

10 kV 管型绝缘母线典型缺陷下的电场畸变分析

孙丰睿¹, 咸日常¹, 咸峰², 孙晓维², 邢雅雯¹

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 山东七星电气科技发展有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 变电站管型绝缘母线接头潮气侵入和残留导电微粒是其常见缺陷, 缺陷导致接头电场分布发生畸变, 危及其绝缘性能, 甚至发生绝缘击穿、烧毁等事故。本文采用有限元多物理场仿真技术, 基于实际结构构建了绕包式管型绝缘母线接头模型, 分别在金属屏蔽层与主绝缘层界面、主绝缘层与内密封层界面设置长度分别为 10、30、50 mm 的 3 种不同水膜和半径为 0.5 mm 的半圆形导电杂质, 利用 COMSOL 软件进行电场仿真分析, 研究不同缺陷位于不同界面对管型绝缘母线接头电场分布的影响。结果表明: 水膜和导电杂质都会对绝缘带材界面电场分布产生不同程度的影响, 缺陷内部场强下降, 缺陷边缘场强剧增, 其中绝缘界面残留导电微粒时电场畸变情况比水分侵入时更加严重, 更易发生绝缘击穿事故, 应加强端部密封和严防导电微粒残留。

关键词: 管型绝缘母线; 接头; 有限元仿真; 典型缺陷; 电场分布

Analysis on electric field distortion of 10 kV tubular insulated busbar with typical defects

SUN Fengrui¹, XIAN Richang¹, XIAN Feng², SUN Xiaowei², XING Yawen¹

(1. College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Qixing Electric Technology Development Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract: Moisture intrusion and residual conductive particles are common defects in the joints of tubular insulated busbars in substations. These defects would cause distortion of electric field distribution at the joints, endangering insulation performance and potentially leading to insulation breakdown, burning, and other accidents. In this paper, finite element multi-physics simulation technology was used to construct a joint model of tubular busbar with wrapped insulation material based on the actual structure. Three types of water films, with 10, 30, and 50 mm of lengths, and semi-circular conductive impurities with 0.5 mm of radius, were placed at the interfaces between the metal shielding layer and the main insulation layer, as well as between the main insulation layer and the inner sealing layer. COMSOL software was used to conduct electric field simulation analysis, and the impact of different defects located at various interfaces on the electric field distribution of tubular insulated busbar joint was studied. The results show that both water films and conductive impurities can impact the electric field distribution at the insulation layer interfaces to different degrees. The electric field strength inside the defects decreases, while the electric field strength at the defect edges increases dramatically. Among these, the electric field distortion with conductive particles at the insulation interface is more severe than that with moisture intrusion, making insulation breakdown faults more likely. Therefore, it is crucial to enhance the end sealing and strictly prevent the presence of residual conductive particles.

Key words: tubular insulated busbar; joint; finite element simulation; typical defects; electric field distribution

0 引言

随着经济的发展, 社会对于电力的需求随之增加, 各电压等级的发电厂、变电站数量日益增多, 而由于管型绝缘母线具有集肤效应小、机械强度高和载流量大等优点, 长久以来被大规模应用于变电站

中。根据以往的故障案例分析^[1-3], 管型绝缘母线接头内部绝缘层被水分侵入导致受潮是使管型母线接头发生电场畸变进而导致绝缘击穿的主要诱因, 这是因为管型绝缘母线由于长时间处于室外环境下, 极易受到雨水侵蚀, 而接头内部各类绝缘材料膨胀系数不同导致产生的气隙也给水分侵入提供了条件^[4], 特别是在南方的沿海城市, 管型绝缘母线

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077221)。

接头进水已经成为了常见现象,危害变电站的稳定运行,因而研究管型绝缘母线接头不同位置被水分侵入后的电场变化情况显得尤为重要。其次,在绕包式管型绝缘母线接头施工过程中,绝缘界面常常会残留杂质,造成电场畸变,导致绝缘老化,甚至造成接头击穿。

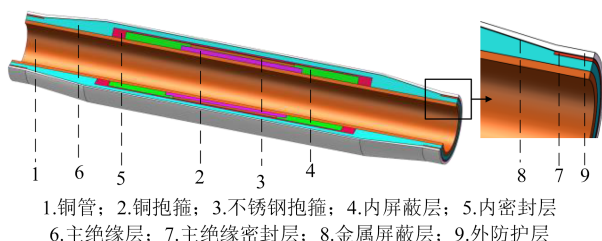
关于其他绝缘设备缺陷电场数值计算的文献有很多,文献[5]分析了XLPE电缆中间接头渗水后电场强度和击穿电压的变化情况,证明了接头渗水会使电场产生明显畸变,导致击穿电压大幅下降;文献[6]探究了电缆在受潮过程中的极化特性规律,利用德拜模型对极化-去极化电流曲线进行拟合,分析了电缆在受潮过程中电流曲线和极化特性参数的变化规律;文献[7]通过实验验证了绝缘材料受潮时,硅橡胶-XLPE界面的闪络电压降低;文献[8]通过仿真分析,发现在绝缘材料老化后,电缆内部渗水处与残留导电杂质处的最大电场强度都增大,且周围电场分布呈现“中间低、边缘高”的现象。

