

复杂天气下直流穿墙套管电场分布仿真研究

邱文严¹, 陈军锋², 周文正³

(1. 郑州电力高等专科学校, 河南 郑州 450000; 2. 中国南方电网超高压输电公司, 广东 广州 510641; 3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 本文首先建立±400 kV 直流穿墙套管的有限元模型, 利用 COMSOL 仿真得到直流穿墙套管的电场与电位分布, 然后研究了冰棱长度、覆冰厚度以及雨水量对套管伞裙沿面电场的影响。结果表明: 当冰棱长度增大至使伞裙桥接时, 电场畸变严重; 覆冰厚度增大对伞裙的沿面最大电场影响较小; 当雨水量达到 10 mm 时, 伞裙的沿面最大电场急剧增大, 且电场畸变点增多。研究结果可为超、特高压直流穿墙套管的研制与设计提供参考。

关键词: 直流穿墙套管; 覆冰; 复合绝缘子; 电场分布; 有限元仿真

中图分类号: TM216 **DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.09.009

Simulation on electric field distribution of DC wall bushing under complex weather conditions

QIU Wenyan¹, CHEN Junfeng², ZHOU Wenzheng³

(1. Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, China;

2. China Southern Power Grid Extra High Voltage Transmission Company, Guangzhou 510641, China;

3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this paper, a finite element model of ±400 kV DC wall bushing was firstly established, and the electric field and potential distributions of the DC wall bushing were simulated by COMSOL software. Then the effects of ice edge length, ice cover thickness, and rainfall on the surface electric field of the bushing umbrella skirt were studied. The results show that when the ice edge length increases to bridge the umbrella skirt, the electric field distorts seriously. The increase of ice thickness has little influence on the maximum surface electric field of the umbrella skirt. When the rainfall reaches 10 mm, the maximum surface electric field of the umbrella skirt increases sharply, and the electric field distortion points increase. The research results can provide reference for the development and design of UHV and EHV DC wall bushing.

Key words: DC wall bushing; ice-covered; composite insulator; electric field distribution; finite element simulation

0 引言

为实现电力资源的合理分配, 建设输送容量大、距离远的特高压直流输电线路势在必行。随着电网覆盖范围越来越广, 超高压电网已经成为连接各省电网公司的纽带, 经常需要穿越一些地理环境复杂、环境恶劣的区域。±400 kV 超高压直流穿墙套管作为换流站中直流场和高、低端阀厅的连接设备, 在整个直流输电工程换流站中处于关键的“咽喉”位置, 其在覆冰、降雨等工况下的绝缘状态直接影响着电网的安全稳定运行^[1-2]。因此, 开展超高压直流穿墙套管在复杂工况下的电位电场分布仿真研究, 对覆冰、降雨量大地区直流穿墙套管的设计和运维具有重要的参考价值。

高压直流穿墙套管通常采用纯 SF₆ 气体绝缘与环氧芯体 SF₆ 气体复合绝缘两种绝缘形式。纯 SF₆ 气体绝缘穿墙套管具有质量相对较轻、结构简单、力学性能优异、散热条件好、通流能力强等特点, 是高压直流穿墙套管比较可行的方案^[3]。复合绝缘子作为套管外绝缘, 具有质量轻、强度高、耐污性能好以及运行维护方便等优点, 在高压穿墙套管中应用广泛^[4]。研究者们针对直流穿墙套管的结构、绝缘子覆冰情况以及均压屏蔽罩设计等问题开展了相关的研究工作^[5]。文献[6]针对 FXBW-110/70 型复合绝缘子, 研究了覆雪对其电场分布的影响规律, 提出可通过增大空气间隙以降低覆雪后绝缘子的沿面电场强度。文献[7]建立了±500 kV 超高压干式直流穿墙套管模型, 仿真结果表明套管高场强区集中在屏蔽层翻边位置及套管两端端头位置, 提出使用

