

# 复合绝缘子界面缺陷对电场分布特性影响的仿真研究

江渺<sup>1</sup>, 李黎<sup>1</sup>, 华奎<sup>1</sup>, 卢明<sup>2</sup>, 王燕<sup>1</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:**复合绝缘子的芯棒与护套粘接界面常常出现缺陷, 畸变周围电场, 影响绝缘子的电气和机械性能。为了研究不同缺陷形态下的绝缘子电场特性, 文中以 110 kV 复合绝缘子为考察对象, 应用有限元分析软件 COMSOL 搭建了绝缘子三维模型, 对电场分布进行了仿真计算, 研究了界面出现气隙、水汽等缺陷对局部电场及绝缘子整体轴向电场分布特性的影响。结果表明: 气隙处电场强度相比正常情况下显著增大, 场强最大值与气隙跨度、厚度正相关, 与气隙长度负相关, 并基于气隙等效弧柱体模型给出了理论分析, 修正了等效圆柱模型的不足; 水分渗入能降低气隙场强, 但同时严重畸变绝缘子轴向电场; 护套受潮增重会使场强线性增加, 超过一定程度会引发电晕放电, 导致沿面闪络等事故。

**关键词:**复合绝缘子; 界面缺陷; 有限元分析; 电场分布  
**中图分类号:** TM216      **文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)04-0138-07

## 0 引言

复合绝缘子以其优越的耐污性能被广泛应用于电网中, 大大减少了输电线路的污闪事故<sup>[1-2]</sup>。然而, 复合绝缘子在长期使用中也暴露出一系列新的问题<sup>[3-4]</sup>。由于界面缺陷引发的护套穿孔、界面击穿等故障占到复合绝缘子全部故障类型的 40%~50%, 且往往会造成芯棒断裂、掉串等严重事故<sup>[5-8]</sup>, 因此, 对于复合绝缘子界面缺陷及其可能带来的危害有必要予以足够重视。

复合绝缘子界面缺陷主要是指, 当芯棒和护套粘接不紧密时, 胶接界面将会存在微小间隙, 对绝缘子的电场特性造成一定影响。大量分析表明, 大部分界面问题均是由界面存在的微小气隙及外界环境的水分渗入引起的<sup>[9-13]</sup>。文献[14]以 220 kV 复合绝缘子为对象, 研究在气隙存在和水分渗入条件下局部电场畸变情况并分析了击穿可能性; 文献[15]选取电动车组车顶复合绝缘子为对象, 研究间隙场强数值与内部液体电导率的关系; 文献[16]建立了 500 kV 交流复合绝缘子的三维全模型, 通过 ANSYS 仿真研究在空气间隙存在时沿串电场的畸变大小。上述研究主要分析了在界面缺陷存在时的电场畸变情况, 但对诸如气隙和水汽状态参数改变时电场的具体情况鲜有涉及。此外, 对界面缺陷畸变电场的理论研究较少, 文献[17]提出气隙的圆

柱体等效电容模型来分析电场变化, 但圆柱体并不能很好地反映实际运行绝缘子中气隙的普遍形态, 存在一定的局限性, 有待进一步修正和改进。

为深入探究不同界面缺陷状态下绝缘子的电场分布情况, 基于 110 kV 复合绝缘子三维模型, 针对气隙和水汽 2 种影响因素进行研究, 分析了界面缺陷对局部电场和整体电场分布特性的影响。文中的结果可以为理解界面故障的发展过程, 实施有效的故障预防手段提供参考。

## 1 计算模型

### 1.1 模型设置

选取研究对象为棒型悬式复合绝缘子, 型号 FXBW4-110/120。绝缘子共计 27 片伞裙, 其中大伞 14 片, 小伞 13 片。表 1 列出了该型号复合绝缘子详细的结构参数。

表 1 复合绝缘子结构参数

Table 1 Structural parameters of composite insulator

结构参数	数值
额定电压/kV	110
额定机械负荷/kN	120
结构高度/mm	1 440±15
绝缘距离/mm	1 200
最小公称爬电距离/mm	3 600
伞裙直径/mm	148/118
护套厚度/mm	5

