

## 交流 GIS 用支柱绝缘子绝缘结构优化设计

刘超峰, 朱传运, 李建彬, 陈英, 黄鑫,  
齐小虎, 王永清, 管健, 金喜洋

(河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

**摘要:** 支柱绝缘子作为气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)中重要的支撑部件,其绝缘性能影响着GIS的可靠性和稳定性。本文以工程GIS用支柱绝缘子为研究对象,选取绝缘子表面切向电场强度作为绝缘性能指标,分析了绝缘子伞裙的数量、起始位置、根部半径、顶部半径参数以及收缩伞裙结构对绝缘性能的影响。结果表明:通过增设伞裙,绝缘子切向电场分布呈现波峰、波谷震荡,有利于阻碍绝缘子沿面放电的发展。最大切向电场强度随伞裙数增加而增大,随伞裙起始位置距高压电极距离增大而减小,其位置随伞裙根部半径变化发生转移。优化结构与原始结构相比,其沿面最大切向电场强度由12.66 kV/mm下降至9.69 kV/mm,降幅为23.5%,通过负极性雷电冲击考核及裕度试验,绝缘裕度高达1.3倍以上。

**关键词:** 支柱绝缘子;切向电场强度;沿面放电;结构优化;雷电冲击电压

### Optimized design on insulation structure of post insulators for AC GIS

LIU Chaofeng, ZHU Chuanyun, LI Jianbin, CHEN Ying, HUANG Xin,  
QI Xiaohu, WANG Yongqing, GUAN Jian, JIN Xiyang  
(Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

**Abstract:** Post insulator is an important supporting component in gas insulated metal enclosed switchgear (GIS), its insulating properties affects the reliability and stability of GIS. Taking the post insulator for engineering GIS as research object, we selected the surface tangential electric field strength of the insulator as the insulating properties index, and analyzed the influence of the umbrella skirts number, starting position, root radius, top radius parameters of the insulator as well as the shrinkage umbrella skirt structure on the insulating properties. The results show that the tangential electric field of insulator shows wave peaks and troughs oscillation distribution by increasing the umbrella skirt number, which is conducive to hinder the development of insulator surface discharge. The maximum tangential electric field strength increases with the increase of umbrella skirts number, and decreases with the increase of the distance between the starting position of umbrella skirt and the high-voltage electrode. The location of the maximum tangential electric field value shifts with the radius at the base of umbrella skirt. Compared with the original structure, the maximum tangential electric field strength along the surface of optimized structure decreases from 12.66 kV/mm to 9.69 kV/mm, and the decrease rate is 23.5%. It is found that the insulation margin is more than 1.3 times through the negative lightning impulse voltage test and margin test.

**Key words:** post insulators; tangential electric field strength; surface flashover; structural optimization; lightning impulse voltage

## 0 引言

随着“碳达峰”、“碳中和”的逐步推进,我国对清洁能源的输送需求日益提升,对长距离、高电压等级的输电需求也日益增长<sup>[1-5]</sup>。气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)因其结构紧凑、可靠性高、维护工作量小、检修周期长、配置灵活等优点,在高压输变

电系统中得到了广泛应用,已成为发输变电站中的关键设备<sup>[6-8]</sup>。根据国家“十四五”现代能源体系规划要求,在构建以新能源为主体的新型电力系统背景下,开关设备厂家大力推进基于大容量开断、直流开断、低频开断以及高速开断等新技术GIS的同时,也在开发无氟环保或少氟GIS设备,以此助力电力装备向绿色、低碳、环保转型<sup>[9-12]</sup>。支柱绝缘子作为GIS设备中的重要支撑部件,是由环氧树脂和填

料按一定比例混合,然后加入固化剂,进行真空脱气,最后将液体混合物倒入预热的铸型中,再进行两级凝固工艺制备而成,其结构的合理性、电场分布的均匀性对 GIS 设备绝缘性能起到重要作用<sup>[13-16]</sup>。因此,基于环氧树脂的支柱绝缘子沿面电场优化是 GIS 产品设计的重要课题<sup>[17-19]</sup>。

绝缘子的电场优化设计主要通过建立有限元模型,优化结构的尺寸参数及介电分布,以提升绝缘子沿面耐电强度<sup>[20-22]</sup>。一方面,结构参数的优化通过改变绝缘子的型面来改善沿面切向电场分量和电极表面的电场模值,进而达到提高绝缘性能的目的。文献[23]采用自适应变异的粒子群算法,基于贝塞尔曲线的绝缘子表面轮廓描述方法,分析了绝缘子伞裙和金属嵌件的结构参数对性能的影响。文献[24]提出了盆式绝缘子的电气、力学性能综合优化方案以及基于遗传算法的结构参数优化方法,该研究在满足力学性能要求的前提下优化了电场。文献[25]利用智能优化算法对盆式绝缘子、高压屏蔽罩及中心连接件的形状进行了优化,改善了 GIL 内部电场局部过大的问题。另一方面,介电分布优化通过主动调整绝缘结构内的介电参数空间分布来实现电场调整,该方法为解决高电压等级 GIS 小型化提供了新思路、新手段<sup>[26-30]</sup>。文献[31]提出了一种层叠式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化方法,可自适应调整每层材料的介电常数,获得优化后的介电常数分布。文献[32]提出的多层次综合优化策略能够最大程度地利用 GIS 盆式绝缘子的设计空间,实现几何形状与介电分布的综合优化效果。