均压环和屏蔽环能有效提高套管的绝缘稳定性。文献[8]以LXY-120型绝缘子为研究对象,对不同环境条件下绝缘子覆冰类型及增长特性进行仿真计算与试验验证,得到绝缘子覆冰范围、厚度与环境因素的关系。文献[9]仿真了不同破损程度、不同破损位置复合绝缘子伞裙的破损状态,得到了沿干弧路径和沿面路径上的电场强度和电位分布曲线。文献[10]将流体力学用于分析水滴碰撞现象,提出绝缘子覆冰等效直径的概念,研究了杆径、伞间距、伞倾角和伞径对等效直径的影响。文献[11]设计了一种新型穿心结构带环形电阻片的500 kV防雷防冰闪复合绝缘子,在覆冰厚度为10 mm且冰棱长度为10 cm的情况下,绝缘子表面最大场强均小于空气起晕与击穿场强,为重冰多雷地区的输电线路保护提供了参考。文献[12-15]针对特高压换流站中直流穿墙套管屏蔽罩、均压环、金具、复合绝缘子等开展了相关研究,仿真结果与优化措施旨在保证直流穿墙套管的绝缘状态符合设计需求。

目前针对交流输电线路绝缘子覆冰、高压直流穿墙套管均压环、屏蔽罩设计等已有相关研究工作^[16-18],相比之下特、超高压直流穿墙套管在复杂工况下的研究稍显不足,且未涉及不同覆冰、降雨条件下的直流穿墙套管状态。本文针对±400 kV直流穿墙套管在覆冰、降雨等复杂天气下的绝缘状态展开研究,建立超高压直流穿墙套管有限元仿真模型,研究多种覆冰、降雨条件下直流穿墙套管伞裙的沿面电位与电场分布,得到不同覆冰、降雨条件下的电场分布规律,为覆冰多雨地区直流输电线路外绝缘的选择和设计提供参考。

1 电场基本理论

为研究超高压直流穿墙套管的电位与电场分布,需采用静电场仿真实理论建立控制方程。时域有限差分法、模拟电荷法和有限元法是静电场分析的常用方法,本研究进行超高压直流穿墙套管电场仿真时施加±400 kV直流电压,并通以额定的直流电流,故可采用相应的静电场方法求解。根据高斯定律以及电流的连续性方程可求出电场在直流电压下的分布情况^[19],如式(1)所示。

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E) = \rho \\ \nabla \times E = 0 \end{cases} \quad (1)$$

在不同介质连续交界面上的电场分布如式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{n} \times (E_1 - E_2) = 0 \\ \mathbf{n} \times (D_1 - D_2) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: E 为电场强度; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数; \mathbf{n} 为分界面的法向方向; E_1 、 E_2 为分界面两侧的电场强度; D_1 、 D_2 则为两侧介质垂直于界面的电位移矢量; ρ 为空间电荷体密度。

电位函数 φ 满足式(3),其中 ε 为介电常数。

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3)$$

2 穿墙套管结构模型

±400 kV超高压直流穿墙套管由空心复合绝缘子、穿墙套管、屏蔽罩、中心导体和均压环等部件组成,如图1所示。高压穿墙套管为非对称结构,户外侧长于户内侧。空心复合绝缘子与中心导体、穿墙套筒、均压环、屏蔽罩均为同轴,其表面伞裙材料选用憎水性好的硅橡胶材料,内侧为环氧玻璃丝筒,伞裙增大了爬电距离可在一定程度上避免沿面闪络。穿墙筒体镶嵌在墙壁上,中心导体贯穿整个直流穿墙套管,单屏蔽结构布置在中心导体两端以及中间穿墙部位,起到改善电场分布的作用。套管中心为导电铜杆,与墙体连接部位为铸铝材质,套管内部填充SF₆绝缘气体,套管两端为铝制的均压环。

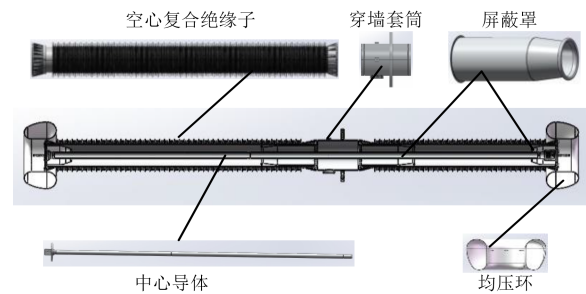


图1 ±400 kV超高压直流穿墙套管仿真模型

Fig.1 Simulation model of ±400 kV ultra-high voltage DC wall bushing

利用有限元仿真软件COMSOL进行电场仿真,假设覆冰层为棱状,且均匀分布在穿墙套管伞裙之上,通过设置覆冰层的相对介电常数与电导率来模拟覆冰层的存在。在网格剖分时,为了提高精确度,在仿真计算过程中使用不同网格类型,最小单元格为边长1.75 mm的等边三角形,最大单元格为边长468 mm的等边三角形,最大单元增长率为1.2,曲率因子为0.25。超细化网格设置在伞裙的顶部和底部、套管内单屏蔽弯曲处、覆冰层接触套管处,网格分布较为紧密,而空气域网格较为稀疏,这有利于提高关键部位的计算精度。端部均压环和中心导体施加高电位,穿墙套筒与墙体施加零电位。套管模型涉及的电介质物理参数见表1。从工程近似