文中重点研究复合绝缘子护套芯棒内部界面电场分布情况, 以及在不同内部缺陷条件下的变化

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-25

基金项目: 中原科技创新领军人才资助项目(194200510-024)

趋势,为简化分析,建模时忽略了杆塔、导线及金具结构等外部因素的影响<sup>[9,18]</sup>。复合绝缘子的电场由其支撑导线中的电流建立,在电网中,此电流为 50 Hz 低频交流,波长对电场瞬变的影响可以忽略不计。因此在仿真时,可以按静电场问题进行分析。绝缘子周围电场为无界域,需要转化为有限域才能利用软件求解,为此,可以在距离绝缘子较远的位置设置零电位人工边界。经过设计和比较,当取边长为 10 m 的正方体域作为边界时,计算得出的绝缘子电场分布受场域边界变化的影响可以忽略。

文中借助 COMSOL 有限元分析软件,根据实际尺寸搭建了 110 kV 复合绝缘子 1:1 计算模型,并在距离绝缘子中心 10 m×10 m×10 m 位置处设置人工边界,内部填充空气,建立了含绝缘子的空间有限域电场分布计算模型,如图 1 和图 2 所示。

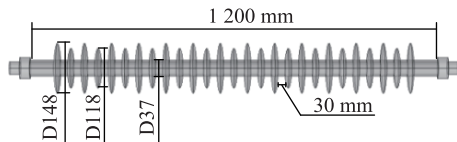


图 1 复合绝缘子计算模型

Fig.1 Calculation model of composite insulator

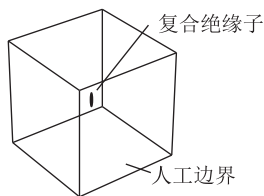


图 2 有限域电场分布计算模型

Fig.2 Sketch of a model calculating electric field distribution in finite domain

## 1.2 参数设置

电场分布计算模型中各介质的电气参数如表 2 所示。表中金具的介电常数无穷大,为便于计算取其值为  $1 \times 10^{10}$ 。边界条件的设置,对于 110 kV 交流绝缘子而言,即在绝缘子一端施加最高幅值相电位  $110 \times 1.1 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 99$  kV,以模拟实际运行中最严重的情况,另一端接地<sup>[12]</sup>。为兼顾精确度和计算量,在模型网格剖分环节,对绝缘子模型采用超细化剖分,而外部域采用常规尺寸剖分。

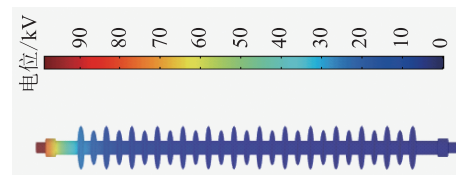
表 2 计算模型中介质基本参数

Table 2 Basic parameters of the medium in the calculation model

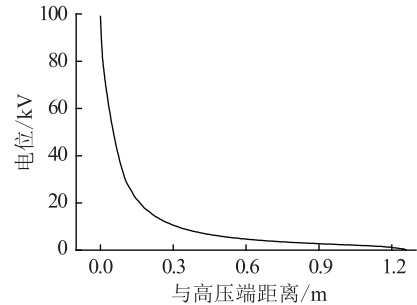
材料	空气	护套	伞裙	芯棒	金具
$\epsilon_r$	1.0	6.0	6.0	8.0	1.0E10
$\rho / (\Omega \cdot m)$	1E50	1E13	1E13	6E12	1.7E-8

## 2 完好绝缘子电场分布

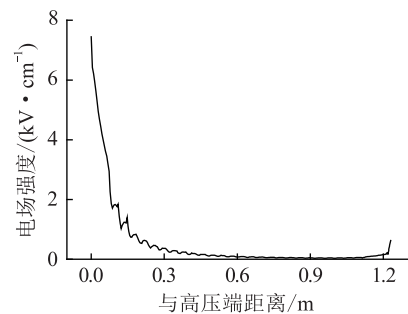
图 3 为正常状态下完好的复合绝缘子沿芯棒和护套界面轴向电位及场强分布的仿真结果。从电位分布图可以看出,绝缘子整体电场分布极不均匀,高压端附近有明显的电压降落,尤其在金具、芯棒前端和第一、二片伞裙处承担了绝大部分电压,而中低压端部电位变化趋势平缓。电场强度分布特性与电位类似,呈一条不对称“U”型曲线,在低压端金具附近场强有略微回升。高压端最大场强值可达 7.46 kV/cm,而中部及低压端场强最大值约为 0.85 kV/cm,仅有高压端的 11.4%。因此,同等情况下高压端界面缺陷将比低压端的缺陷带来更严重的危害,需要着重研究。文中将界面缺陷位置设于距离芯棒高场强一侧 0.1 m 处,即绝缘子第一片大伞裙与第一片小伞裙之间。