目前国内关于绕包式管型绝缘母线接头典型缺陷下电场畸变情况的相关研究内容不多,接头内部各带材界面侵入水分和导电杂质后的微观变化情况研究相对较少。本研究基于110~500 kV变压器户外10 kV侧管型绝缘母线接头,建立了1:1三维仿真模型,基于实际工况的缺陷情况,在金属屏蔽层与主绝缘层界面、主绝缘层与内密封层界面设置不同大小的水膜和导电杂质模拟缺陷,利用有限元方法在电流场下计算并绘制管型绝缘母线接头内部的电场分布图,比较各个环境下的物理场畸变情况,以期为变压器管型绝缘母线绝缘能力提升和诊断提供参考。

1 模型构建

1.1 仿真模型建立

管型绝缘母线是一种外形为铜管、外层缠绕若干层绝缘带材的输电设备,变压器管型绝缘母线接头的典型结构如图1所示。



1.铜管; 2.铜抱箍; 3.不锈钢抱箍; 4.内屏蔽层; 5.内密封层
6.主绝缘层; 7.主绝缘密封层; 8.金属屏蔽层; 9.外防护层

图1 管型绝缘母线模型剖面图
Fig.1 Section of tubular busbar model

本文对管型绝缘母线接头结构进行简化分析,并依据变电站现场实际尺寸和结构^[9-10],构建长为500 mm、内半径为26 mm的管型绝缘母线接头几何模型,如图2所示。

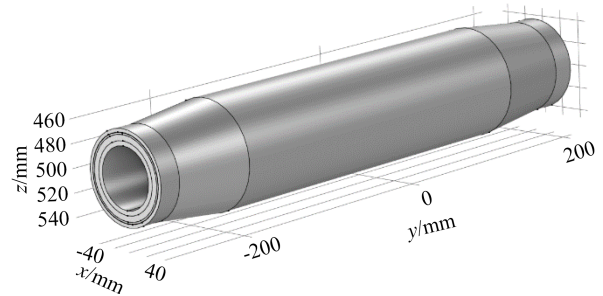


图2 COMSOL建模图
Fig.2 COMSOL modeling diagram

管型绝缘母线主体结构由内至外依次为:空心铜管导体、主绝缘层(含金属分压屏)、主绝缘密封层、金属屏蔽层、外防护层。

管型绝缘母线接头结构由内至外依次为:空心铜管导体、铜抱箍、不锈钢抱箍、内屏蔽层、内密封层、主绝缘层(不含金属分压屏)、金属屏蔽层、外防护层。其中,金属屏蔽层材料为铝箔,主绝缘层材料为聚四氟乙烯,内屏蔽层、内密封层、主绝缘密封层、外防护层材料均为交联聚乙烯,各绝缘层间涂抹硅脂。

由于金属分压屏仅分布于管型绝缘母线主体,在接头中分布较少,为简化模型同时保证模型合理性,建模中省去了管型绝缘母线接头两侧的金属分压屏。

各绝缘层结构及材料参数^[11-15]见表1。

表1 各结构材料参数
Table 1 Material parameters of each structure

结构	相对介电常数	电导率/(S/m)	厚度/mm
铜管	1×10^4	5.8×10^7	4.00
铜抱箍	1×10^4	5.8×10^7	5.00
不锈钢抱箍	1×10^4	1.46×10^6	3.00
内屏蔽层	2.09	3.92×10^{-15}	0.30
内密封层	2.09	3.92×10^{-15}	1.80
主绝缘层	2.10	1.00×10^{-15}	5.00
主绝缘密封层	2.09	3.92×10^{-15}	1.50
金属屏蔽层	1×10^4	3.77×10^7	0.30
外防护层	2.09	3.92×10^{-15}	1.80

1.2 材料参数及边界条件

本文研究的是10 kV管型母线线路,故工作电压设置为5 773.5 V,如式(1)所示。

$$U_M = U = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773.5 \text{ V} \quad (1)$$

式(1)中: U_M 为管型母线工作电压; U 为线路额定运行线电压。

依据 10 kV 变压器母排实际运行条件,将导体载流量设置为 1 818.65 A^[5,16]。

1.3 网格剖分

采用自由四面体网格对三维模型进行网格划分,对于三维模型中计算数值变化较大的区域进行局部细化处理,如图 3 所示。

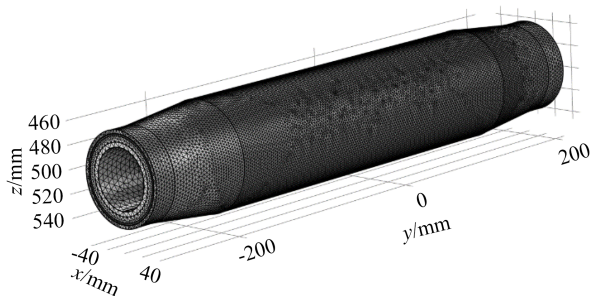


图3 模型网格划分图

Fig.3 Model grid division diagram

2 水分侵入时的电场仿真结果与分析

2.1 水膜设置

关于管型绝缘母线接头内渗水的具体位置,一般都位于两种不同绝缘介质的界面处,这是因为不同的环境温度、负载等因素会使得管型绝缘母线内部的绝缘材料发生热胀冷缩,而绝缘材料的膨胀系数不同,容易在不同绝缘介质之间产生气隙,在受潮的作用下出现潮气侵入缺陷^[17]。

水分在界面中主要以水膜的形态存在,为研究不同大小的水膜对绝缘材料界面电场的影响,设置 3 种不同大小的水膜,相对介电常数设置为 78.5,电导率为 0.03 S/m^[18-19],长度分别设置为 10、30、50 mm,厚度均为 0.2 mm,嵌入各个绝缘层表面上。