当前针对绝缘子的研究,主要通过对结构进行优化设计来获得最小电场强度值,缺乏对绝缘子爬电距离、电场强度等影响因素的综合分析,且绝缘子的电场强度越小并不意味着其结构越优。本文首先针对具体电压等级交流 GIS 用支柱绝缘子,结合工程实际放电现象及电场仿真结果,分析其沿面放电的真实原因。其次,以该支柱绝缘子原始结构为基础,讨论不同伞裙起始位置、根部半径、顶部半径等关键物理结构参数对支柱绝缘子切向电场分布的影响。然后针对工程中改进的收缩伞裙结构支柱绝缘子,从爬电距离、最大切向电场强度等方面,阐述收缩伞裙结构不利于绝缘性能提高的原因。最终通过负极性雷电冲击考核和裕度试验,证

明优化支柱绝缘子的绝缘可靠性,为交流 GIS 用支柱绝缘子的绝缘结构优化设计提供参考。

## 1 支柱绝缘子沿面放电分析

### 1.1 沿面闪络现象

对某电压等级 GIS 产品的出厂耐压试验、现场交接试验及现场运行放电进行统计,发现支柱绝缘子放电特征主要为沿面贯穿性放电,如图 1 所示。从图 1 可以看出,放电位置始于支柱绝缘子高电位嵌件根部三交区处,有明显的放电圆点,在伞裙处则呈树枝状发展,放电止于支柱绝缘子低电位嵌件连接法兰处。放电后对支柱绝缘子进行 X 光探伤、外观检测,发现内部无气隙和杂质,表面无磕碰和划伤,可排除因零部件质量缺陷导致的放电。



图 1 支柱绝缘子的沿面闪络现象

Fig.1 Surface flashover phenomenon of post insulator

### 1.2 电场计算模型

采用有限元法建立该电压等级 GIS 用支柱绝缘子电场计算模型,整体结构如图 2 所示。从图 2 可以看出,壳体与下嵌件相连,高压导体与上嵌件相连并起到导通电流作用,高压导体与壳体间充入 0.4 MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体。取支柱绝缘子环氧树脂材料和 SF<sub>6</sub> 的相对介电常数分别为 4.95 和 1.002 4。选择网格类型为四面体,并采用自动划分网格功能,在绝缘子伞裙处加密网格,共划分 478 134 个网格。

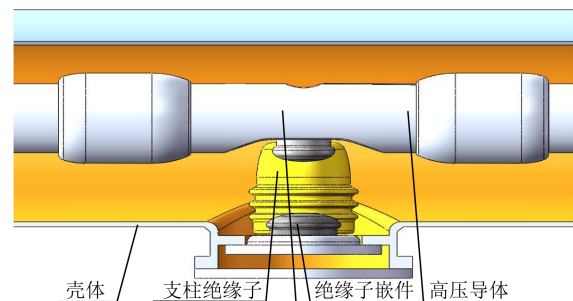


图 2 支柱绝缘子整体结构

Fig.2 Overall structure of post insulator

根据 GB 7674—2020 对产品绝缘试验的要求, 高压导体及绝缘子上嵌件加载雷电冲击电压值, 壳体及绝缘子下嵌件为零电位。

### 1.3 原结构电场分布

支柱绝缘子嵌件通常为内部电场集中处, 冲击电压一般不会从此处引起绝缘破坏, 更需要关注的是在工作电压长期作用下的绝缘可靠性。通过有限元计算, 得到支柱绝缘子整体电场分布如图 3 所示。

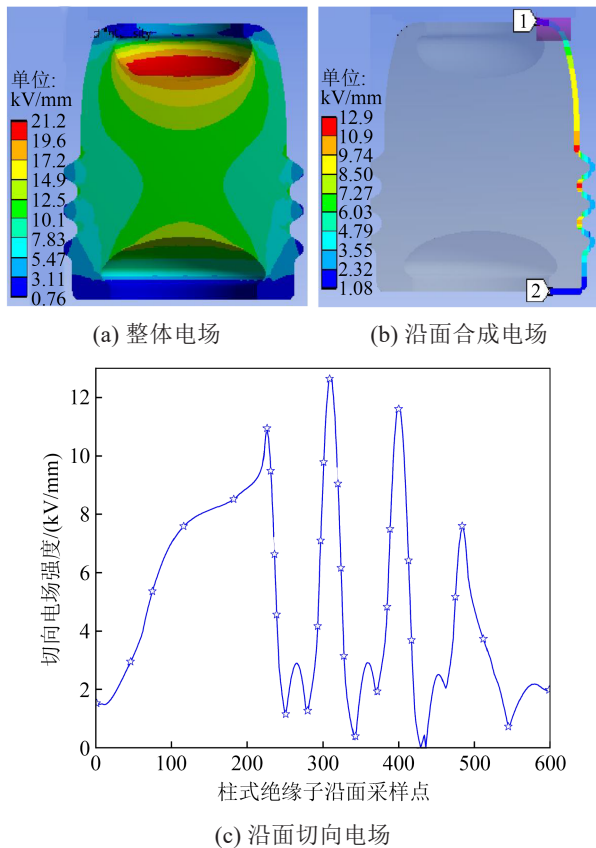


图3 支柱绝缘子电场分布

Fig.3 Electric field distribution of post insulator

由图 3(a)可以看出, 最大电场强度为 21.2 kV/mm, 换算到工频相电压下的数值为 2.91 kV/mm, 满足小于闭锁气压 0.33 MPa 对应的判据值 3.0 kV/mm<sup>[33]</sup>的条件, 可以排除是因嵌件局部放电过大, 加速绝缘老化引起的放电。支柱绝缘子的沿面放电取决于对雷电冲击能力的承受能力, 需要控制绝缘件表面切向场强。由图 3(b)~(c)可知, 支柱绝缘子表面合成电场强度及切向电场呈不均匀分布, 在伞裙根部、顶部突变明显。其中, 切向电场强度在伞裙起始位置突然增大到 11.15 kV/mm, 接近闭锁气压 0.33 MPa 对应的判据值 11.20 kV/mm<sup>[33]</sup>。经