(a) 电位分布云图



(b) 电位分布



(c) 电场强度分布

图 3 正常复合绝缘子界面轴向电位及场强分布

Fig.3 Axial electric field distribution along the interface between rod and sheath of composite insulator in normal condition

图 4 为正常状态下距离复合绝缘子高压端 0.1 m 处的径向截面电场分布图。可以看出,截面电场分布相对平均,护套场强略高于芯棒,但梯度不大。

该截面场强最大值位于芯棒与护套粘接界面,其值为  $1.912 \text{ kV/cm}$ 。

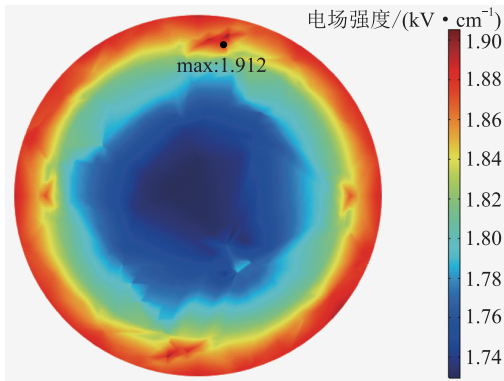


图4 距高压端部0.1 m处复合绝缘子截面电场分布  
Fig.4 Electric field distribution of cross section at 0.1 m from high-voltage side

下面分别研究在芯棒和护套界面存在气隙和水分且相应的参数发生改变时,故障处内部场强的变化规律以及对绝缘子整体电场分布的影响程度大小。

### 3 气隙影响因素分析

为了研究气隙对芯棒和护套分界面附近电场畸变的具体影响,首先需要对气隙的几何特征进行假设。根据实际运行复合绝缘子中气隙表现出的形状特征,可以用一个沿着界面轴向伸展的弧状柱体等效,并用气隙跨度、厚度和长度3个参数界定该弧柱体气隙的尺寸,如图5所示。

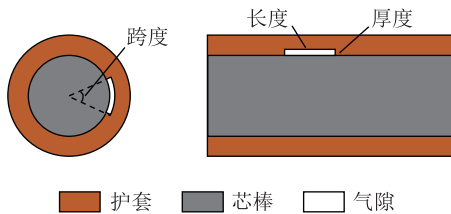


图5 气隙计算模型

Fig.5 Calculation model of the internal air gap

接下来,采用控制变量法,分别研究单个参数变化时伴随的场强畸变情况。

#### 3.1 气隙跨度影响

首先在仿真模型中固定气隙长度为  $1 \text{ mm}$ ,厚度为  $0.2 \text{ mm}$ ,将气隙跨度从  $1^\circ \sim 90^\circ$  变化,每  $15^\circ$  进行一次数据采集,得到气隙场强最大值随气隙跨度的变化情况如图6所示。

由图6可知,在  $1^\circ \sim 45^\circ$  范围内,气隙场强最大值随气隙跨度的增大而上升。当气隙跨度达到  $45^\circ$  时,内部场强最大值约为  $3.8 \text{ kV/cm}$ ,相比完好状况下场强最大值约提高了2倍。气隙跨度自  $1^\circ$  扩张

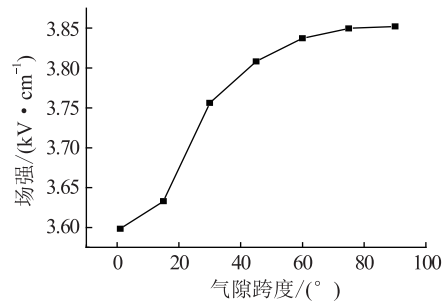


图6 不同气隙跨度情况下内部场强变化情况

Fig.6 The maximum value of electric field at different internal air gap span

到  $45^\circ$  时,场强最大值增加了  $5.8\%$ 。当气隙跨度在  $45^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化时,场强增大速率明显降低,考虑实际运行中的复合绝缘子出现气隙的跨度通常不大,超过  $45^\circ$  的可能性已可以忽略,故该分析足够满足绝大部分工程实际的需要。

