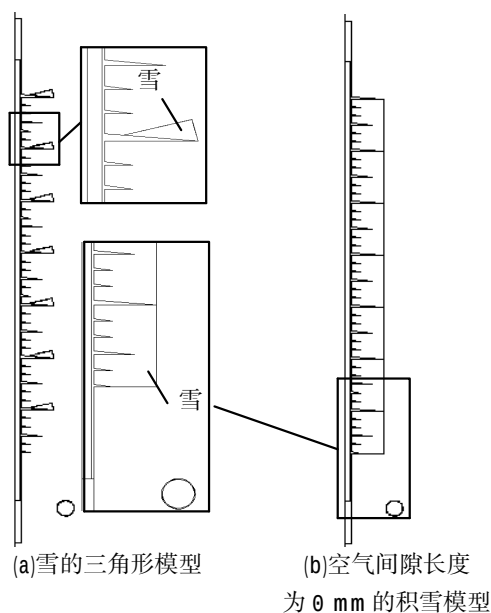


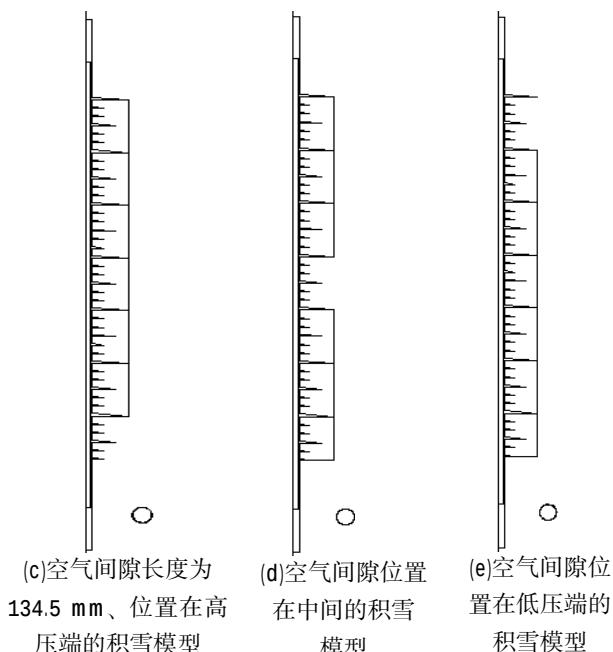
图 2 绝缘子积雪照片

Fig. 2 Photo of snowed insulator

积雪面积表示从伞裙边缘开始计算,积雪占据一个伞裙的几分之几,设为 A ,依次取为 $1/5$ 、 $2/5$ 、 $3/5$ 。



(a)雪的三角形模型 (b)空气间隙长度为 0 mm 的积雪模型



(c)空气间隙长度为 134.5 mm、位置在高电压端的积雪模型 (d)空气间隙位置在中间的积雪模型 (e)空气间隙位置在低压端的积雪模型

图 3 积雪计算模型

Fig. 3 Calculation model of snowed insulator

5、4/5、5/5(整个伞裙)。积雪高度表示从雪底面到雪顶点的高度,设为 H ,选取 5 组数值,分别为 8、16、24、32、40 mm。

桥接积雪时,空气间隙长度指高压端第一大伞到积雪的纵向距离为 G ,依次为 0、134.5、299.5、464.5、629.5、794.5、959.5 mm。

3.1 积雪面积和积雪高度的影响

为研究积雪面积对沿面电场分布的影响,积雪高度选为 24 mm。清洁和积雪面积不同时的电场向量模式等值图分别见图 4、5。由图 4、5 可以看出,同一积雪高度、积雪面积不同的情况下,雪周围的电场发生轻微的畸变,随着积雪面积的增加,雪周围的电场畸变程度略微增加。雪面积不同时的沿面电场分

布见图 6。图 6 中 A_1 - A_5 曲线出现的小波峰、小波谷也反映了这一点。雪面积不同时的最大电场强度及出现位置见表 3。由表 3 可以得出,积雪使得最大场强略有下降,最大降幅 1.45%,最小降幅 1.32%,降幅不明显;积雪对最大场强出现的位置没有影响。由图 6 可知:积雪面积的不同,导致爬电距离有不同程度的增加;沿面电场分布都呈现不对称的 U 型,即复合绝缘子的高压端与低压端都出现电场较强的波峰,这是因为电极附近的场强一般最大;积雪时,沿面电场分布稍不均匀,存在振荡的小波峰、小波谷; A_1 - A_5 积雪曲线与清洁曲线趋势基本相同,不考虑爬电距离的拉长和雪表面电场的轻微畸变时,积雪曲线与清洁曲线近乎重合。综上可知,积雪面积的不同对绝缘子沿面电场分布影响较小。