角度需对仿真模型进行如下简化:①忽略周围其他设备对穿墙套管电场的影响;②通过建立合适的人工边界代替无穷边界求解模型;③考虑重力的作用,研究穿墙套管轴线以上部分覆冰、雨水的影[20]。

表1 直流穿墙套管的材料参数

材料	相对介电常数	电导率 /(S/m)	临界击穿场强 /(kV/mm)
空气	1.000 5	—	3.0
SF ₆ (0.4 MPa)	1.002	—	≥16
硅橡胶伞裙	11.7	10 ⁻¹²	22
环氧玻璃丝筒	4.2	10 ⁻¹⁴	18
金属导体	10 ¹⁰	5.81×10 ⁷	—
墙体	6	—	—
覆冰	75	10 ⁻⁶	—
雨水	81	300	—

3 电场仿真分析

基于上述模型,对直流穿墙套管的电位、电场分布进行仿真,结果如图2所示。从图2可以看出,直流穿墙套管的电位呈“U”型分布,两端均压环、金属法兰以及导体电压为400 kV,沿着中间穿墙套筒与墙体接地方向降低为零电位。而最大电场强度位于穿墙筒体屏蔽罩端部圆弧处,其值为6.8 kV/mm,而直流穿墙套管进出线端的电场强度由于均压环的改善作用,分布较为均匀。从进线端到出线端,空心复合绝缘子伞裙的沿面电场分布呈现先增大后减小的趋势,电场强度峰值为1.2 kV/mm,位于屏蔽罩端部圆弧末端对应伞裙位置。

3.1 覆冰桥接情况下穿墙套管的电位及电场分布

不同覆冰形态对直流穿墙套管伞裙沿面电位分布有着不同的影响规律,当冰棱生长到一定的程度时会造成桥接,此时伞裙空气间隙的减小使得空间电场强度急剧增大,会引发空气击穿或覆冰闪络现象。

干燥与覆冰桥接情况下,直流穿墙套管伞裙的沿面电场分布如图3所示。由图3可知,干燥条件下复合绝缘子伞裙的沿面电位分布线沿着复合绝缘子伞裙外沿分布,电场强度较大处位于伞裙外端部与屏蔽罩对应伞裙位置,整体呈现先增大后减小的趋势;覆冰桥接情况下,伞裙沿面覆冰形成冰棱,冰棱生长到一定程度直接与伞裙底部相连,绝缘子伞裙的空气间隙被冰棱桥接,穿墙套管伞裙的电位分布线沿着伞裙与冰棱外沿分布,因冰棱桥接缩短了伞裙之间的空气间隙,除了位于伞裙外端部与屏

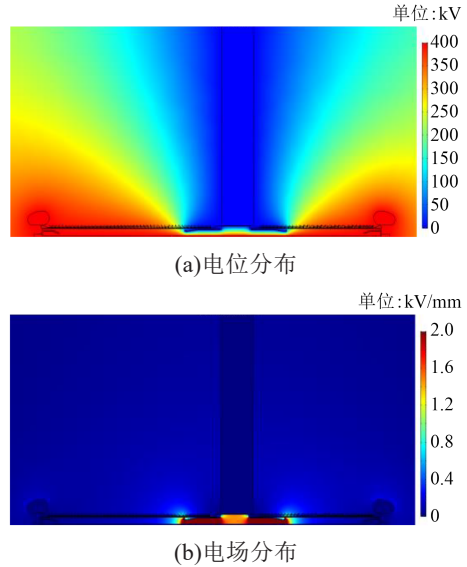


图2 直流穿墙套管的电位、电场分布
Fig.2 Potential and electric field distributions of DC wall bushing