伞裙顶部后断崖式跌落, 于伞裙根部再次增大到 12.66 kV/mm。随后回落又再次增大至 11.61 kV/mm, 后两处峰值已大于判据值, 存在较高放电风险。基于上述分析, 可从结构的角进行支柱绝缘子电场强度的优化。

## 2 支柱绝缘子沿面绝缘设计

根据工程实践经验, 影响绝缘子沿面放电除环氧树脂表面状态、电场分布及异物积聚等因素外, 沿面爬电距离也是非常关键的因素之一。支柱绝缘子往往受制于母线管道空间, 高、低位嵌件间的距离不能无限加大, 因此多采用沿面增设伞裙的方式增加爬电距离。

图 1 所示的原结构支柱绝缘子由于增加了 3 个伞裙, 沿面爬电距离较无伞裙结构提高了 20.3%。根据原结构电场仿真结果, 增加伞裙会导致切向电场突变, 最大值已超过设计判据, 朝着不利于提高沿面绝缘特性方向发展。因此, 需在保证一定爬电距离的情况下充分降低绝缘子的最大电场强度。

### 2.1 伞裙数量对电场的影响

支柱绝缘子切向电场分布随伞裙数  $N$  的变化如图 4 所示。

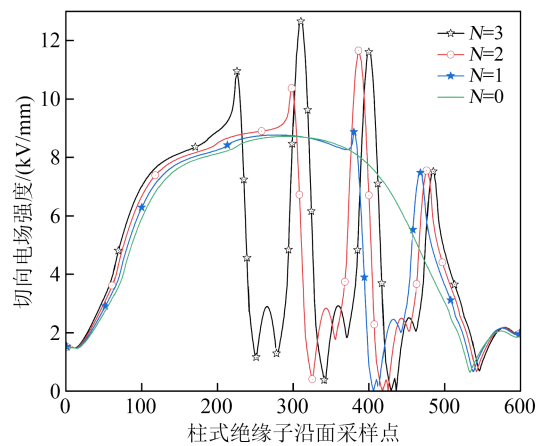


图4 伞裙数对切向电场分布影响

Fig.4 The influence of umbrella skirt number on tangential electric field distribution

由图 4 可知: ①支柱绝缘子无伞裙时, 切向电场呈一条光滑曲线分布, 增加伞裙后呈现含波峰、波谷的形式震荡, 并在伞裙根部处突增、顶部处突降, 最小降至 0.2 kV/mm, 有效阻碍了绝缘子沿面放电的发展。②当伞裙数分别为 2 和 3 时, 最大切向电场值分别为 11.66 kV/mm、12.66 kV/mm, 较无伞裙

结构增大了33.7%、45.2%，超过设计判据，最大切向电场强度始终出现在第一个伞裙后的位置。③随着伞裙数的减少，伞裙起始位置、伞裙根部切向电场强度及突变幅度逐渐减小，当 $N=1$ 时，切向电场分布在伞裙顶部发生大幅跌落，最大切向电场强度为8.87 kV/mm，与无伞裙结构的8.72 kV/mm 电场强度基本相当。

## 2.2 伞裙参数对电场的影响

由伞裙数量对电场的影响可知，当 $N=2$ 时最大切向电场强度为11.66 kV/mm，接近设计判据值，因此本文以该伞群数量为基础，进一步分析伞裙物理结构参数对电场的影响。支柱绝缘子伞裙物理结构参数如图5所示。图5中， $L$ 为绝缘子伞裙起始位置距高压电极的距离， $R_1$ 为绝缘子伞裙根部半径， $R_2$ 为绝缘子伞裙顶部半径。

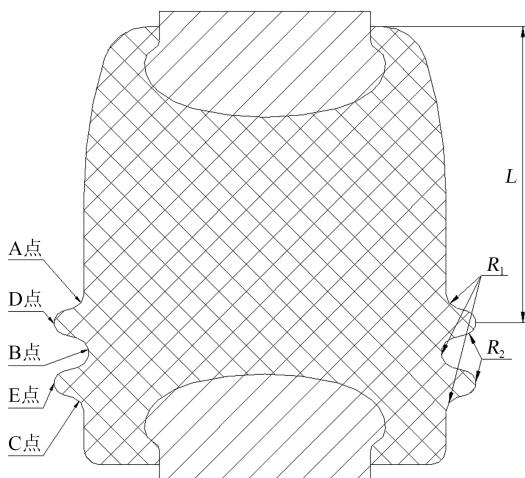


图5 绝缘子伞裙结构参数

Fig.5 Structure parameters of post insulator umbrella skirt

### 2.2.1 伞裙起始位置

伞裙起始位置距高压电极的距离 $L$ 由98 mm 逐级递增到107 mm 时，支柱绝缘子的切向电场分布如图6所示。由图6可知：①随着 $L$ 增大，最大切向电场强度依次为11.66、11.03、10.85、10.44 kV/mm，呈逐渐减小的趋势，最大切向电场强度降幅为10.5%。②A、B、C的切向电场强度随 $L$ 增大而减小，减小幅度 $\Delta E_C > \Delta E_B > \Delta E_A$ ，即伞裙根部位置距离高压电极越远，切向电场强度减小幅度越大。B点切向电场强度始终高于A、C两点，即最大切向电场强度的位置不随 $L$ 的改变而发生变化。③随着 $L$ 增大，D、E两个位置的切向电场强度基本保持不变。