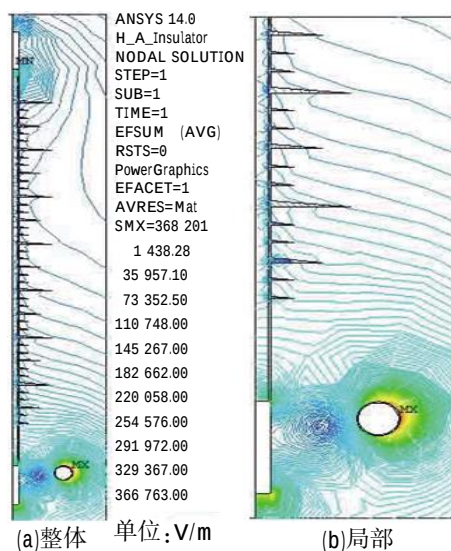


图 4 清洁时电场向量模式等值图

Fig. 4 Electric field contour on vector mode under clean insulator

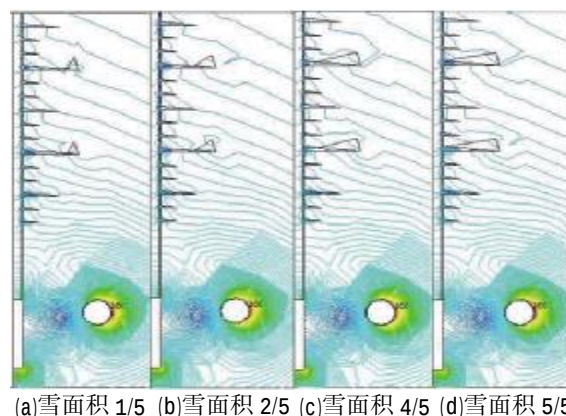


图 5 雪面积不同时电场向量模式等值图

Fig. 5 Electric field contour on vector mode under different area of snow

研究积雪面积相同,积雪高度不同对沿面电场的影响时,积雪面积取为 4/5。由仿真图和数据可知,积雪面积相同、积雪高度不同对沿面电场的影

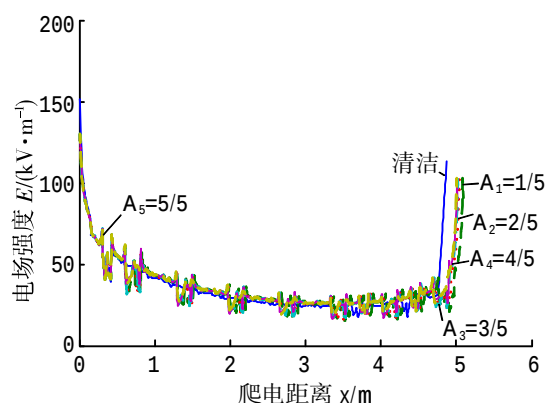


图6 雪面积不同时的沿面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution along the surface under the different area of snow

表3 雪面积不同时的最大电场强度及出现位置

Table 3 The maximum electric field intensity and its position under different area of snow V/m

参数	清洁	1/5	2/5	3/5	4/5	5/5
$E_{\max}$	368 201	362 845	363 253	363 014	363 305	363 337
$E_{\max}$ 位置	均压环	均压环	均压环	均压环	均压环	均压环

响,与积雪高度相同、积雪面积不同对沿面电场的影响,基本相似,不再赘述。

表4 空气间隙长度不同时的最大电场强度及出现位置

Table 4 The maximum electric field intensity and its position under different length of air gap V/m

参数	0 mm	134.5 mm	299.5 mm	464.5 mm	629.5 mm	794.5 mm	959.5 mm
$E_{\max}$	363 555	363 273	362 864	361 141	360 917	360 633	360 268
$E_{\max}$ 位置	均压环	均压环	均压环	均压环	均压环	均压环	均压环