2.2 正常管型母线接头电场分布

正常情况下管型绝缘母线接头内部电场分布如图 4~5 所示。由图 4~5 可知,在正常情况下的管型绝缘母线接头内部,不锈钢抱箍表面及端部出现明显的电场集中现象,最大电场强度出现在不锈钢抱箍根部的内屏蔽层内侧,最大场强为 1.74 kV/mm。

内密封层与主绝缘层交界面和主绝缘层与金属屏蔽层交界面的电场分布情况如图 6 所示。由图

6 可知,内密封层表面电场强度最高可达到 0.84 kV/mm,主绝缘层表面电场强度最高可达到 0.37 kV/mm,其中不锈钢抱箍上方区域绝缘层内的电场强度相较其他部位更高,这是由于不锈钢抱箍作为一种金属导体,其距离金属屏蔽层更近,介电常数较大,而不锈钢层上方绝缘层上下侧距离相对较小,使层间绝缘带材内部电场强度增大。

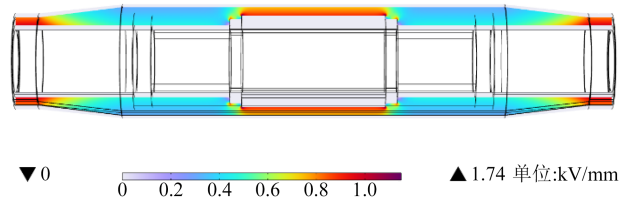


图4 正常情况下管型母线接头电场分布

Fig.4 Electric field distribution of tubular busbar joint under normal condition

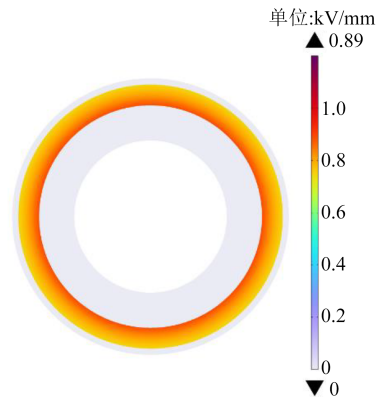


图5 正常情况下管型母线接头截面电场分布

Fig.5 Electric field distribution on the cross section of tubular busbar joint under normal condition

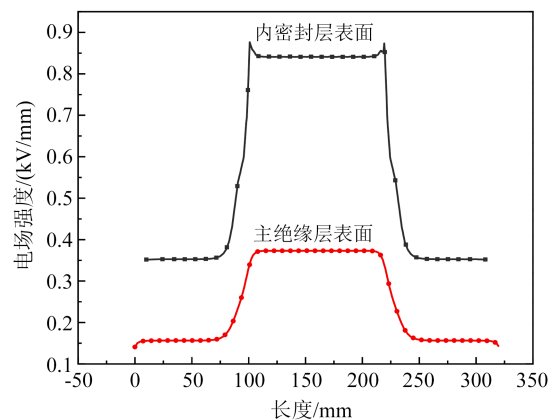


图6 绝缘界面电场分布

Fig.6 Electric field distribution at insulation interface

2.3 主绝缘层外侧受潮

在主绝缘层外表面中央位置设置 3 种不同大小的水膜后,主绝缘层外表面水膜周围电场分布情况

如图7~9所示。

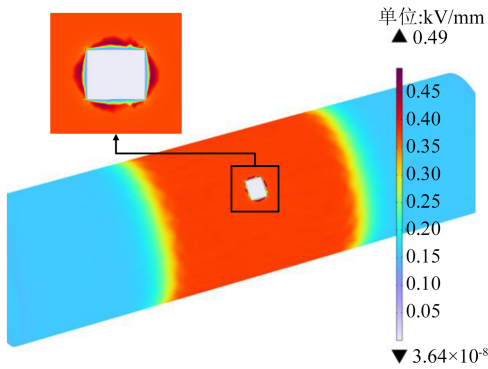


图7 10 mm水膜周围电场分布

Fig.7 Electric field distribution around 10 mm of water film

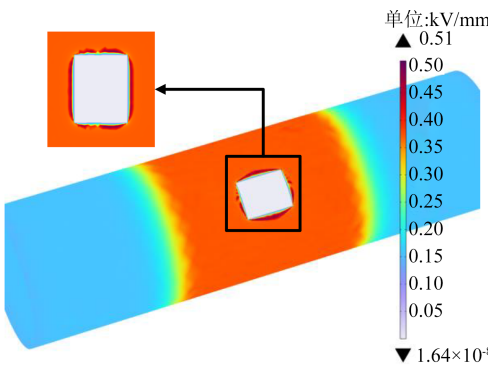


图8 30 mm水膜周围电场分布

Fig.8 Electric field distribution around 30 mm of water film

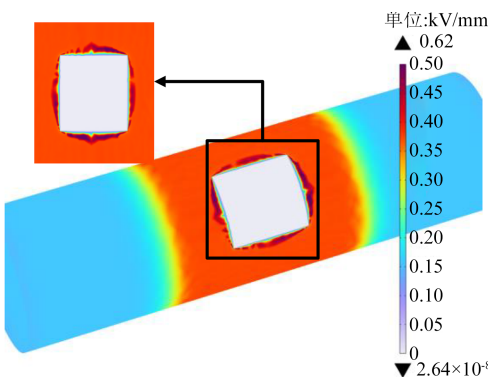


图9 50 mm水膜周围电场分布

Fig.9 Electric field distribution around 50 mm of water film

由图7~9可知,设置水膜后,水膜内部电场明显降低,但水膜边缘处电场均有不同程度的升高,长度为10、30、50 mm的水膜边缘电场强度最大值分别为0.49、0.51、0.62 kV/mm,且电场强度随水膜面积增大而逐渐上升。