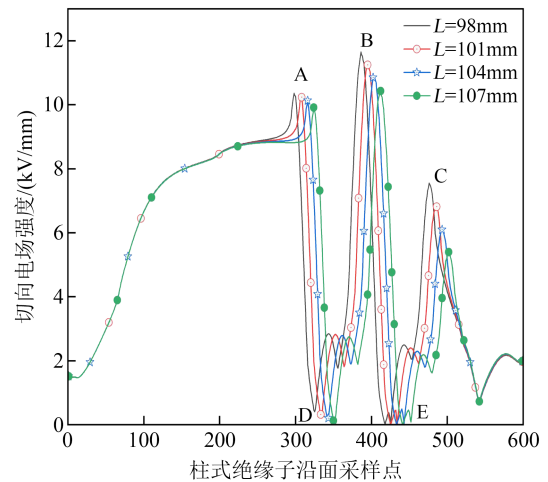


图6 伞裙起始位置对切向电场分布影响

Fig.6 The influence of umbrella skirt starting position on tangential electric field distribution

### 2.2.2 伞裙根部半径

伞裙根部半径 $R_1$ 由5 mm 逐渐增加到8 mm 时，支柱绝缘子切向电场强度变化如图7所示。由图7可知：①随着伞裙根部半径 $R_1$ 增大，最大切向电场强度分别为11.66、10.62、10.68、10.62 kV/mm，呈现先减小再趋于稳定的趋势，最大切向电场强度降幅为8.9%。②A、B、C的切向电场强度变化各不相同，A点随 $R_1$ 增大而增大，当 $R_1 \geq 6$  mm 时趋于稳定；B点随 $R_1$ 增大而减小；C点受 $R_1$ 变化的影响较小。当 $R_1 \geq 6$  mm 时，B点的切向电场强度开始小于A点，即最大切向电场强度的位置随着 $R_1$ 的改变发生转移。③支柱绝缘子D点的切向电场强度随 $R_1$ 的增大基本保持不变；当 $R_1 \geq 6$  mm 时，E点的切向电场强度随 $R_1$ 增大而增大。

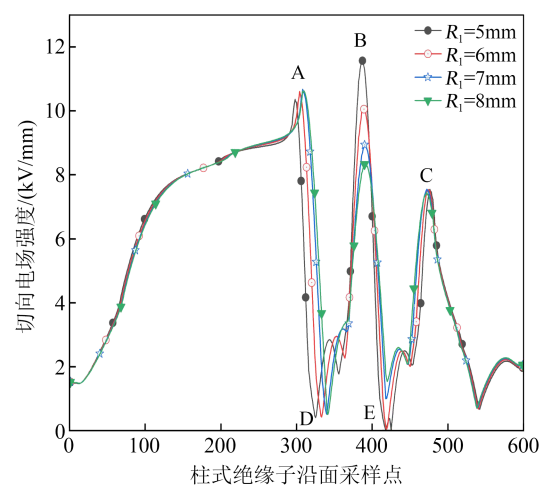


图7 伞裙根部半径对切向电场分布影响

Fig.7 The influence of umbrella skirt root radius on tangential electric field distribution

### 2.2.3 伞裙顶部半径

支柱绝缘子切向电场强度随伞裙顶部半径  $R_2$  由 4 mm 增加至 5 mm 的变化如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着  $R_2$  的增大,伞裙根部的切向电场强度保持不变,伞裙顶部的切向电场强度会增大,使震荡曲线的波谷位置略微抬高。

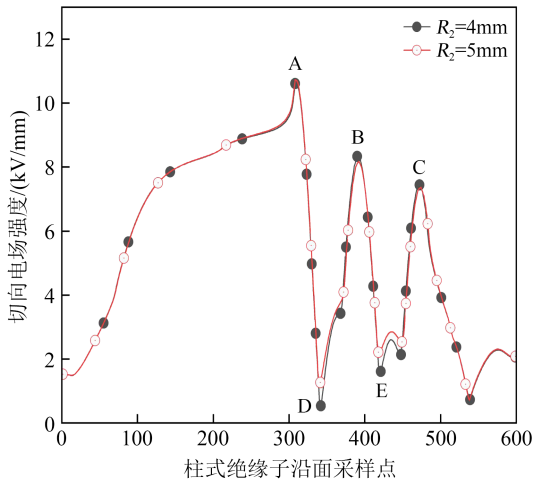
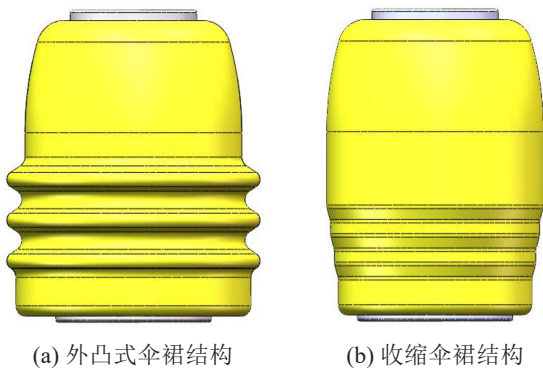