#### 3.2 气隙厚度影响

在仿真模型中固定气隙跨度  $15^\circ$ ,长度  $1 \text{ mm}$ ,将气隙的厚度从  $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$  改变,每  $0.02 \text{ mm}$  进行一次数据采集,气隙场强最大值随气隙厚度的变化情况如图7所示。

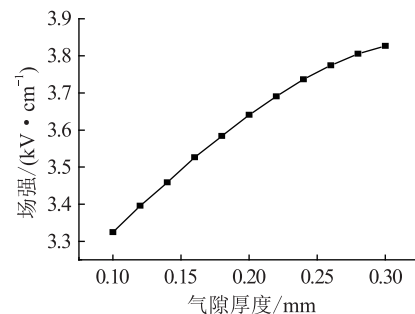


图7 不同气隙厚度情况下内部场强变化情况

Fig.7 The maximum value of electric field at different internal air gap thickness

由图7可知,在  $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$  范围内,气隙场强最大值随着气隙厚度增加逐渐上升。考虑到护套厚度只有  $5 \text{ mm}$ ,实际中气隙厚度超过  $0.3 \text{ mm}$  的可能性已可以忽略。气隙厚度从  $0.1 \text{ mm}$  增厚至  $0.3 \text{ mm}$  时,场强最大值增加了  $12.0\%$ ,影响较为显著。此外,随着厚度的增加,场强的增大速率呈减缓趋势。

#### 3.3 气隙长度影响

最后在仿真模型中固定气隙跨度  $15^\circ$ ,厚度  $0.2 \text{ mm}$ ,将气隙长度从  $0.5 \sim 3 \text{ mm}$  变化,每  $0.5 \text{ mm}$  进行一次数据采集,气隙场强最大值随气隙长度的变化情况如图8所示。

由图8可知,在  $0.5 \sim 3 \text{ mm}$  范围内,气隙场强最大值随着气隙长度增加逐渐下降,且衰减速率也随



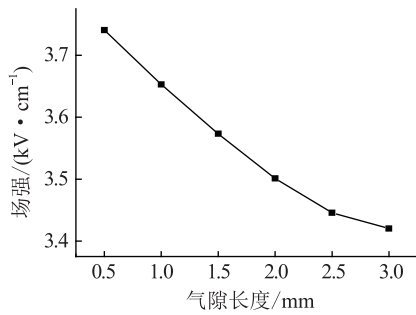


图8 不同气隙长度情况下内部场强变化情况

Fig.8 The maximum value of electric field at different internal air gap length

之减弱。仿真结果证明了,当气隙长度足够长时,场强会随长度增加重新上升,当长度超过 2 mm 时,场强的减缓速率有降低趋势。

### 3.4 结果分析

在保持气隙的厚度和长度不变,改变跨度的情况下,内部场强随着跨度的增加有增大的趋势,但在跨度越来越大的情况下,场强增大的速率逐渐减慢趋于平稳。分析是因为内部气隙的介电常数相对于完好绝缘子的硅橡胶来说显著降低,将电位移矢量  $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$  代入高斯定理公式:

$$\oint D dS = q \quad (1)$$

可以得到:

$$\oint \varepsilon_0 \varepsilon_r E dS = q \quad (2)$$

在气隙产生前后整个界面仍然呈现电中性,所以界面总电荷量  $q$  值不变,因此在相对介电常数  $\varepsilon_r$  变小的情况下,  $E$  值必然随之增大,同时跨度的增加导致的相对介电常数  $\varepsilon_r$  会逐渐趋于稳定,反映在  $E$  值的变化上也是增大速率变缓。