由空气间隙长度不同时的最大电场强度及出现位置,可以得出:一方面最大场强出现的位置不受空气间隙长度的影响;另一方面随着空气间隙的增大,桥接雪长度减小,最大场强数值减小,但减幅并不明显。和清洁情况相比,积雪导致最大场强略有下降,最大降幅 2.15%,最小降幅 1.26%,降幅不明显。

空气间隙大小不同时的沿面电场分布见图 8。图 8 中各沿面电场 U 型分布线中,可以发现最为平滑的是 $G_1=0$ 曲线,即雪全部桥接伞裙时的情况。这是因为:①干燥清洁的雪覆盖在伞裙表面,相当于消除了伞裙表面及伞裙之间存在的窄间隙,窄间隙消除的愈多,沿面电场分布愈均匀;② G_1 情况的雪距离高压端金具(高压电极)最短,雪的电阻率比硅橡胶的小,即适当减少了靠近电极强场强处介质的表面电阻率,导致最大沿面电位梯度减小,从而使得沿面电场更均匀。

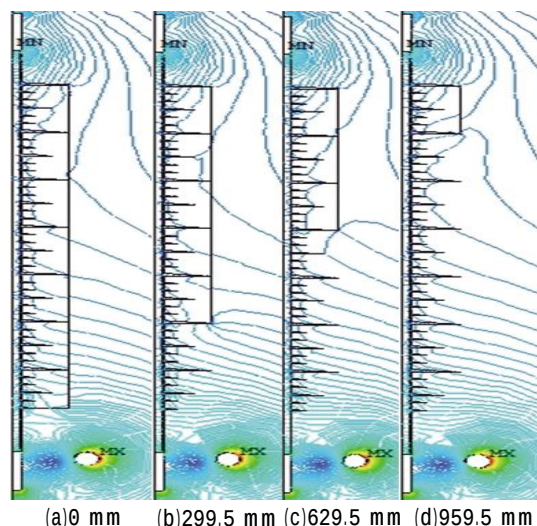
3.3 空气间隙位置的影响

进一步研究空气间隙位置对沿面电场的影响。

从上述分析可知,大伞积雪时积雪面积、积雪高度变化都对沿面电场分布的影响较小。

3.2 空气间隙长度的影响

桥接积雪时空气间隙长度递增的仿真模型见图 3(b)、3(c);空气间隙长度不同时的电场等值图见图 7。电场在积雪模型的顶点处发生轻微畸变,在其他位置无明显变化见表 4。



(a) 0 mm (b) 299.5 mm (c) 629.5 mm (d) 959.5 mm

图7 空气间隙长度不同时电场向量模式等值图

Fig. 7 Electric field contour on vector mode under different length of air gap

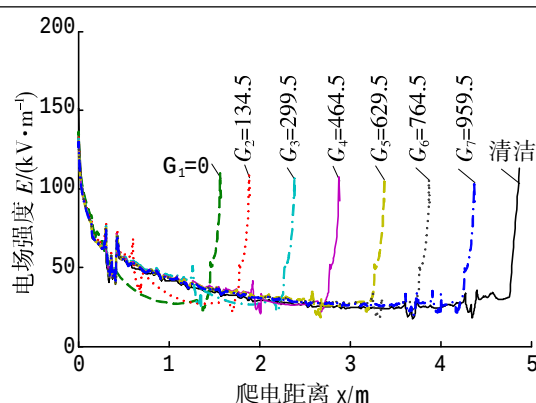
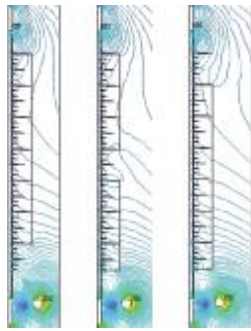


图8 空气间隙大小不同时的沿面电场分布

Fig. 8 Electric field distribution along the surface under the different length of air gap

空气间隙位置不同时电场向量模式等值图与沿面电场分布分别见图 9、10。由图 9 可以看出,在积雪模型的顶点处电场发生轻微畸变;这也可以从图 10 曲线中出现的小波峰、小波谷得到证明。