图 8 伞裙根部半径对切向电场分布影响

Fig.8 The influence of umbrella top radius on tangential electric field distribution

### 2.2.4 收缩伞裙结构

工程实际运用中,支柱绝缘子除了起支撑导体的作用外,常作为传动扭杆用于隔离开关本体与操动构件。图 9(a)所示的绝缘子因伞裙处清理困难,存在容易积灰尘、藏异物的隐患。为了消除扭杆传动的运行风险,取消了绝缘子的外凸式伞裙结构设计,在低电位嵌件端采用收缩伞裙的结构,如图 9(b)所示。



(a) 外凸式伞裙结构

(b) 收缩伞裙结构

图 9 不同伞裙形式的绝缘子

Fig.9 Insulators in different umbrella skirt forms

收缩伞裙结构支柱绝缘子的切向电场分布如图 10 所示。由图 10 可知:①最大切向电场强度为 10.07 kV/mm,相比无伞裙结构下的 8.72 kV/mm 增

大 15.4%,但相比原始伞裙结构下的 12.66 kV/mm 下降 20.5%,电场分布改善明显。②切向电场分布保持着含波峰、波谷的震荡形式,与带伞裙结构电场分布不同的是,收缩伞裙起始位置的切向电场强度低于无伞裙结构的切向电场强度,其余波谷切向电场强度均高于无伞裙结构的切向电场强度,该规律与原结构切向电场分布规律完全相反,且震荡幅度大幅降低。③收缩伞裙结构的爬电距离较无伞裙结构没有增加反而减少,降低了 3%,震荡曲线波谷所代表的切向电场距离离零轴较远,电场强度较大,对阻碍绝缘子沿面放电的发展作用小,不利于提高绝缘性能。

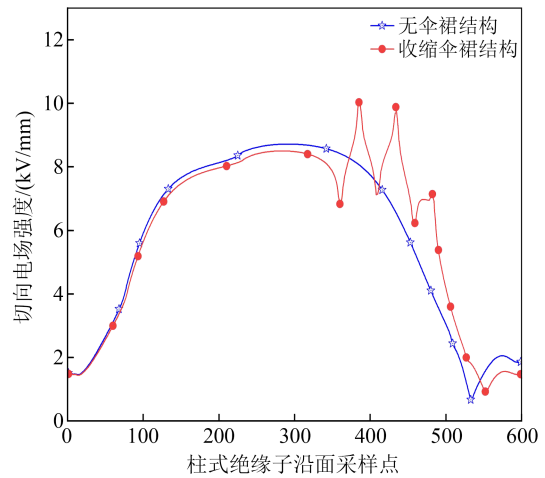


图 10 收缩伞裙结构对切向电场分布影响

Fig.10 The influence of shrink umbrella skirt structure on tangential electric field distribution

### 2.2.5 伞裙结构优化

根据支柱绝缘子不同伞裙数量、起始位置、根部半径、顶部半径以及爬电距离对电场分布的综合影响,最终选择含两个伞裙的支柱绝缘子结构,并优化了伞裙所在的位置,如图 11 所示。

原始伞裙、无伞裙及优化伞裙 3 种支柱绝缘子

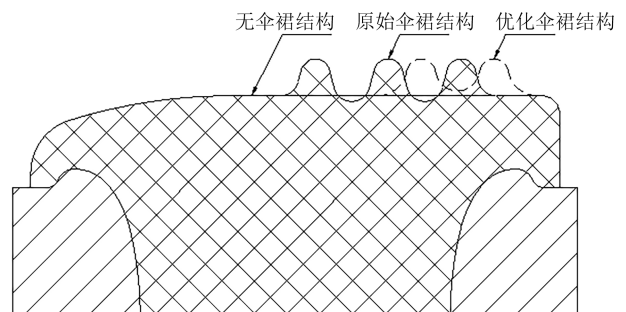


图 11 绝缘子优化后的结构对比

Fig.11 Comparison of optimized insulator structures

结构的切向电场对比如图 12 和表 1 所示。由图 12 和表 1 可知：①优化结构较原结构沿面爬电距离下降了 8.2%，但切向电场强度由 12.66 kV/mm 下降至 9.69 kV/mm，降幅为 23.5%，综合性能提升较多。②以无伞裙结构切向电场曲线为基准，优化结构的切向电场继续保持着向下的大幅值震荡，而向上震荡的幅值较小，即在未明显提高最大切向电场强度的情况下，仍然建立起振幅明显的震荡曲线，阻碍了绝缘子沿面放电发展。③在高、低位嵌件间距离有限制情况下，无伞裙结构最大切向电场强度虽然最小，但因爬电距离小，且无阻碍沿面放电发展的震荡曲线，绝缘性能并无优势。因此，无伞裙结构支柱绝缘子更加适合于空间结构无限制的工况。