在保持气隙的跨度和长度不变,改变厚度的情况下,内部场强随着厚度的增加逐渐增大,且场强增大的速率逐渐减慢。记  $l$  为气隙的长度,  $r$  为芯棒的半径,  $\Delta r$  为气隙厚度,  $\theta$  为气隙跨度对应圆心角。考虑当  $\theta = 2\pi$  时,气隙即为一个同轴圆柱形电容器,由电磁场理论知其电容值为:

$$C = 2\pi\varepsilon_0 l / \ln(1 + \Delta r/r) \quad (3)$$

仿此可以推出,当气隙跨度为任意  $\theta$  时,弧柱体气隙等效电容值的表达式为:

$$C = \varepsilon_0 \theta l / \ln(1 + \Delta r/r) \quad (4)$$

随着气隙厚度  $\Delta r$  的增加,气隙电容值逐渐减小,故气隙两端电压增大,根据:

$$E = U/d \quad (5)$$

可以得出场强  $E$  增大。

同理,在保持气隙的跨度和厚度不变,改变长

度的情况下,内部场强随着长度的增加逐渐减小,且场强增大的速率逐渐减慢。由式(4)知,这是由于气隙电容值随着  $l$  的增加而变大,气隙两端电压降低,导致场强  $E$  减小。

## 4 水分影响因素分析

### 4.1 水汽渗入

潮湿环境通常会对复合绝缘子的工作状态带来很大影响。一方面,水膜积聚在伞裙表面可能导致污闪;另一方面,水汽也会逐渐渗入硅橡胶材料到达粘合界面,使气隙内部充水<sup>[19-20]</sup>。文中侧重研究复合绝缘子界面气隙被水汽渗入对气隙内部电场分布特性的影响。水汽对电场的畸变作用主要体现在介电常数的变化,考虑到气隙尺寸很小,分析时可认为水分完全充满气隙内部。故仿真模型中,通过将气隙处材料相对介电常数从 1 改为纯水的相对介电常数 81,模拟水汽完全渗入气隙带来的影响。表 3 和图 9 为固定气隙长度 1 mm,跨度 15° 时,气隙场强最大值在水汽渗入前后的变化情况。

表3 水汽渗入气隙前后内部场强最大值对比

Table 3 Comparison of the maximum value of internal electric field before and after water permeating gap

厚度/mm	场强/(kV·cm <sup>-1</sup> )	
	空气	水汽
0.05	3.35	1.67
0.10	3.42	1.60
0.15	3.54	1.54
0.20	3.65	1.45
0.25	3.95	1.35
0.30	4.29	1.33

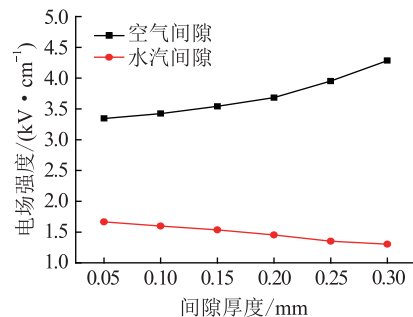


图9 水汽渗入气隙前后内部场强最大值对比

Fig.9 Comparison of the maximum value of internal electric field before and after water permeating gap

由图 9 可知,当气隙处被水汽渗入时,内部场强最大值有明显减小,甚至小于绝缘子正常状况下在同一界面位置处的场强值,并且随着间隙厚度的增加,场强最大值还会继续降低。简单分析其原因,水的相对介电常数为 81,远大于空气和护套的相对

介电常数。由组合绝缘的介电常数反比场强规律知,场强值将会大大减小。

另一方面,水汽渗入气隙则进一步畸变了原有电场,水汽渗入气隙前后绝缘子轴向电场分布对比如图 10 所示。图 10(a)表明在缺陷处的气隙将场强从 1.8 kV/cm 畸变至 2.6 kV/cm,而图 10(b)表明水汽渗入进一步畸变电场至 3.8 kV/cm,大大高于周围平均场强值,在该处极易引发局部放电。长期局部放电可能引起一系列理化反应,例如高分子材料的裂解和热降解,形成局部碳化层等,对芯棒造成腐蚀,最终造成芯棒断裂。