空气间隙位置不同时的最大电场强度及出现位置见表 5。表 5 表明,空气间隙在绝缘子中间时电场



(a)高压端 (b)中间 (c)低压端

图 9 空气间隙位置不同时电场向量模式等值图

Fig. 9 Electric field contour on vector mode under different position of air gap

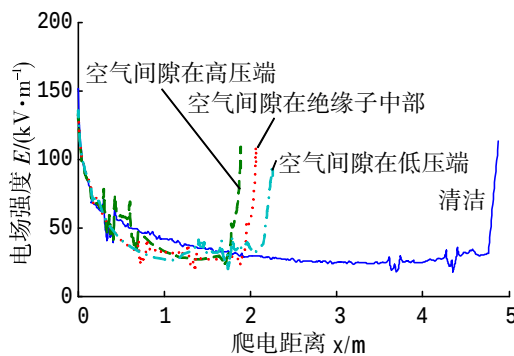


图 10 空气间隙位置不同时的沿面电场分布

Fig. 10 Electric field distribution along the surface under the different position of air gap
强度最小,高压端次之,且与清洁情况相比, $E_{\max}$ 都有不明显的减小。

表 5 空气间隙位置不同时的最大电场强度及出现位置

Table 5 The maximum electric field intensity and its position under different position of air gap V/m

参数	清洁	空气间隙在高压端	空气间隙在绝缘子中间	空气间隙在低压端
$E_{\max}$	368 201	363 273	362 730	363 590
$E_{\max}$ 位置	均压环	均压环	均压环	均压环

虽然积雪的总长度和总质量相同,但是空气间隙的位置不同,桥接积雪时绝缘子的沿面电场分布畸变程度不同。空气间隙在低压端时,沿面电位分布最为均匀,这是因为靠近高压电极覆盖越多干燥清洁的雪,越能改善沿面电场分布。

4 雪参数对沿面电场分布的影响

由于青海等高海拔地区昼夜温差大,气温变化幅度较大,容易出现融雪以及融雪后又结冰的现象。在融雪和再结冰期间,雪的密度、相对介电常数和电导率都会发生很大变化,此时雪对电气绝缘的危害最大^[21]。为研究雪的相对介电常数和电导率变化对沿面电场分布的影响,本节在不同雪参数条件下,分别计算大伞积雪和桥接积雪两种情况下的绝

缘子沿面电场。结合冰和水的介电、导电参数,该节将雪模型的相对介电常数取为 2、4、25、45、70、78,电阻率取为 0.1 、 10^2 、 10^5 、 10^8 、 $10^{10} \Omega \cdot m$ 。

4.1 大伞积雪

为研究大伞积雪时雪参数变化对沿面电场分布的影响,该节中雪面积选为 4/5,雪高度选为 32 mm。不同雪参数下大伞积雪时最大场强见表 6。由表 6 可知,当雪的相对介电常数在 2~78 范围内变化时,随着相对介电常数的增加绝缘子最大场强逐渐增大,但也逐渐趋于稳定,相对介电常数从 2 增加到 78 时最大场强仅增加了 0.18%。不同雪参数大伞积雪时电场向量模式等值图见图 11。从图 11 中可以观察到,随着相对介电常数的增加,雪周围的电场线变的密集。当雪的电阻率在 $0.1 \sim 10^{10} \Omega \cdot m$ 范围内变化时,绝缘子的最大场强变化最多涉及到数据的百位,而最大场强数据的数量级在兆级,因此最大场强变化可以忽略。这是因为雪的电阻率在其变化范围内较空气和硅橡胶的小很多,具体取值影响不大。

表 6 不同雪参数大伞积雪时最大电场强度

Table 6 The maximum electric field intensity under different snow parameters with snow only on the large sheds

相对介电常数 ϵ_r	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$				
	0.1	10^2	10^5	10^8	10^{10}
2	363 493	363 489	363 482	363 476	363 469
4	363 758	363 756	363 750	363 744	363 737
25	364 090	364 090	364 085	364 081	364 081
45	364 125	364 125	364 125	364 122	364 122
70	364 142	364 142	364 142	364 142	364 142
78	364 144	364 144	364 144	364 144	364 144

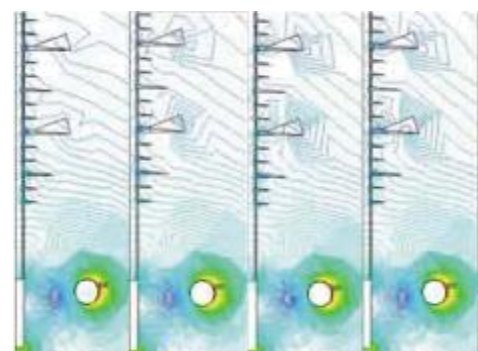
 $\epsilon_r=1.4$ $\epsilon_r=4.0$ $\epsilon_r=25.0$ $\epsilon_r=78.0$ $\rho=10^3 \Omega \cdot m$ $\rho=10^5 \Omega \cdot m$ $\rho=10^8 \Omega \cdot m$ $\rho=10^{10} \Omega \cdot m$