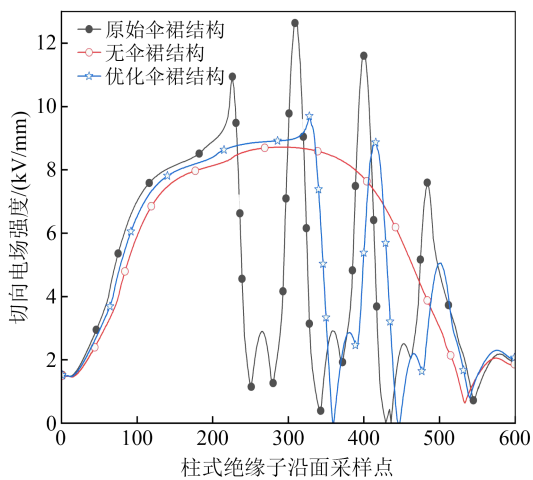


图 12 绝缘子沿面切向电场强度对比

Fig.12 Tangential electric field strength comparison of post insulator

表 1 绝缘子最大切向电场强度对比

Table 1 Comparison of maximum tangential electric field strength

	原始结构	无伞裙结构	优化结构
爬电距离/mm	217.6	180.9	199.8
切向电场/(kV/mm)	12.66	8.72	9.69

### 3 支柱绝缘子雷电冲击试验

将优化后的支柱绝缘子装入设计的试验装置内，对两组共 6 个支柱绝缘子进行雷电冲击试验，绝缘子安装位置与现场工况相同，如图 13 所示。

按 GB 7674—2020 中规定的雷电冲击电压值，优化伞裙结构的支柱绝缘子顺利通过正、负极各 15 次试验考核。在此基础上，按负极性雷电冲击电压值的 5% 逐步提高耐压值，绝缘裕度试验结果如图

14 所示。从图 14 可以看出，当耐压值逐步升高，绝缘子在 1.35 倍绝缘裕度试验中的第 13 次雷电冲击试验时发生了沿面贯穿性放电，试验结束。此外，虽然优化伞裙结构的支柱绝缘子沿面爬电距离下降了 8.2%，但由于切向电场强度下降至 9.69 kV/mm，绝缘裕度高达 1.3 倍以上，说明在支柱绝缘子沿面电场优化过程中，沿面爬电距离与伞裙结构参数对电场的影响有着此消彼长的关系，设计过程中需找到一个平衡点才能得到最优解，确保产品的安全性及经济性。

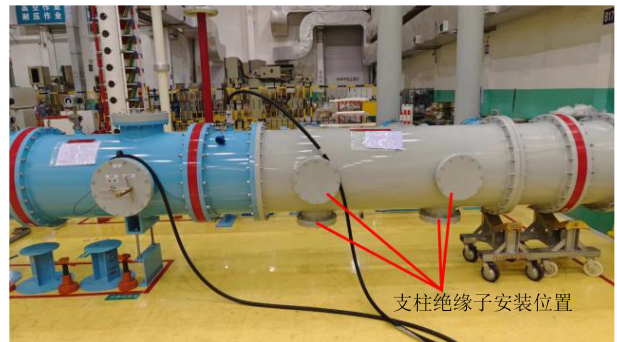


图 13 优化后支柱绝缘子的雷电冲击试验

Fig.13 Lightning impulse test of optimized post insulator

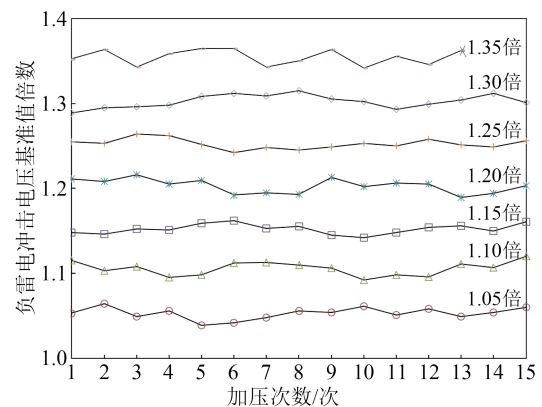


图 14 负极性雷电冲击电压下的绝缘裕度试验

Fig.14 Insulation margin test under negative lightning impulse voltage

### 4 结论

(1)支柱绝缘子增设伞裙后，切向电场强度呈含波峰、波谷的形式震荡，具体为在伞裙根部突增到极大值，顶部突降到极小值，这有利于阻碍绝缘子沿面放电的发展。

(2)最大切向电场强度随伞裙数的增加而增大，随伞裙根部半径变化而发生转移；随伞裙起始位置距高压电极距离增大而减小；伞裙根部距高压

电极越远,切向电场强度减小幅度越大。

(3)收缩伞裙结构的支柱绝缘子,沿面爬电距离没有增加反而减小,切向电场分布虽然保持含波峰、波谷的形式震荡,但除了伞裙起始位置外,波谷部分的切向电场强度大多都高于无伞裙结构,震荡幅度低,不利于绝缘子绝缘性能提高。

(4)改进伞裙结构后的支柱绝缘子切向电场强度由优化前的12.66 kV/mm下降至9.69 kV/mm,降幅为23.5%,且绝缘裕度高达1.3倍以上,满足产品的安全运行需求。