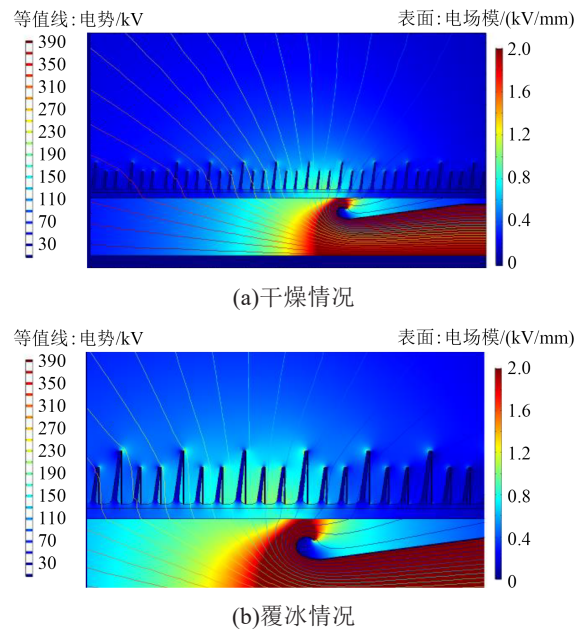


图3 干燥与覆冰桥接情况下电场分布图
Fig.3 Electric field intensity distributions under dry and ice-covered conditions

蔽罩对应伞裙位置的电场强度较大外,冰棱沿面的电场强度也较大,增大了空气击穿的概率。

沿水平方向取直流穿墙套管绝缘子伞裙沿面的电场强度如图4所示。从图4可以看出,干燥情况下伞裙的沿面电场分布较为均匀,伞裙底部电场较小,伞裙端部电场强度较大,电场分布沿伞裙呈现阶跃式变化,电场强度最大值为1.2 kV/mm。而覆冰桥接后伞裙端部电场强度发生畸变,近屏蔽罩端部的伞裙因冰棱桥接电场强度急剧增大至3.6

kV/mm,超过了空气的击穿场强,将会在伞裙之间的空气间隙发生击穿现象,造成直流穿墙套管的安全隐患。

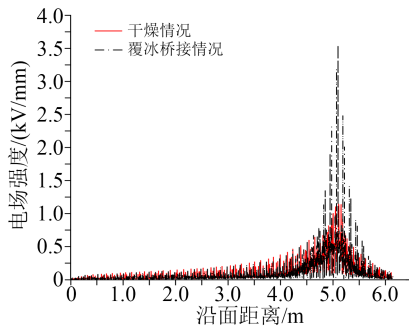


图4 干燥与覆冰桥接情况下绝缘子伞裙沿面电场分布

Fig.4 Surface electric field intensity distributions of the composite insulator skirt under dry and ice-covered conditions

3.2 冰棱长度对穿墙套管伞裙电场分布的影响

为研究不同冰棱长度对套管伞裙沿面电场的影响规律,假设覆冰厚度为2 mm^[21-22],改变冰棱长度为10、20、30、40、50、90 mm(完全桥接),即大伞裙、小伞裙被冰棱桥接的情况进行分析。

不同冰棱长度复合绝缘子伞裙的沿面电场分布如图5所示。从图5可以看出,因增加了伞裙覆冰的厚度,不同冰棱长度条件下沿面电场强度峰值出现位置存在差异。不同覆冰长度条件下,沿面整体电场强度呈现先增大后减小的趋势,且最大电场强度都位于近屏蔽罩端部伞裙处。冰棱长度为10、20、30、40、50、90 mm(完全桥接)时,最大电场强度分别为1.30、1.60、1.75、1.85、2.20、3.60 kV/mm,相对于干燥条件下的最大电场强度分别增大了8.3%、33.3%、45.8%、54.2%、83.3%以及200%,最大电场强度随着冰棱长度的增加而增大,在完全桥接条件下,即覆冰厚度为2 mm,冰棱长度为90 mm时,冰棱为伞裙之间提供了导电通道,缩短了沿面爬电距离,沿面最大电场强度发生激增。此外,覆冰厚度的增加也提高了伞裙整体的沿面电场强度,电场线聚集,提高了污秽微粒引起沿面闪络与击穿的风险。

3.3 覆冰厚度对穿墙套管伞裙电场分布的影响

当冰棱完全桥接伞裙之后,覆冰厚度的变化也会对伞裙沿面电场分布产生影响。图6为不同覆冰厚度复合绝缘子伞裙的沿面电场分布,分别取覆冰厚度为2、4、6、8、10 mm。从图6可以看出,冰棱桥接状态下,随着覆冰厚度的增加,最大电场强度整体呈轻微增大趋势,覆冰厚度为2 mm与4 mm时对应的最大电场强度分别为3.6 kV/mm与3.7 kV/mm,