图 11 不同雪参数大伞积雪时电场向量模式等值图

Fig. 11 Electric field contour on vector mode under different snow parameters with snow only on the large sheds

为了进一步比较雪参数变化对沿面电场分布的影响,将雪模型参数分别设置成冰和水的参数进行

仿真计算,再选取其他已有的 5 组仿真计算结果,将这 7 组数据绘于图 12。由图 12 可知,各曲线总体分布趋势无差别,且各曲线几乎重合。

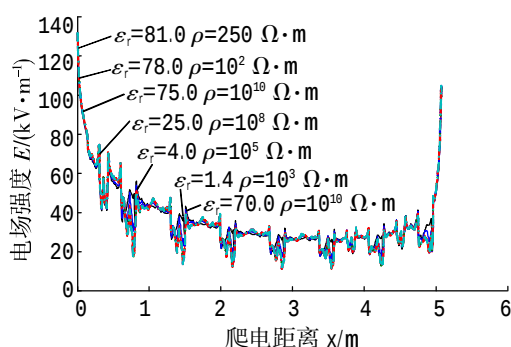


图 12 不同雪参数大伞积雪时沿面电场分布

Fig. 12 Electric field distribution along the surface under different snow parameters with snow only on the large sheds

综上所述,大伞积雪时,随着相对介电常数增加绝缘子的最大场强增加,但增幅并不明显;电阻率不影响场强分布。

4.2 桥接积雪

为研究桥接积雪时雪参数变化对沿面电场分布的影响,雪间隙长度 G 取为 0,即雪覆盖全部伞裙。不同雪参数下桥接积雪时最大场强见表 7。对比表 6、7 发现,桥接积雪时的规律与大伞积雪时相似,只是相对介电常数从 2 增加到 78 时,最大场强增幅高达 125.41%;不同雪参数桥接积雪时电场向量模式等值图见图 13。从图 13 中观察到,随着相对介电常数的增加,高压端、低压端的第 1 大伞边缘和金具连接处的场强畸变程度加大。

表 7 不同雪参数桥接积雪时最大电场强度

Table 7 The maximum electric field intensity under different snow parameters with the large sheds bridged by snow

相对介电常数 ϵ_r	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$					V/m
	0.1	10^2	10^5	10^8	10^{10}	
2	366 531	366 501	366 489	366 472	366 449	
4	375 536	375 515	375 500	375 479	375 456	
25	563 982	563 955	563 937	563 902	563 889	
45	714 115	714 101	714 080	714 054	714 018	
70	806 406	806 391	806 370	806 345	806 322	
78	826 178	826 150	826 157	826 125	826 090	

沿面电场分布图中,雪参数设置与大伞积雪时一致。不同雪参数桥接积雪时沿面电场分布见图 14。对比图 12、14 可以发现,相对介电常数在 2~70 范围内变化时,各曲线差异明显,且随着相对介电常数的增大,曲线脉振幅度增大;相对介电常数在 70~81 范围内变化时,各曲线几乎重合,这也说明随着

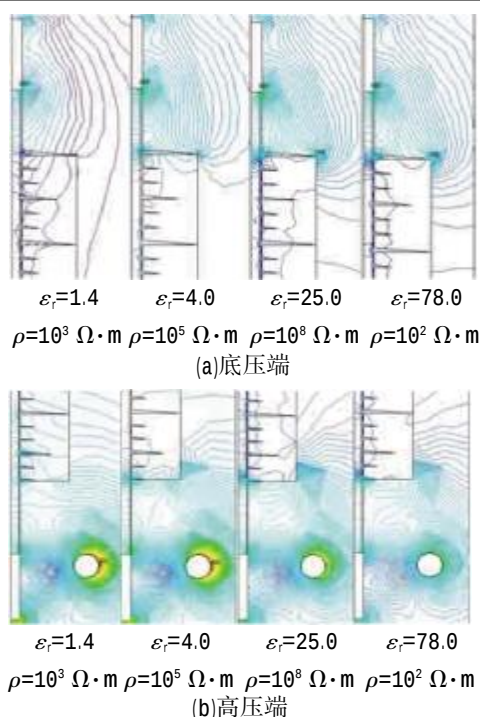


图 13 不同雪参数桥接积雪时电场向量模式等值图

Fig. 13 Electric field contour on vector mode under different snow parameters with the large sheds bridged by snow