### 参考文献 References

- [1] 王碧霞,田铭兴,冯婷娜,等. GIS盆式绝缘子典型缺陷对其电场分布的影响[J]. 高压电器,2022,58(11):197-204.  
WANG B X, TIAN M X, FENG T N, et al. Influence of typical defects of GIS insulating spacer on its electric field distribution [J]. High Voltage Apparatus,2022,58(11):197-204.
- [2] 谢庆,吕天舒,宋岩泽,等. 交直流切换下环氧树脂表面电场分布特性的仿真研究[J]. 高压电器,2022,58(11):24-30.  
XIE Q, LÜ T S, SONG Y Z, et al. Simulation research on electric field distribution characteristics of epoxy resin surface under AC-DC switching[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(11):24-30.
- [3] 朱传运,刘超峰,王小东,等. 交流GIS用盆式绝缘子三交区绝缘结构设计研究[J]. 绝缘材料,2023,56(7):46-51.  
ZHU C Y, LIU C F, WANG X D, et al. Research on three media interaction areas insulation structure design of basin-type insulator in AC gas insulated switchgear[J]. Insulating Materials,2023,56(7):46-51.
- [4] 韩帅,高飞,廖思卓,等. GIS盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. 绝缘材料,2022,55(2):12-22.  
HAN S, GAO F, LIAO S Z, et al. Review on surface defects and diagnosis methods of basin-type insulator in GIS[J]. Insulating Materials,2022,55(2):12-22.
- [5] 宋松民,刘超峰,朱传运,等. GIS用盆式绝缘子绝缘能力提升研究[J]. 电工电气,2021(9):43-46.  
SONG S M, LIU C F, ZHU C Y, et al. Research on insulation ability improvement of basin type insulator in gas insulated switchgear[J]. Electrical Engineering,2021,(9):43-46.
- [6] 邱志斌,姚文军,李慧慧,等. 高压隔离开关支柱瓷绝缘子机械特性研究[J]. 绝缘材料,2013(5):37-42.  
QIU Z B, YAO W J, LI H H, et al. Mechanical properties study of porcelain post insulator for high voltage disconnecter[J]. Insulating Materials,2013,(5):37-42.
- [7] 王克胜,赵彦平,原帅,等. 基于电场计算及模态分析的220 kV GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(8):32-38.  
WANG K S, ZHAO Y P, YUAN S, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(8):32-38.
- [8] 李永飞,姜映焯,郝留成,等. 1100 kV GIS盆式绝缘子气泡缺陷下的有限元应力分析[J]. 绝缘材料,2020,53(7):57-61.  
LI Y F, JIANG Y Y, HAO L C, et al. Finite element stress analysis on 1100 kV GIS basin insulators with bubble defects[J]. Insulating Materials,2020,53(7):57-61.
- [9] 鲁少阳,王爽,刘展程,等. 一种新型结构的盆式绝缘子力学性能研究[J]. 绝缘材料,2022,55(12):104-110.  
LU S Y, WANG S, LIU Z C, et al. Research on mechanical properties of basin insulator with new structure[J]. Insulating Materials,2022,55(12):104-110.
- [10] 唐念,姜旭,黎晓旋,等. 均匀电场中SF<sub>6</sub>及其替代气体雷电冲击特性实验研究[J]. 高压电器,2021,57(3):6-10.  
TANG N, JIANG X, LI X D, et al. Experimental study on the lightning impulse characteristics of SF<sub>6</sub> and its gases alternatives in uniform fields[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(3):6-10.
- [11] 李俊锋,谭盛武,江经华,等. 基于摩擦接触和密封圈接触压力的252 kV小型化GIS用盆式绝缘子应力分析[J]. 绝缘材料,2021,54(9):103-109.  
LI J F, TAN S W, JIANG J H, et al. Stress analysis on basin insulator for miniaturized 252 kV GIS based on friction contact and sealing ring contact pressure[J]. Insulating Materials,2021,54(9):103-109.
- [12] 蔺占芳,王柯. 直流电场下盆式绝缘子体积电导率对其表面电荷积聚特性的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(3):54-59.  
LIN Z F, WANG K. Effect of volume conductivity of basin type insulator on its surface charge accumulation under DC electric field[J]. Insulating Materials,2021,54(3):54-59.
- [13] 王永强,胡芳芳,谢军,等. GIS盆式绝缘子气隙缺陷下电场变化规律仿真研究[J]. 绝缘材料,2016,49(1):40-45.  
WANG Y Q, HU F F, XIE J, et al. Simulation study on electric field change rule of GIS disc insulator with air gap defects[J]. Insulating Materials,2016,49(1):40-45.
- [14] 方春华,丰盛,周雨秋. 复合绝缘子内部缺陷对电场分布特性的影响[J]. 绝缘材料,2019,52(4):37-44.  
FANG C H, FENG S, ZHOU Y Q. Influence of composite insulator internal defects on electric field distribution[J]. Insulating Materials,2019,52(4):37-44.
- [15] 何柏娜,孔杰,姜仁卓,等. 盆式绝缘子金属丝缺陷下电场分布仿真研究[J]. 绝缘材料,2021,54(1):39-44.  
HE B N, KONG J, JIANG R Z, et al. Simulation research on electric field distribution of basin insulators with metal wire defect[J]. Insulating Materials,2021,54(1):39-44.
- [16] 沙伟燕,罗艳,马鹏欢,等. 不同金属微粒缺陷下GIS盆式绝缘子表面放电与电场特性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(9):89-93.  
SHA W Y, LUO Y, MA P H, et al. Study on surface discharge and electric field characteristics of GIS basin insulator with different metal particle defects[J]. Insulating Materials,2023,56(9):89-93.
- [17] 庄丞,袁传镇,曾建斌. 表面应力分布对252 kV GIS盆式绝缘子力学性能影响的研究[J]. 电瓷避雷器,2020(2):183-188.  
ZHUANG C, YUAN C Z, ZENG J B. Study on influence of surface stress distribution on mechanical properties of 252 kV GIS

