

220 kV 瓷绝缘子(XP-160)串的空间电场分布 特性及其影响因素仿真分析

屠晔炜, 夏强峰

(嘉兴电力局, 嘉兴 314033)

摘要: 绝缘子串的电压和电场分布研究对瓷绝缘子的相关设计和运行维护非常重要。笔者根据瓷绝缘子串的实际结构和工作条件,选择有限元数值计算方法建立三维电场仿真模型进行计算分析和总结。仿真结果表明:瓷绝缘子串绝缘子伞下棱对其表面电场影响较大但对绝缘子串空间电场影响较小;避雷线对瓷绝缘子串的表面及空间电场影响甚微;不同塔型、不同相导线及其分裂数、绝缘子串型式及绝缘子型式、绝缘子的表面状态对瓷绝缘子串的周围电场值有一定的影响,在仿真分析时需予以考虑。文中仿真结果可为输电线路的设计及绝缘子在线监测提供一定的借鉴。

关键词: 瓷绝缘子串;有限元;空间电场分布;悬浮导体

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)03-0067-08

Simulation of Space Electric Field Distribution Around 220 kV Porcelain Insulator String (XP-160) and the Influencing Factors

TU Ye-wei, XIA Qiang-feng

(Jiaxing Electric Power Bureau, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Understanding voltage and electric field distribution of an insulator string is important for its insulator design and operation. In this paper, a three-dimensional electric field model is established with the finite element method to calculate and analyze the electric field of the porcelain insulator string according to its real structure and working conditions. The results show that the umbrella aris of insulator and lightning conductor exert a little impact on the space electric field, while the umbrella aris has clear influence on the surface electric field. Tower type, wire type and split, insulator string type, and insulation state of insulator surface all impose certain effects on the space electric field. They hence need to be considered in simulation analysis of the space electric field distribution of the insulator strings.

Key words: porcelain insulator string; finite element; space electric field distribution; suspended conductor

0 引言

绝缘子串的闪络故障会引起整条线路故障,造成不必要的经济损失,而沿绝缘子串表面的电位与电场分布的计算是绝缘子设计中的重要工作之一。因此,国内外关于绝缘子串电位和电场分布的数值计算研究有很多^[1-13],但由于瓷绝缘子串的复杂外形,很多研究集中于分析非瓷绝缘子。文[14]中建立了 345 kV 合成绝缘子的二维和三维电场仿真模型,

同时研究了二维和三维模型、绝缘子伞群、导线长度、均压环、杆塔结构等对合成绝缘子表面电场的影响;文[15]中运用优化模拟电荷法研究了清洁和干燥的复合和瓷绝缘子 (115~500 kV) 的表面电场分布;文[16]中运用部分优化模拟电荷法计算了染污支柱绝缘子的表面电场;文[17]中以模拟电荷法计算了 110 kV 瓷绝缘子串周围空间的电场;文[18]中以模拟电荷法和边界元法相结合的混合数值计算法对 330 kV 复合绝缘子表面电场进行计算研究;文[19]中基于有限元分析软件 OPERA-3d 建立 150 kV

收稿日期: 2011-10-18; 修回日期: 2011-11-17

玻璃绝缘子串的三维电场仿真模型,并将仿真结果与实验结果进行比较。可见目前大多数对于绝缘子串电场分布的研究中对仿真模型都做了一定程度的简化,集中分析绝缘子串的表面电场分布,仿真模型与绝缘子串实际运行情况也有一定的差别^[20]。所以该文根据线路瓷绝缘子串的实际运行情况建立三维模型,使仿真结果更接近于绝缘子串运行的真实情况,进而对其周围空间的电场分布及其影响因素进行分析。

1 仿真模型及其参数

由于交流电压的波长远大于绝缘子串长,绝缘子串在任一瞬间的电场都可以近似地认为是稳定的,因此可以用静电场来分析瓷绝缘子串的周围空间电场。笔者以 13 片 XP-160 型瓷绝缘子为研究对象,采用有限元软件进行仿真分析。建立的仿真模型及空间电场输出示意图见 1。