设置不同大小的水膜后,沿主绝缘层表面的电场分布如图10所示。由图10可知,水膜并不会对管型绝缘母线接头其他未渗水的部位产生影响,但会使水膜边缘处电场强度急剧增大,增幅分别为

0.12、0.14、0.25 kV/mm,相较正常情况下增长了32.4%、37.8%、67.6%,水膜内部的电场强度均趋近于0,电场强度降幅没有发生明显变化。这是由于水属于良导体,直接与接地的金属屏蔽层接触,导致水膜与主绝缘层界面处的电荷集中,进而使电场强度发生畸变。

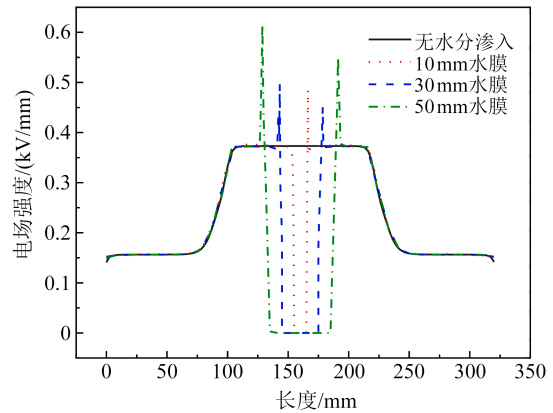


图10 主绝缘层表面电场分布

Fig.10 Electric field distribution on the surface of the main insulation layer

分别对各长度水膜及主绝缘层表面电荷密度进行仿真,结果如图11~13所示。从图11~13可以看出,水膜边缘处的电荷出现了聚集现象,基本可以验证上文中对于电场畸变原因的猜想。

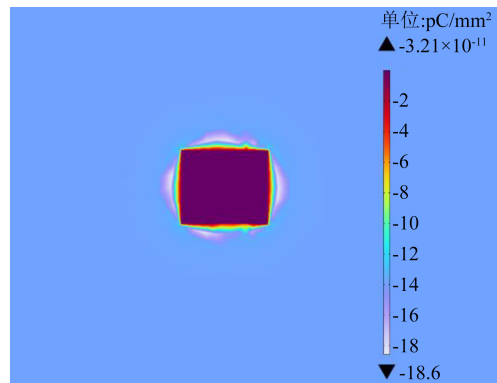


图11 10 mm水膜周围电荷密度分布

Fig.11 Distribution of charge density around 10 mm of water film

水中的带电离子在外界电场的作用下产生位移,达到静电平衡状态,此时水膜平铺于界面上。由于主绝缘层采用的聚四氟乙烯材料具有疏水性,水膜边缘与绝缘界面接触角小于90°,同时水膜中央呈现较为平缓的弧度,在曲率半径较小的位置,电荷密度较大,而水膜边缘弯曲弧度大,曲率半径小,使得电荷着重分布于水膜边缘,界面电荷密度