- basin insulators[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(2): 183-188.
- [18] 何伟明,郝艳捧,邹舟诣奥,等. GIS 盆式绝缘子应力超声检测技术应用与展望[J]. *广东电力*, 2021,34(1):13-20.  
HE W M, HAO Y P, ZOU Z Y A, et al. Application and prospect of ultrasonic testing technology for stress in GIS basin insulators [J]. *Guangdong Electric Power*, 2021,34(1):13-20.
- [19] 徐洋,杨宁,刘卫东,等. GIS 绝缘子表面金属丝闪络前的局部放电特性[J]. *电瓷避雷器*, 2020(4):202-206.  
XU Y, YANG N, LIU W D, et al. The characteristics of the partial discharge induced by the metal wire on the surface of GIS insulator before flashover[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(4):202-214.
- [20] 张施令,彭宗仁,王浩然,等. 盆式绝缘子多物理场耦合数值计算及结构优化[J]. *高电压技术*, 2020,46(11):3994-4005.  
ZHANG S L, PENG Z R, WANG H R, et al. Numerical calculation and structural optimization of multi-physical field coupling for basin insulator[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 3994-4005.
- [21] XUE J Y, ZHANG Z, DING L J, et al. Surface charge behavior and flashover performance on epoxybased spacers by graded conductivity coatings subjected to DC voltages[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021,54(48):485502.
- [22] DONG J H, CHEN J H, LI J S, et al. A novel surface charge accumulation behavior on downsized spacers in  $C_4F_7N/CO_2$  mixture [C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Chongqing, China:IEEE, 2021:21078443.
- [23] 张梧桐,吴泽华,徐家忠,等. 特高压 GIS 用单支撑绝缘子绝缘结构优化设计[J]. *电工技术学报*, 2023,38(1):258-269.  
ZHANG W T, WU Z H, XU J Z, et al. Optimization design of insulation structure for post insulator in UHV AC GIS[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023,38(1):258-269.
- [24] 贾云飞,高璐,汲胜昌,等. 基于有限元仿真和遗传算法的 1100 kV 盆式绝缘子电气、力学性能综合优化[J]. *高电压技术*, 2019,45(12):3844-3853.  
JIA Y F, GAO L, JI S C, et al. Comprehensive optimization of electrical and mechanical performance of 1100 kV basin-type insulator based on genetic algorithm and finite element simulation [J]. *High Voltage Engineering*, 2019,45(12):3844-3853.
- [25] 姚永其,王之军,陈圣,等. 550 kV GIL 盆式绝缘子及其组件结构优化设计[J]. *高压电器*, 2021,57(5):50-57.  
YAO Y Q, WANG Z J, CHEN S, et al. Optimization design on insulating spacer and its assembly structure of 550 kV GIL[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021,57(5):50-57.
- [26] 梁虎成,杜伯学,陈允,等. 基于迭代算法的功能梯度绝缘子介电常数分布优化[J]. *电工技术学报*, 2020,35(17):3758-3764.  
LIANG H C, DU B X, CHEN Y, et al. Permittivity distribution optimization of functionally graded insulator based on iterative method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(17):3758-3764.
- [27] 陈蔚,黎卫国,欣振宇,等. GIL 三支柱绝缘子电场仿真与表面电荷测量[J]. *高压电器*, 2021,57(11):42-50.  
CHEN W, LI W G, XIN Z Y, et al. Electric field simulation and surface charge measurement of GIL three - pillar insulators[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021,57(11):42-50.
- [28] 杨为,朱太云,田宇,等. 直流电压下盆式绝缘子电荷积聚与电场过渡特性[J]. *高电压技术*, 2020,46(6):1978-1985.  
YANG W, ZHU T Y, TIAN Y, et al. Charge accumulation and electric field transition characteristics of basin insulators under DC voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2020,46(6):1978-1985.
- [29] 闫丽梅,刘永强,徐建军,等. 基于 Grabcut 分割和填充物面积判别的复合绝缘子断串诊断[J]. *电力系统保护与控制*, 2021,49(22):114-119.  
YAN L M, LIU Y Q, XU J J, et al. Broken string diagnosis of composite insulator based on Grabcut segmentation and filler area discrimination[J]. *Power System Protection and Control*, 2021,49(22):114-119.
- [30] 李大雨,张贵新,王天宇. 交流电压下圆台型绝缘子表面电荷积聚特性[J]. *高电压技术*, 2022,48(4):1480-1488.  
LI D Y, ZHANG G X, WANG T Y. Surface charge accumulation characteristics of circular frustum insulators under AC voltage [J]. *High Voltage Engineering*, 2022,48(4):1480-1488.
- [31] 李文栋,刘哲,有晓宇,等. 叠层式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化[J]. *西安交通大学学报*, 2016,50(10):19-26.  
LI W D, LIU Z, YOU X Y, et al. Permittivity distribution optimization for multi-layer dielectric FGM insulator[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016,50(10):19-26.
- [32] 王超,李文栋,杨雄,等. 基于几何形状/介电分布综合优化的 GIS/GIL 盆式绝缘子电场分布特性调控[J]. *中国电机工程学报*, 2020,40(22):7166-7174.  
WANG C, LI W D, YANG X, et al. A comprehensive strategy for electric field regulation of GIS/GIL spacer by using structure and dielectric distribution optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020,40(22):7166-7174.
- [33] 黎斌. SF<sub>6</sub> 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2019.  
LI B. SF<sub>6</sub> high voltage electrical appliance design[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.

收稿日期:2023-09-13;修回日期:2023-11-10。

作者简介:

刘超峰(1984-),男(汉族),河南商丘人,高级工程师,主要从事高压 GIS 及 HGIS 产品研发的研究;

朱传运(1985-),男(汉族),重庆人,高级工程师,主要从事 GIS 及 HGIS 产品研发的研究。