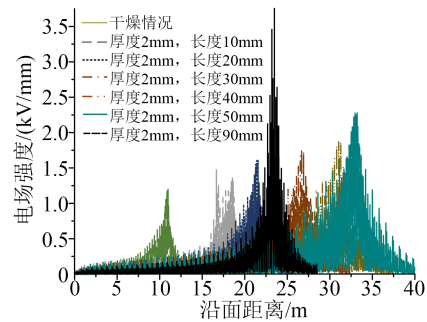


图5 不同冰棱长度复合绝缘子伞裙沿面电场分布

Fig.5 Surface electric field distributions of the composite insulator skirt with different length of ice edge

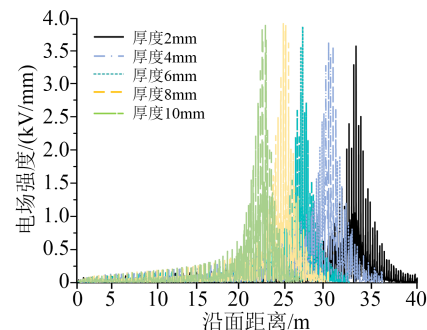


图6 不同覆冰厚度复合绝缘子伞裙沿面电场分布

Fig.6 Surface electric field distributions of the composite insulator skirt with different ice thickness

而覆冰厚度为6、8、10 mm时的最大电场强度则在3.8 kV/mm附近,表明完全桥接后覆冰厚度的增加对伞裙沿面电场强度影响较小,当覆冰厚度大于6 mm时,由于覆冰表面水膜的高电导率作用,减小了冰棱上的压降,导致伞裙沿面电场强度变化趋于稳定^[2,4]。

3.4 雨水量对穿墙套管伞裙电场分布的影响

为模拟雨水量对复合绝缘子伞裙沿面电场的影响,假设降雨形成椭圆形的水珠,雨水量为2~10 mm,在文中指椭圆形水珠聚集在伞裙底部的高度。图7为雨水量为10 mm情况下伞裙沿面电场强度分布的局部放大图,可以看到雨水聚集造成了局部电场畸变,表面电场强度明显增大。图8为不同雨水量下绝缘子伞裙的沿面电场分布,由于雨水电导率远高于伞裙硅橡胶和覆冰冰棱的电导率,降雨条件下伞裙表面上作用电压几乎都施加在空气间隙上,使得空气间隙承受的电压降比干燥和覆冰时更大。从图8可以看出,绝缘子伞裙表面最大电场强度随着雨水量的增加而增大,且相比覆冰条件下,电场强度畸变点增多。在雨水量为2、4、6 mm的条件下,最大电场强度低于空气击穿场强,而在雨水量为8 mm和10 mm的条件下,伞裙沿面最大电场强度增大,分别达到4.3 kV/mm和6.2 kV/mm,且伞裙

底部电场强度畸变点增多,使直流穿墙套管伞裙间空气间隙发生大量击穿现象,将造成设备故障。

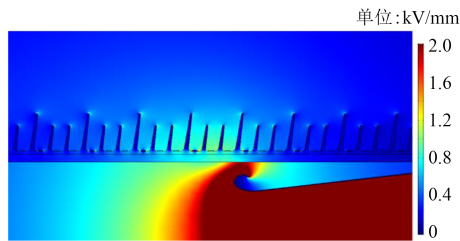


图7 雨水量为10 mm时复合绝缘子伞裙的沿面电场强度分布局部放大图

Fig.7 Partial enlarged drawing of surface electric field intensity distribution of the composite insulator skirt with 10 mm of rainfall amount

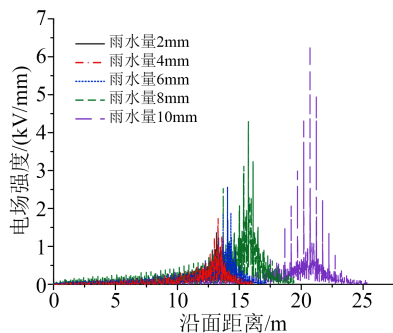


图8 不同雨水量下复合绝缘子伞裙的沿面电场分布

Fig.8 Surface electric field distributions of the composite insulator skirt with different amount of rainfall

4 结论

(1)直流穿墙套管电位呈现“U”型分布,从进线端到出线端空心复合绝缘子伞裙沿面电场分布呈现先增大后减小的趋势,干燥条件下绝缘子伞裙最大沿面电场强度为1.2 kV/mm,位于屏蔽罩端部圆弧末端对应伞裙位置。