相对介电常数的增加沿面场强趋于饱和,且此范围内的最大场强最大,幅值高达 5.2×10^5 V/m。这也表明,当大伞积雪量较少或轻度积雪时,雪参数变化对绝缘子的电气绝缘性能影响较小;当桥接积雪或严重积雪时,雪参数变化严重危害绝缘子的绝缘性能。可以预见,随着绝缘子伞裙积雪量的增加,雪参数变化对绝缘子电气绝缘性能的危害程度加大。

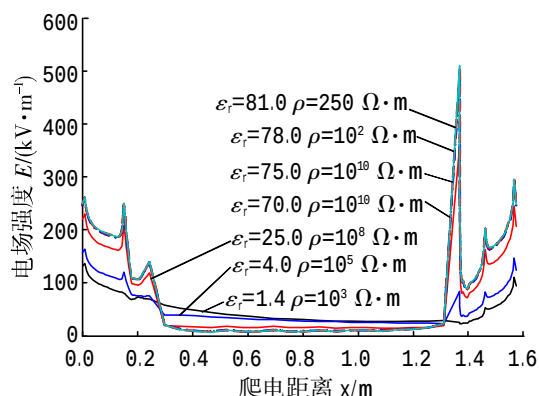


图 14 不同雪参数桥接积雪时沿面电场分布

Fig. 14 Electric field distribution along the surface under different snow parameters with the large sheds bridged by snow

综上所述,桥接积雪时,随着相对介电常数的增加,绝缘子的最大场强增加,且增幅明显;电阻率几乎不影响场强分布。当桥接积雪时,雪参数变化严重危害绝缘子的绝缘性能。随着积雪量的增加,雪参数变化对电气绝缘性能的危害程度加大。

5 结论

文中利用 ANSYS14.0 有限元仿真软件,建立了高海拔地区 110 kV 积雪复合绝缘子二维轴对称模型,研究了大伞积雪时雪面积和雪高度变化、桥接积雪时空气间隙长度和空气间隙位置变化,以及雪参数变化情况对绝缘子沿面电场分布的影响,得出结论如下:

1)大伞积雪时雪面积和雪高度变化对绝缘子沿面电场分布影响较小;最大场强降幅不明显,最大场强出现的位置不受雪影响。

2)桥接积雪时,靠近高压端金具干燥清洁的雪覆盖愈多,绝缘子沿面电场分布愈均匀。

3)随着相对介电常数的增加,绝缘子的最大场强增加;电阻率几乎不影响场强分布。

4)轻度积雪时,雪参数变化对绝缘子的电气绝缘性能影响较小;严重积雪时,雪参数变化严重危害绝缘子的绝缘性能。随着绝缘子伞裙积雪量的增加,雪参数变化对绝缘子电气绝缘性能的危害程度加大。

参考文献:

- [1] 张涛涛,延军平,廖光明,等.近 51a 青藏高原雪灾时空分布特征[J].水土保持通报,2014,34(1):242-245.
ZHANG Taotao, YAN Junping, LIAO Guangming, et al. spatiotemporal distribution of snow disaster on tibetan plateau in recent 51 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 242-245.
- [2] 韩四满,李秀广.宁夏电网覆冰积雪闪络事故的分析及对策[J].电气技术,2013(9):41-43.
HAN Siman, LI Xiuguang. Cause analysis on the flashover fault from ice covering of Ningxia grid and countermeasures[J]. Electrical Technology, 2013(9): 41-43.
- [3] 徐志钮,律方成.混合编程法及其在绝缘子电场和电位分析中的应用[J].电网技术,2012,36(2):182-188.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng. Hybrid programming method and its application in analysis on electric field and potential of insulators[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 182-188.
- [4] 徐志钮,律方成.绝缘材料及其参数对绝缘子表面电场强度和电位分布的影响[J].电网技术,2011,35(9):152-157.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng. Influence of insulating materials and their parameters on surface electric field intensity and potential distribution of insulators[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 152-157.
- [5] 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.
- [6] 袁伟,舒立春,蒋兴良,等.交流电场对 220 kV 复合绝缘子覆冰及其闪络特性的影响[J].高电压技术,2013,39(6):1541-1548.
YUAN Wei, SHU Lichun, JIANG Xingliang, et al. Influence of AC electrical field on 220 kV composite insulators icing and flashover characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1541-1548.
- [7] ANBARASAN R, USA S. Electrical field computation of polymeric insulator using reduced dimension modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 739-746.
- [8] YANG Xi, LI Naiyi, PENG Zongren, et al. Potential distribution computation and structure optimization for composite cross-arms in 750 kV AC transmission line[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1660-1669.
- [9] 盛道伟.覆冰绝缘子闪络机理的研究与发展[J].电瓷避雷器,2014(6):50-54.
SHENG Daowei. Present study and progress on flashover mechanism of iced insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(6): 50-54.
- [10] 龚浩,田丁,别士光.覆冰地区复合绝缘子电场分布研究[J].电瓷避雷器,2015(1):7-10.
GONG Hao, TIAN Ding, BIE Shiguang. Study on electric field distribution of composite insulator in icing areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1): 7-10.
- [11] 黎卫国,郝艳捧,熊国锐,等.覆冰复合绝缘子电位分布有限元仿真[J].电工技术学报,2012,27(12):29-35.
LI Weiguo, HAO Yanpeng, XIONG Guokun, et al. Simulation and analysis of potential distribution of iced composite insulator based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 29-35.
- [12] 邱大庆.覆冰、污秽条件下复合绝缘子电场分布研究[J].电瓷避雷器,2015(1):26-30.
QIU Daqing. Study of the field distribution of composite insulator in icing and contamination conditions[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1): 26-30.
- [13] 刘向实.污秽条件下复合绝缘子电场仿真研究[J].电瓷避雷器,2014(5):31-36.
LIU Xiangshi. Study on electric field distribution of composite insulator under pollution conditions[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 31-36.
- [14] 廖嘉骏,阳林,郝艳捧.融冰期 110 kV 覆冰复合绝缘子电场仿真研究[J].高压电器,2015,51(3):47-54.
LIAO Jiajun, YANG Lin, HAO Yanpeng. Simulation of electric field for 110 kV iced composite insulator in melting period[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 47-54.
- [15] 王泽忠.简明电磁场数值计算[M].北京:机械工业出版社,2011.

- WANG Zezhong. Simple numerical calculation of electro-magnetic field[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [16] 周平, 张明军, 李忠勤, 等. 中国天山冰川区降水、积雪 pH 和电导率季节变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 518-524.
- ZHOU Ping, ZHANG Mingjun, LI Zhongqin, et al. Seasonal variations of the pH and electrical conductivity in precipitation and snow on the glaciers of Tianshan mountains, China[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 518-524.
- [17] 关俊祺, 蔡体久, 满秀玲. 小兴安岭不同类型人工林积雪化学特征[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 41-46.
- GUAN Junqi, CAI Tijiu, MAN Xiuling. Characteristics of snowpack chemistry in different type plantations of Xiaoxing'an Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 41-46.
- [18] 效存德, 姚檀栋, 秦大河, 等. 青藏高原雪冰电导率与降水碱度以及大气粉尘载荷变化的关系[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2001, 31(5): 362-371.
- XIAO Cunde, YAO Tandong, QIN Dahe, et al. The relationship between snow and ice conductivity and alkalinity and atmospheric dust loads precipitation changes in tibetan[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2001, 31(5): 362-371.
- [19] 徐志钮, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 944-951.
- XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 944-951.
- [20] MANABU S, HIROYA H. Widespread blackout triggers study of contaminated wet snow on insulator strings[J]. Insulator News and Market Report(INMR), 2010, 18(2): 95-103.
- [21] FARZANEH M. 覆冰与污秽绝缘子[M]. 蒋兴良, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014: 392-398.
- FARZANEH M. Insulators for Icing and Polluted Environments[M]. JIANG Xingliang, translated. Beijing: China Machine Press, 2014: 392-398.
- 王永强(1975—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 从事在线监测及变电站自动化系统等方面研究。
- 欧阳宝龙(1988—), 男, 硕士, 从事高压绝缘技术和电气设备在线监测研究(通讯作者)。