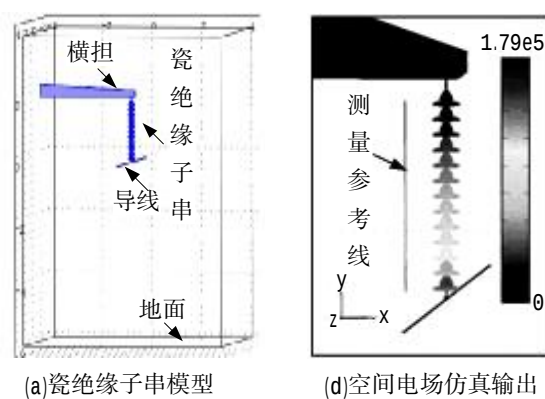


图 1 仿真模型

Fig. 1 Simulation model

1.1 开区域问题的处理

笔者对开区域问题的处理选用人工截断法^[21]。通过对绝缘子串周围场域空气层厚度的变化对其周围空间电场分布的影响来确定合理的计算区域。

图 2 为仿真过程中空气介质厚度改变时,离绝缘子中轴 1.0 m 处的空间电场分布。由图 2 可知,空气介质厚度 > 4.0 m 时对计算结果的影响不明显。因此,文中仿真计算时取空气介质厚度为 4.0 m。

1.2 悬浮电位的处理

笔者对悬浮导体的处理采用虚拟大介电常数法^[22-23]。将具有悬浮电位的导体区域当作高介电常数区域,设置该区域的介电常数与周围非电位悬浮区域的介电常数之比为 1 000 即可。为了验证有限仿真软件采用该处理方法的准确性和有效性,笔者以文[22]中的例子进行验证。图 3 为仿真得到含有悬浮导体的等电位图。表 1 为仿真结果与导电纸试

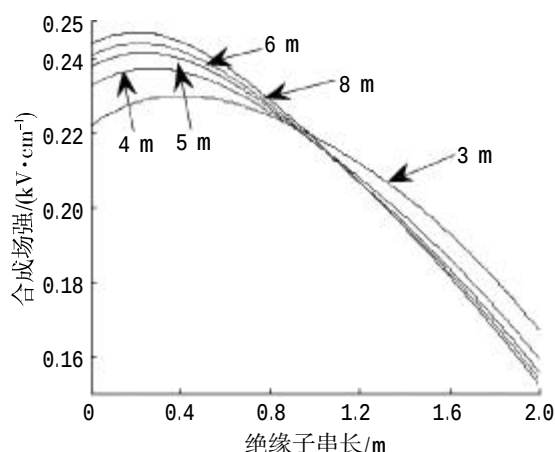


图 2 空气介质厚度改变时绝缘子串周围空间的电场分布

Tab. 2 The influence of the air dielectric thickness change to the electric field distribution in the vicinity of insulators