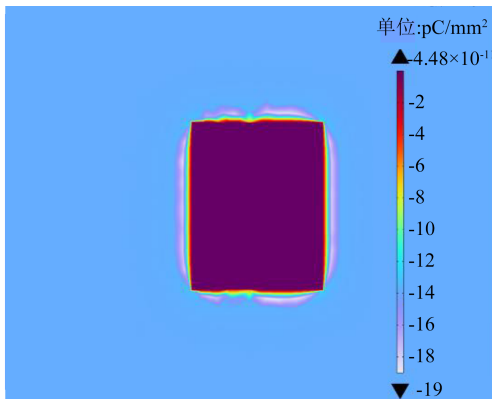


图12 30 mm水膜周围电荷密度分布

Fig.12 Distribution of charge density around 30 mm of water film

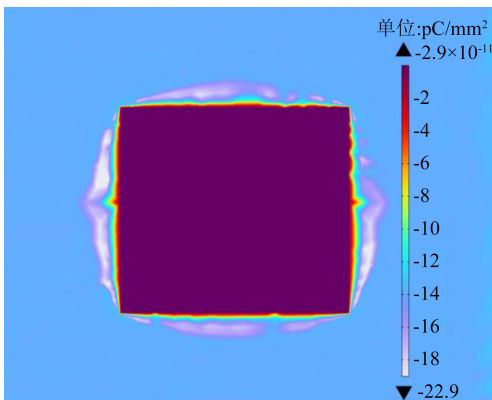


图13 50 mm水膜周围电荷密度分布

Fig.13 Distribution of charge density around 50 mm of water film

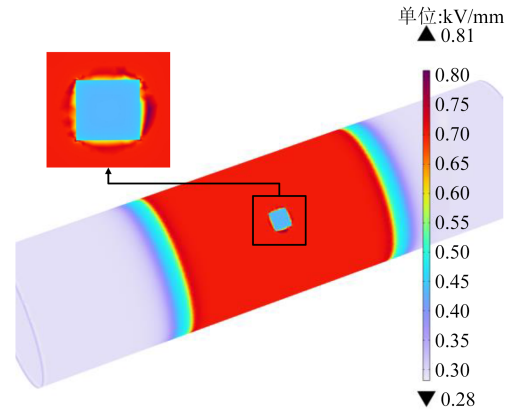


图14 10 mm水膜周围电场分布

Fig.14 Distribution of electric field around 10 mm of water film

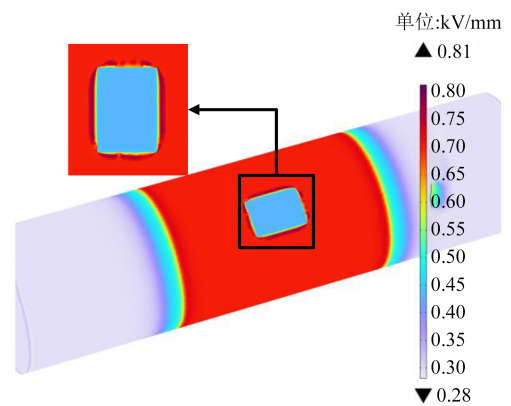


图15 30 mm水膜周围电场分布

Fig.15 Distribution of electric field around 30 mm of water film

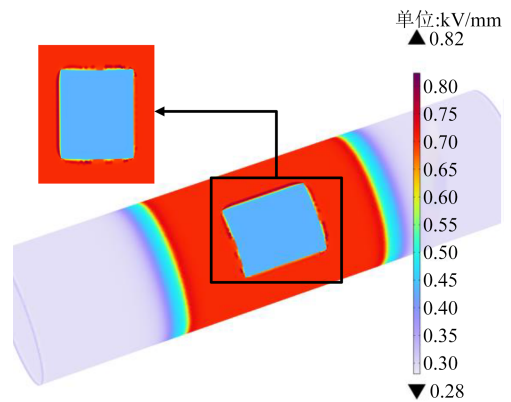


图16 50 mm水膜周围电场分布

Fig.16 Distribution of electric field around 50 mm of water film

增大,进而使得该处的等势线分布密集,电场畸变严重^[20]。

2.4 主绝缘层与内密封层交界面受潮

绕包式管型绝缘母线接头内部不同绝缘带材间通常会被涂抹一层硅脂,用于增加绝缘界面密封性和均匀电场^[21-22],但两种不同绝缘界面间仍会因为膨胀或者老化等因素侵入潮气,水分会渗入硅脂中,造成电场畸变。

在主绝缘层与内密封层交界面中央位置的硅脂中设置3种不同大小的水膜后,硅脂表面水膜周围的电场分布情况如图14~16所示。由图14~16可知,将水膜放置到主绝缘层与内密封层之间的硅脂中,水膜边缘处电场强度仍会急剧增大,但增幅不会被水膜大小影响。

设置不同大小的水膜后,沿内密封层表面的电场强度分布如图17所示。由图17可知,无水分渗入情况下,硅脂上表面的最大电场强度为0.7 kV/mm,

硅脂中侵入水分后,整个绝缘界面的电场强度变化情况与水分侵入至金属屏蔽层与主绝缘层界面时的情况基本相同,水膜边缘处电场强度急剧增大,但增幅不随水膜面积的增大而提升,增幅均为0.11 kV/mm左右,相较无水分渗入情况下增长了15.7%。

水膜大小对电场强度的影响不大,且水膜内部的电场强度均为0.43 kV/mm左右,降幅保持不变。

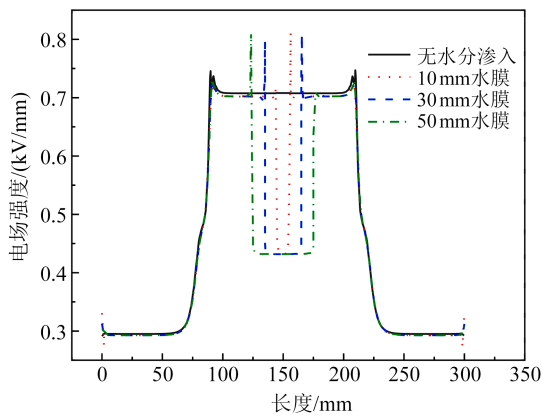


图17 内密封层表面电场分布图

Fig.17 Electric field distribution on the surface of inner sealing layer

相较于水分侵入主绝缘层外表面的情况,水分渗入界面主绝缘与内密封层交时电场强度有明显上升,更容易导致局部放电的产生,在交变电场的影响下,水膜更易发生形变而对其他绝缘材料产生电-机械应力^[23],在此应力的影响下,水膜会持续不断的对周围的绝缘介质进行冲击,加速绝缘劣化,直至在绝缘介质上产生微观裂隙,诱发水树枝^[24]。

3 残留导电微粒时的电场仿真结果与分析

3.1 导电微粒设置

在对管型绝缘母线接头处进行包封的过程中,需要对接头的不锈钢抱箍进行焊接,经常会将导电微粒残留在各个绝缘带材之间,使管型绝缘母线接头内部存在安全隐患,增加管母绝缘层被电击穿的风险。

为了研究管型绝缘母线接头内部内密封层与主绝缘层交界面残留导电微粒时的电场分布情况,在交界面处设置半径为0.5 mm的半球体模拟导电微粒,设置位置与水膜仿真的缺陷位置相同,不同种类导电微粒的电气参数见表2。