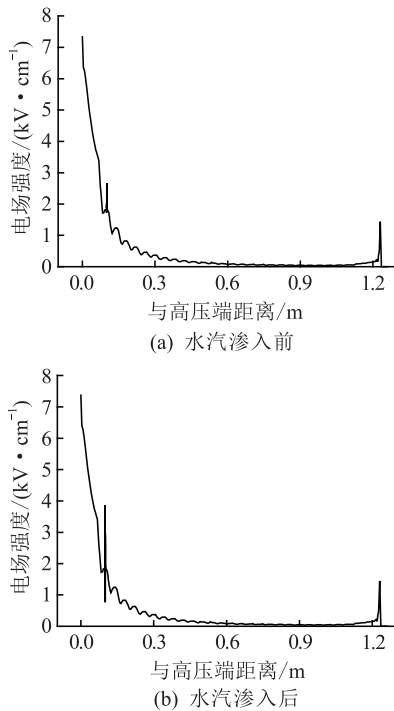


图 10 水汽渗入前后复合绝缘子界面轴向电场分布对比

Fig.10 Comparison of axial electric field along the interface before and after water permeating gap

图 11 为水汽渗入气隙后绝缘子整体电场沿护套内外表面分布对比图。可以看出,由于水汽畸变电场的影响,在气隙径向截面处,护套内表面电场远高于外表面电场值。护套内外表面电场的梯度差可能导致硅橡胶材料内部的放电,形成贯穿护套的破损孔,使芯棒直接暴露于外部环境中,极大加速老化进程,减少绝缘子使用寿命。

#### 4.2 护套受潮

硅橡胶材料在潮湿状态下会吸水使得相对介电常数增大,当受潮增重 0.17% 时,相对介电常数增大 1<sup>[21]</sup>。通过改变硅橡胶材料介电常数模拟护套受潮情况,研究了护套在不同受潮程度下对复合绝缘子高压端气隙处电场特性的影响。图 12 为固定气隙跨度 15°, 厚度 0.3 mm, 长度 1 mm 时气隙场强

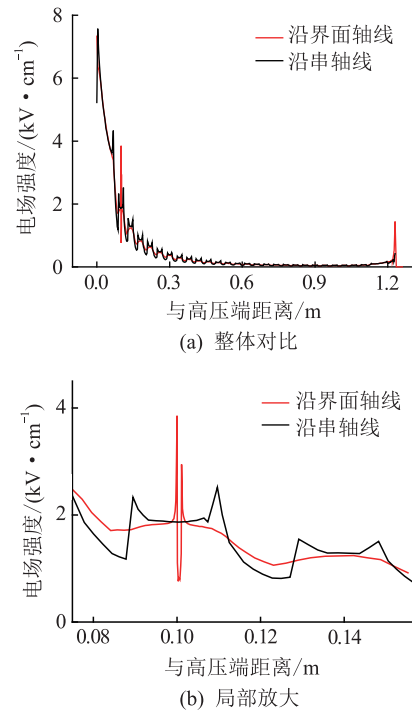


图 11 复合绝缘子护套内外表面轴向电场分布对比

Fig.11 Comparison of axial electric field distribution along the internal and external surface of the sheath

最大值随护套受潮增重的变化情况。

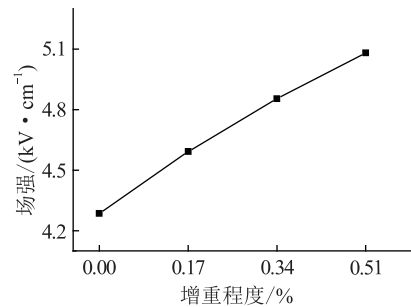


图 12 护套在不同受潮情况下内部气隙场强最大值

Fig.12 The maximum value of electric field at different damping conditions of the sheath

由图 12 可知,随着护套潮湿度的增加,内部气隙场强基本呈线性上升。护套从干燥状态到受潮增重 0.51%,场强最大值增加了 18.6%,影响非常明显。并且当护套增重超过 0.1% 后,场强最大值已超过绝缘子表面电晕起始场强临界值 4.5 kV/cm,即有可能引起电晕放电<sup>[22]</sup>。虽然复合绝缘子伞裙良好的憎水性使得在正常降雨量环境下不会出现护套严重吸水情况,但在暴雨、暴雪天气或极端环境下,仍有可能使护套长期受潮引起电晕放电,加速老化、吸污等,造成沿面闪络等事故。因此,对于复合绝缘子来说,在投入运行之前,须考量当地空气湿度和恶劣天气环境等情况,同时尽力改善电场分布,才能避免因受潮引起的一系列事故发生。