验结果的比较。

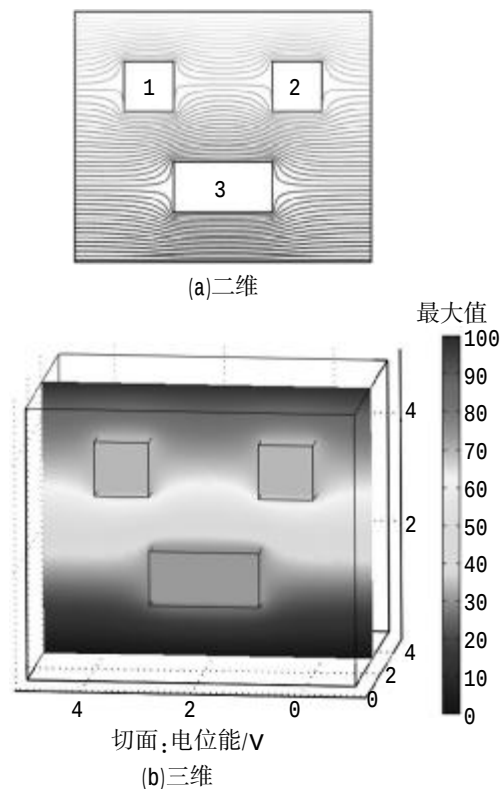


图 3 悬浮导体的等电位图

Fig. 3 Equipotential diagram of the suspended conductors

表 1 悬浮导体的电位

Tab. 1 The potential of the suspended conductors

处理方法	悬浮导体 1	悬浮导体 2	悬浮导体 3
二维仿真值/V	70.12	70.53	33.56
三维仿真值/V	69.22	69.23	32.04
文[22]实验结果/V	68.80	69.30	32.70

综合以上两种情况可以看出,实验结果与三维仿真结果的最大误差为 0.66 V,精度满足工程设计要求。

1.3 金具、导线、杆塔的处理及绝缘子参数

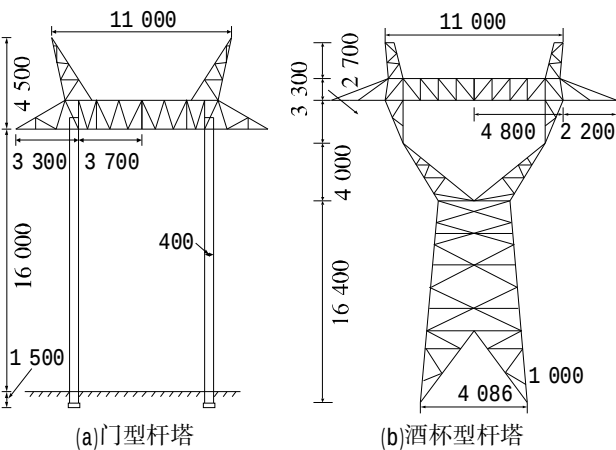
仿真时采用圆柱导体来模拟金具和导线的实际大小和形状。单导线、双分裂导线、避雷线型号分别为 LGJ-400/35、2×LGJ-240/40 (分裂间距: 400 mm)、GJ-50。该文在仿真时分析了导线长度对瓷绝缘子串外沿表面最大电场即测量线(见图 2)与绝缘子串表面相切时的最大空间电场的影响, 见表 2。导线长度增加使瓷绝缘子串外沿表面电场的减小, 文中仿真时导线长度取为绝缘子串长度的 4 倍。

表 2 导线长度对外沿表面最大电场的影响

Tab. 2 The influence of wire length to the largest electric field at the outer edge of insulators

(导线长度/绝缘子串长度)/倍	表面最大电场/(kV·cm ⁻¹)
0	4.08
1	3.18
2	2.53
3	2.42
4	2.34
5	2.30

仿真采用的两种杆塔的具体参数见图 4。仿真中将铁塔复杂的网状结构形状采用平面代替。整个模型包含杆塔、绝缘子串、上下端金具、导线以及空气, 见图 5。瓷绝缘子串的高压端、导线及导线侧金具的电位设置为 220 kV 线路的相电压峰值 179.0 kV, 低压端、杆塔及杆塔侧金具的电位设置为 0.0 kV。XP-160 型瓷绝缘子的具体技术参数见表 3。各部分介质的相对介电常数见表 4。