表2 导电微粒参数表

Table 2 Parameters of conductive particle

种类	相对介电常数	电导率/(S/m)
半导电微粒	100	3
金属微粒	1×10^4	4×10^7

3.2 残留半导电微粒

管型绝缘母线接头内部内密封层与主绝缘层交界面存在半导电微粒时的界面电场变化情况和

纵向界面电场畸变情况如图18~20所示。

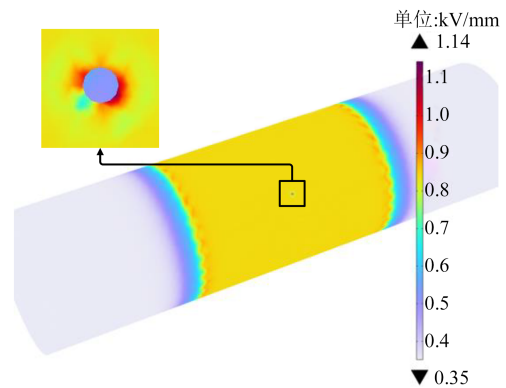


图18 半导电微粒周围电场分布

Fig.18 Electric field distribution around semi conductive particles

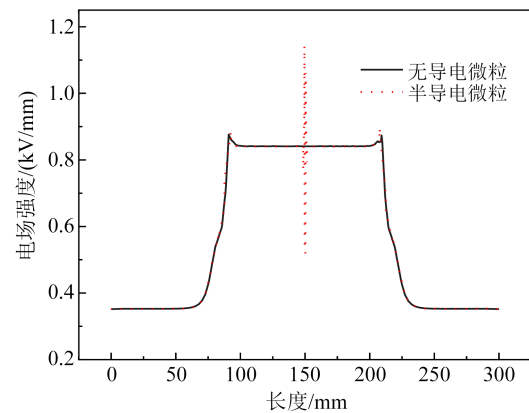


图19 存在半导电微粒时界面电场分布

Fig.19 Interface electric field distribution in the presence of semi conductive particles

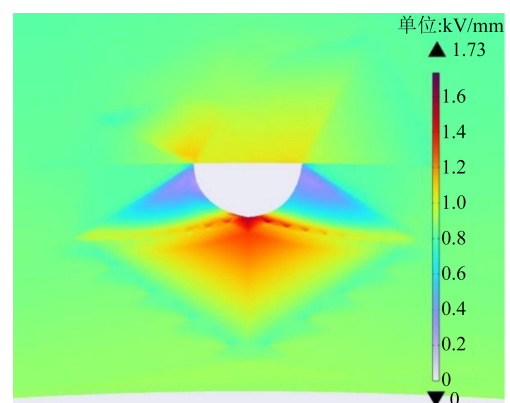


图20 半导电微粒纵切面电场图

Fig.20 Electric field diagram of longitudinal section for semi conductive particle

由图18~19可知,界面半导电微粒内部电场减小至0.49 kV/mm,但半导电微粒边缘处电场明显增大,最大值达到1.14 kV/mm,相较无导电微粒位置

的电场强度增幅为0.3 kV/mm,同比增长了35.7%。

由图20可知,在半导体微粒相对平缓的上表面附近,电场基本不发生畸变,但在下方有弧度的半圆部分,电场畸变非常严重,半导体微粒最低点处的电场出现剧增,场强可达到1.73 kV/mm,极易发生击穿。

半导体杂质残留绝缘层界面的电场畸变情况与水分侵入情况类似,一般都跟杂质颗粒的曲率半径有关,曲率半径越小,其表面聚集的电荷越多,电场强度越大^[25]。同时与半导体微粒接触的介质在电场作用下发生极化,在微粒外表面产生束缚电荷,进一步增大了其表面电荷密度,进而增大了局部电场强度。