## 5 结论

文中基于有限元分析方法,利用 COMSOL 建立了 110 kV 复合绝缘子电场仿真模型,对内部气隙、水汽和受潮等缺陷因素进行了分析,得出如下结论:

(1) 复合绝缘子轴向电场分布极不均匀,高压端附近承担了绝大部分电压降,中部和低压端电场相对较低。靠近高压端芯棒和护套的界面缺陷对电场的畸变作用更明显,危害更严重。

(2) 当界面出现气隙时,局部电场会明显增强。内部气隙场强最大值与气隙跨度和厚度呈正相关,与气隙长度呈负相关。随着气隙跨度、厚度和长度的增加,3 个因素对场强的影响作用均会逐渐减弱。并基于气隙的等效弧柱体电容模型,利用电磁场理论对仿真结果进行分析,得到了一致的结论。

(3) 水汽渗入气隙会使气隙内部场强显著下降,但同时进一步畸变了高压端局部电场,可能引发气隙处局部放电;护套内外表面存在较大的电场梯度,可能导致护套击穿,降低绝缘强度。

(4) 护套受潮对场强影响较大,场强基本随护套受潮增重程度线性增加。当受潮严重时,可能导致护套外表面产生电晕放电,引起沿面闪络等事故。

### 参考文献:

- [1] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006(12):1-7.  
LIU Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2006(12): 1-7.
- [2] 张文亮, 吴维宁, 胡毅, 等. 特高压输变电用绝缘子技术和经济可靠性分析[J]. 高电压技术, 2004(3):22-25.  
ZHANG Wenliang, WU Weining, HU Yi, et al. Reliability analysis of insulators technology and economy for UHV transmission and distribution equipment[J]. High Voltage Engineering, 2004(3):22-25.
- [3] 郭浩. 我国复合绝缘子的应用及运行中的若干问题[J]. 电力设备, 2006(4):43-45.  
GUO Hao. Application of composite insulators and running a number of issues[J]. Electrical Equipment, 2006(4):43-45.
- [4] 吴光亚. 我国绝缘子的发展现状及应考虑的问题[J]. 电瓷避雷器, 2010(2):7-11.  
WU Guangya. Development status and problems of our insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2):7-11.
- [5] LIANG X, WANG S, JU F, et al. Development of composite insulators in China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1999, 6(5):586-594.
- [6] SCHMUCK F, SEIFERT J, GUTMAN I, PIGINI A. Assessment of the condition of overhead line composite insulators [C]. CIGRE Session 2012, Paris, Paper D2-214.
- [7] 卢明, 胡文, 李黎, 等. 交流 500 kV 复合绝缘子芯棒断裂原因

分析[J]. 电瓷避雷器, 2015(3):23-34.

LU Ming, HU Wen, LI Li, et al. Analysis on causes of the core rod fracture of 500 kV AC composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3):23-34.

- [8] 冉学彬, 鲁兹, 成立, 等. 500 kV 复合绝缘子脆断事故研究与劣化机理分析[J]. 高压电器, 2013, 49(9):35-43.  
RAN Xuebin, LU Ci, CHENG Li, et al. Fracture fault analysis and aging mechanism study for 500 kV composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9):35-43.
- [9] 张盈利, 汪泓, 李猛, 等. 复合绝缘子沿面电场影响因素分析[J]. 高压电器, 2014, 50(10):31-36.  
ZHANG Yingli, WANG Feng, LI Meng, et al. Analysis on influencing factors of surface electrical field of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10):31-36.
- [10] 谢从珍, 刘珊, 刘芹, 等. 交流 500 kV 复合绝缘子内部缺陷对轴向电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4):922-928.  
XIE Congzhen, LIU Shan, LIU Qin, et al. Internal defects influence of 500 kV AC composite insulator on the electric field distribution along the axis [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4):922-928.
- [11] 滕国利, 郭元吉. 复合绝缘子界面特性[J]. 电网技术, 2005, 29(14):85-86.  
TENG Guoli, GUO Yuanji. Section properties of composite insulators[J]. Power System Technology, 2005, 29(14):85-86.
- [12] ANDERSSON J, STANISLAW M, GUBANSKI, et al. Properties of interfaces between silicone rubber and epoxy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5):1360-1367.
- [13] TU Y, ZHANG H, XU Z, et al. Influences of electric-field distribution along the string on the aging of composite insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1865-1871.
- [14] 刘晓伟, 张雪峰, 刘春翔, 等. 棒形复合绝缘子内部缺陷对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2014(2):16-20.  
LIU Xiaowei, ZHANG Xuefeng, LIU Chunxiang, et al. Influence of internal defects in rod suspension composite insulator on electric field distribution [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(2):16-20.
- [15] 吴广宁, 杨坤松, 高国强, 等. 电动车组车顶复合绝缘子内部间隙电场分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(10):3252-3259.  
WU Guangning, YANG Kunsong, GAO Guoqiang, et al. Analysis of the electric field through internal gap of electric multiple unit roof composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3252-3259.
- [16] 刘芹. 复合绝缘子内部缺陷、污秽条件下电场仿真研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2012:20-27.  
LIU Qin. Electric field simulation study of composite insulators with internal defects and under pollution conditions respectively [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012:20-27.