(2)覆冰条件下,绝缘子伞裙沿面最大电场强度随着冰棱长度的增加而增大,在完全桥接条件下,最大电场强度急剧增大至3.6 kV/mm。覆冰厚度对绝缘子伞裙沿面最大电场强度影响效果不明显,当覆冰厚度大于6 mm时影响趋于稳定。

(3)伞裙沿面最大电场强度随着雨水量的增加而增大,由于雨水在伞裙底部聚集,造成了局部电场畸变,且电场强度畸变点增多。

参考文献:

[1] 狄谦. ±400kV 直流 SF₆ 气体绝缘穿墙套管研制[J]. 高压电器, 2018,54(8):188-192,198.

- [2] 张瑞峰,贾冬明,杨晓辉,等. 覆冰复合绝缘子电场分布的研究[J]. 绝缘材料,2015,48(9):42-46.
- [3] 柴影辉,钟建英,谭盛武,等. 基于有限元分析的特高压直流穿墙套管结构优化设计[J]. 电瓷避雷器,2021(2):47-52,58.
- [4] 黎卫国,郝艳捧,熊国锟,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.
- [5] 钟建英,柴影辉,王赛豪,等. ±1100kV 直流纯 SF₆ 气体绝缘穿墙套管关键技术研究[J]. 电力建设,2017,38(10):129-137.
- [6] 王涛,王琰,朱海南,等. 覆雪对110kV 复合绝缘子电场分布规律的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2021,35(2):62-67.
- [7] 曾令文. 500kV 超高压直流穿墙套管有限元三维电场分析[J]. 电瓷避雷器,2021(2):53-58.
- [8] 高晋,郭思华,韩兴波,等. 绝缘子表面三维覆冰特性的影响因素[J]. 电工技术学报,2021,36(14):3072-3080.
- [9] 祝贺,赵浩然. 复合绝缘子伞裙破损状态下的电位电场仿真研究[J]. 电瓷避雷器,2016(5):1-6.
- [10] 蒋兴良,潘杨,汪泉霖,等. 基于等效直径的复合绝缘子覆冰特性与结构参数分析[J]. 电工技术学报,2017,32(7):190-196.
- [11] 蒋正龙,吴伟,尹小根,等. 具有防雷功能的500kV 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.
- [12] 陈东,乐波,郭贤珊,等. ±1100kV 特高压换流站支柱绝缘子屏蔽球参数优化设计[J]. 高电压技术,2017,43(10):3189-3197.
- [13] 刘士利,王洋,张力丹,等. ±800kV 特高压直流受端分层接入方式下低端阀厅金具结构设计[J]. 电工技术学报,2017,32(14):238-245.
- [14] 罗晓庆,胡伟,徐涛,等. ±1100kV 直流U型结构穿墙套管空气间隙放电特性及间隙距离选择[J]. 高电压技术,2017,43(3):946-952.
- [15] 王平,赵映宇,律方成,等. 雨水分布状态对±1100kV 平波电抗器表面电场的影响[J]. 高电压技术,2017,43(10):3208-3214.
- [16] 刘辉,孙家祥,沈庆河,等. 高压直流输电线路复合绝缘子的积污特性研究[J]. 绝缘材料,2016,49(6):51-55,61.
- [17] 高同虎,胡元潮,安韵竹,等. 覆着藻类对110kV 复合绝缘子电场分布的影响研究[J]. 绝缘材料,2019,52(10):59-64.
- [18] 周吉刚,李希元,徐中凯,等. 基于有限元的瓷绝缘子劣化对输电线路绝缘子串轴向电场分布影响研究[J]. 绝缘材料,2021,54(10):79-83.
- [19] 胡建林,吴尧,肖代波,等. 特高压直流复合支柱绝缘子均压环的优化设计[J]. 高电压技术,2014,40(1):46-54.
- [20] 李刚,李彦哲,李宝学. 积雪腕臂绝缘子电场有限元仿真分析[J]. 电瓷避雷器,2022(3):209-216.
- [21] 刘杰. 基于弧垂的输电线路等值覆冰厚度监测方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
- [22] 李桂铭. 架空输电线路导线覆冰厚度计算[J]. 华电技术,2018,40(1):10-12.

收稿日期:2022-11-13 修回日期:2022-12-29

作者简介:邱文严(1978-),女(汉族),山东德州人,副教授,研究方向为电力工程、计算机工程等。