3.3 残留金属微粒

管型绝缘母线接头内部内密封层与主绝缘层交界面存在金属微粒时的界面电场变化情况和纵向界面电场畸变情况如图21~23所示。

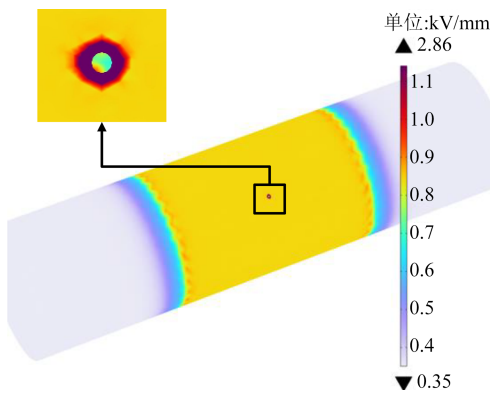


图21 金属微粒周围电场分布

Fig.21 Electric field distribution around metal particles

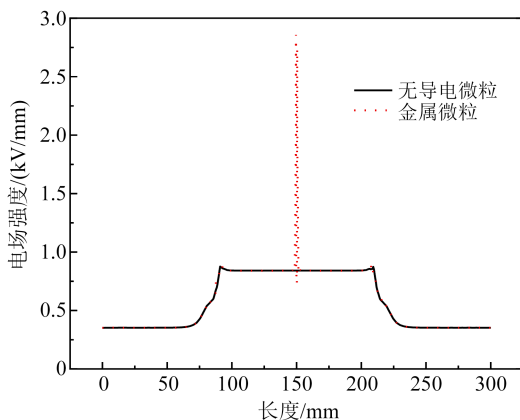


图22 存在金属微粒时界面电场分布

Fig.22 Interface electric field distribution in the presence of metal particles

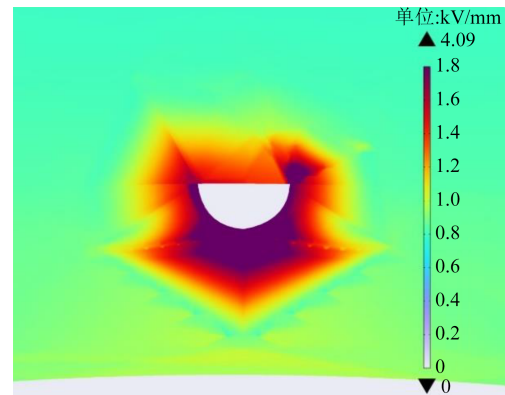


图23 金属微粒纵切面电场图

Fig.23 Electric field diagram of longitudinal section for metal particles

由图21~22可知,界面金属微粒内部电场减小至0.73 kV/mm,下降幅度很小,但金属微粒边缘处电场增大更加明显,最大值达到2.86 kV/mm,相较无导电微粒位置的电场强度增幅为2.02 kV/mm,同比增长了240.5%。

由图23可知,金属微粒周围电场畸变规律与半导体微粒基本相同,但增幅远大于存在半导体微粒情况,最大场强点位于微粒下方,最大电强强度达到4.09 kV/mm,发生绝缘击穿的概率更大。

相比于半导体微粒,金属微粒的相对介电常数更大,因绝缘介质极化在表面聚集更多电荷,金属微粒内的自由电子在外电场的作用下发生位移,聚集到表面,其数量相较于半导体微粒更多,导致电场强度更大。

金属微粒附近出现电场强度急剧升高的现象,极有可能导致局部放电、击穿绝缘层、烧毁管型绝缘母线接头,危害整个变电站的安全稳定运行。

4 结论

(1)管型绝缘母线接头侵入水分和残留导电微粒后,缺陷内部电场强度下降,边缘处电场强度则明显升高,其他正常部位的电场强度基本保持不变。

(2)水分侵入金属屏蔽层与主绝缘层交界面时,水膜内部电场强度趋近于0,水膜边缘处电场强度急剧上升,且水膜面积越大,上升幅度越大。

(3)水分侵入主绝缘层与内密封层交界面时,水分侵入硅脂中,水膜内部的电场强度为0.43 kV/mm左右,水膜边缘处的电场强度为0.82 kV/mm左右,水膜面积变化对电场畸变程度的影响不明显。

(4)绝缘界面残留导电微粒时,电场畸变情况相比水分侵入更加严重。当残留半导体微粒时,绝缘材料界面电场最大值为1.14 kV/mm,纵切面电场最大值为1.73 kV/mm;当残留金属微粒时,绝缘材料界面电场最大值为2.86 kV/mm,纵切面电场最大值为4.09 kV/mm,电场强度在微粒圆形面最低点出现剧增。