- [17] 胡建林,李洋洋,杨威,等. 交流 110 kV 复合绝缘子高压端内部气隙尺寸对电场分布影响研究[J]. 电网技术,2018,42(5):1646-1652.  
HU Jianlin, LI Yangyang, YANG Wei, et al. Study on influence of air gap size on the electric field distribution of AC 110 kV composite insulator in high-voltage side[J]. Power System Technology, 2018,42(5):1646-1652.
- [18] WANG C, LI R, HU S, et al. Study on the electrical field and the potential distribution of composite insulator with a partial micro-gap in interface[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen, China, 2013.
- [19] 吕政,鲁兹,成立,等. 复合绝缘子硅橡胶护套材料吸水性及透水性的试验研究[J]. 陕西电力,2012,40(7):14-18.  
LYU Zheng, LU Zi, CHENG Li, et al. Test & research of water absorption & water permeation of composite insulator HTV silicone rubber material[J]. Shaanxi Electric Power, 2012,40(7):14-18.
- [20] SHEN C, SPRINGER G. Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials[J]. Journal of Composite Materials, 1976, 10(1):2-20.
- [21] 王黎明,张中浩,成立,等. 复合绝缘子护套受潮对端部异常温升的影响[J]. 电网技术,2016,40(2):608-613.  
WANG Liming, ZHANG Zhonghao, CHENG Li, et al. Effect of damp sheath on abnormal temperature rise at end of composite insulator[J]. Power System Technology, 2016, 40(2):608-613.
- [22] PHILLIPS A, KUFFEL J, BAKER A, et al. Electric fields on AC composite transmission line insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2):823-830.

## 作者简介:



江渺

江渺(1997),男,学士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:1121662652@qq.com);

李黎(1976),男,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术、输变电设备运维检测;

华奎(1995),男,硕士在读,研究方向为电力系统智能化运维。

## Influence of interface defect on the electric field distribution of composite insulator

JIANG Miao<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, HUA Kui<sup>1</sup>, LU Ming<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology), Wuhan 430074, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Interface defect can be commonly found between the rod and the sheath of the composite insulator. The defect will distort the electric field nearby, which have a bad effect on the electrical and mechanical properties of the insulator. In order to study the electric field distribution of insulators under different fault conditions, a 3-D model of AC 110 kV composite insulator is established using the finite element analysis software COMSOL. The influences of the interface gap filled with air or water on the internal and the axial electric field distribution of the insulator are discussed. The results show that the electric field magnitude at the air gap increases significantly compared with the normal case. The maximum value of field is correlated positively with the gap span and thickness, and negatively with the gap length. Theoretical analysis based on the air gap equivalent arc cylinder model is given, and the deficiency of the equivalent cylinder model is corrected. Water permeation reduces the air gap field magnitude, meanwhile severely distorts axial electric field of the insulator. The field magnitude goes up linearly as the sheath damps, which may lead to corona discharge, causing flashover and other accidents, when the damping reaches a certain degree.

**Keywords:** composite insulator; interface defect; finite element analysis; electric field distribution

(编辑 钱悦)