(5)将4种情况对比可知,绝缘界面残留金属微粒和半导体微粒的情况最为严重,在施工过程中应着重避免这种情况发生。

参考文献 References

- [1] 许妍妍,宋谦,陈冰,等. 110 kV以上变电站变低管母缺陷分析[J]. 中国新技术新产品,2021(24):47-49,80.
XU Yanyan, SONG Qian, CHEN Bing, et al. Analysis of low voltage busbar defects in substations above 110 kV[J]. New Technology & New Products of China,2021(24):47-49,80.
- [2] 陈滔. 主变变低绝缘管母发热缺陷分析及应对研究[J]. 技术与市场,2018,25(8):108-109.
CHEN Tao. Analysis and countermeasures of heating defects in low insulation tube bus of main transformer[J]. Technology and Market,2018,25(8):108-109.
- [3] 祝伟强,付芸. 主变变低绝缘管型母线故障分析[J]. 电气技术,2019,20(5):96-99.
ZHU Weiqiang, FU Yun. Fault analysis of transformer low voltage full insulation tubular bus[J]. Electrical Engineering,2019,20(5):96-99.
- [4] 张峰,陆茹. 一起全绝缘管母局部放电的检测与分析[J]. 电力安全技术,2018,20(3):66-68.
ZHANG Feng, LU Ru. Detection and analysis of partial discharge in fully insulated tube mother[J]. Electric Safety Technology,2018,20(3):66-68.
- [5] 方春华,叶小源,杨司齐,等. 水分对XLPE电缆中间接头电场和击穿电压的影响[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):64-72.
FANG Chunhua, YE Xiaoyuan, YANG Siqi, et al. Effect of moisture on electric field and breakdown voltage at XLPE cable intermediate joint[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2021,48(2):64-72.
- [6] 李晗. 护套进水长期受潮条件下XLPE电缆极化去极化特性[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.
LI Han. Polarization and depolarization characteristics of XLPE cables under the condition of sheath is wet for a long time[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,2022.
- [7] 杜伟,汪超,张帆,等. 电缆中间接头受潮时界面放电试验研究[J]. 电工材料,2022(1):63-68.
DU Wei, WANG Chao, ZHANG Fan, et al. Electrical discharge test study of moisture at the interface of cable intermediate joints [J]. Electrical Engineering Materials,2022(1):63-68.
- [8] 赵健军,许庆重,王文成,等. 绝缘老化对电缆中间接头界面缺陷处电场分布的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(7):67-74.
ZHAO Jianjun, XU Qingzhong, WANG Wencheng, et al. Influence of insulation ageing on electric field distribution at interface defects of cable joints[J]. Insulating Materials,2021,54(7):67-74.
- [9] 张黛芳. 绝缘管型母线典型缺陷故障的多物理场耦合特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.
ZHANG Daifang. Research on multiphysics coupling characteristics of typical defects of insulated tubular bus[D]. Beijing: North China Electric Power University,2020.
- [10] 刘凤莲,薛志航,邓元实,等. 绝缘管型母线运行特性及状态评估方法[J]. 高电压技术,2017,43(12):4088-4095.
LIU Fenglian, XUE Zhihang, DENG Yuanshi, et al. Operating characteristics and state evaluation methods for insulated tubular bus-bar[J]. High Voltage Engineering,2017,43(12):4088-4095.
- [11] 邓繁盛,高娜,李秀峰,等. 基于电-热-力场的10 kV电缆终端典型缺陷仿真研究[J]. 绝缘材料,2023,56(3):100-106.
DENG Fansheng, GAO Yuan, LI Xiufeng, et al. Simulation on typical defects of 10 kV cable terminal based on electro-thermo-mechanical field[J]. Insulating Materials,2023,56(3):100-106.
- [12] 张震锋,白晓萍,惠伟. 聚四氟乙烯材料基础性能研究[J]. 电工材料,2021(6):25-28.
ZHANG Zhenfeng, BAI Xiaoping, HUI Wei. Study on fundamental performance of material of polytetrafluoroethylene[J]. Electrical Engineering Materials,2021(6):25-28.
- [13] 林鹏远. 35 kV管型绝缘母线电气性能的数值分析[D]. 上海:上海电力学院,2018.
LIN Pengyuan. Numerical analysis of electrical properties in 35 kV tubular insulated bus-bar[D]. Shanghai: Shanghai Electric Power University,2018.
- [14] PRICE D M, JARRATT M. Thermal conductivity of PTFE and PTFE composites[J]. Thermochimica Acta,2002,392:231-236.
- [15] BLUMM J, LINDEMANN A, MEYER M, et al. Characterization of PTFE using advanced thermal analysis techniques[J]. International Journal of Thermophysics,2010,31(10):1919-1927.
- [16] 徐俊,高琦,周飞,等. 典型故障条件下35 kV包裹绝缘护套母排电场分布研究[J]. 高压电器,2020,56(6):317-323.
XU Jun, GAO Qi, ZHOU Fei, et al. Study on the electric field distribution of 35 kV bus with wrapped insulation sheath under typical fault conditions[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(6):317-323.
- [17] 阮玲,李成磊,杨帆,等. 绝缘管型母线的发展现状及研究动向[J]. 高压电器,2018,54(4):43-53.
RUAN Ling, LI Chenglei, YANG Fan, et al. Development status and research trend of insulated tubular bus[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(4):43-53.
- [18] 赵健康,欧阳本红,赵学童,等. 水树对XLPE电缆绝缘材料性能和微观结构影响的研究进展[J]. 绝缘材料,2010,43(5):50-56.
ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, ZHAO Xuotong, et al.

- Review of influence of water-tree on microstructure and properties of XLPE cable insulation material[J]. *Insulating Materials*, 2010,43(5):50-56.
- [19] 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.
ZHANG Ruifeng, JIA Dongming, YANG Xiaohui, et al. Study on electric field distribution of icing composite insulators[J]. *Insulating Materials*,2015,48(9):42-46.
- [20] 罗长薰,梁斌.导体面电荷分布与表面曲率半径的关系[J]. *陕西师大学报(自然科学版)*,1994(4):86-88.
LUO Changxun, LIANG Bin. Relation between the distribution of surface charge on conductor and the radius of curvature on surface[J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*,1994(4):86-88.
- [21] 罗智奕,陈腾彪,崔伯男,等.电缆附件用涂覆硅脂的特性及其研究现状[J]. *绝缘材料*,2021,54(10):13-19.
LUO Zhiyi, CHEN Tengbiao, CUI Bonan, et al. Characteristics and research status of coated silicone grease for cable accessories[J]. *Insulating Materials*,2021,54(10):13-19.
- [22] 李莹,余栋,崔江静,等.不同老化处理对涂覆硅脂后XLPE/SIR界面击穿特性的影响[J]. *绝缘材料*,2020,53(3):41-49.
LI Ying, YU Dong, CUI Jiangjing, et al. Effect of different ageing treatments on breakdown characteristics of XLPE/SIR interface after coated with silicone grease[J]. *Insulating Materials*, 2020,53(3):41-49.
- [23] WANG Z, MARCOLONGO P, LEMBERG J A, et al. Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012,19(1):321-330.
- [24] TOYODA T, MUKAI S, OHKI Y, et al. Conductivity and permittivity of water tree in polyethylene[C]//*IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Austin, USA: IEEE,1999:577-580.
- [25] 曹雯,张云娟,麻焕成,等.缺陷对电缆接头复合界面电场分布影响的仿真分析[J]. *电网与清洁能源*,2016,32(11):31-36.
CAO Wen, ZHANG Yunjuan, MA Huancheng, et al. Analysis of influences of defects on electric field distribution of composite interface of cable joint[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016,32(11):31-36.

收稿日期:2023-11-02;修回日期:2023-12-21。

作者简介:

孙丰睿(2000-),男(汉族),山东淄博人,硕士生,研究方向为电气设备绝缘状态检测技术;

通信作者:咸日常(1966-),男(汉族),山东高密人,教授,研究方向为电气设备状态检测与故障诊断技术。