注: 图中单位为 mm

图 4 杆塔尺寸参数

Fig. 4 Tower dimensions

2 瓷绝缘子串电场分布仿真结果

基于以上绝缘子串的电场仿真模型得到酒杯杆塔边相瓷绝缘子串的电场分布情况。图 6 为 13 片瓷

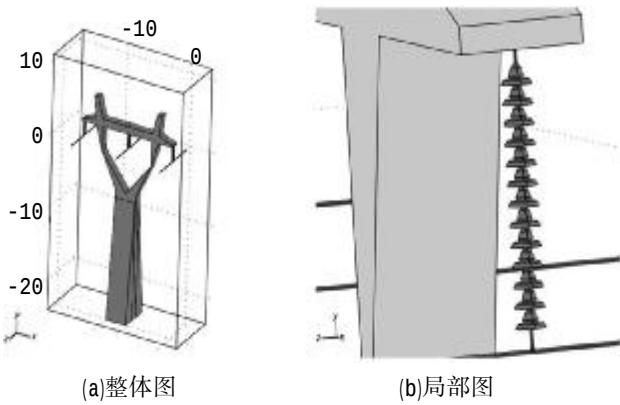


图 5 仿真模型

Fig. 5 Simulation model

表 3 XP-160 绝缘子技术参数

Tab. 3 XP-160 insulator technical parameters mm

结构高度	盘径	爬电距离	钢脚长	钢脚直径	钢帽高	钢帽上直径/下直径
146	255	305	62	21	128	74/107

表 4 各介质材料的相对介电常数

Tab. 4 The relative permittivity of the dielectric

介质材料	空气	瓷	水泥
相对介电常数	1	6	14

绝缘子串中轴处的电场分布情况。

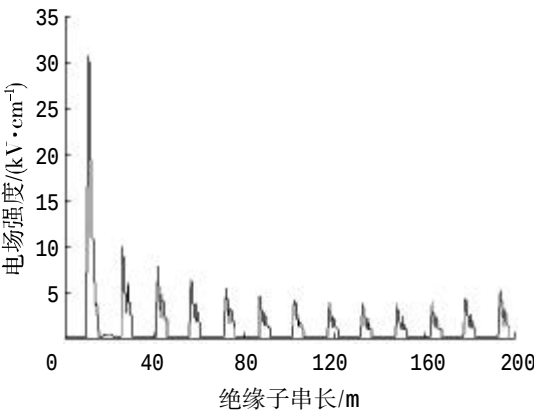


图 6 沿绝缘子串中轴的电场分布情况

Fig. 6 Electric field distribution along the central axis of insulator string

由图 6 可以看出整串绝缘子内部电场强度分布极不均匀。导线侧第 1 片绝缘子电场相对集中, 电场强度较高, 达到 30.813 kV/cm, 中部绝缘子电场较低, 最低仅为 3.681 kV/cm, 横担侧的电场强度分别为 4.299 kV/cm 和 5.073 kV/cm, 比中间几片有所增大; 串中的内部最大场强位于高压端第 1 片绝缘子的瓷件与水泥连接处, 见图 7。每片绝缘子的内部电场分布具有一定的规律性。钢脚与钢帽为等位体, 沿

绝缘子串中轴经过钢脚后到水泥部分,材料从导体过渡到电介质,电位急剧下降;钢脚与钢帽内部电场为零,绝缘子头部瓷件中电场集中,场强较大。

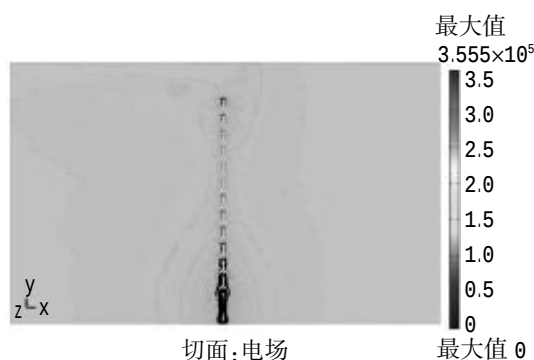


图 7 XP-160 绝缘子串中轴面电场分布云图

Fig. 7 Satellite images of electric field distribution along the central axis face of the XP-160 insulator string

图 8 为绝缘子串周围空间的合成电场分布情况。由图 8 可知,当 $d=10.0$ cm 时,沿瓷绝缘子伞裙—空气—伞裙路径的电场分布有明显的规律性。

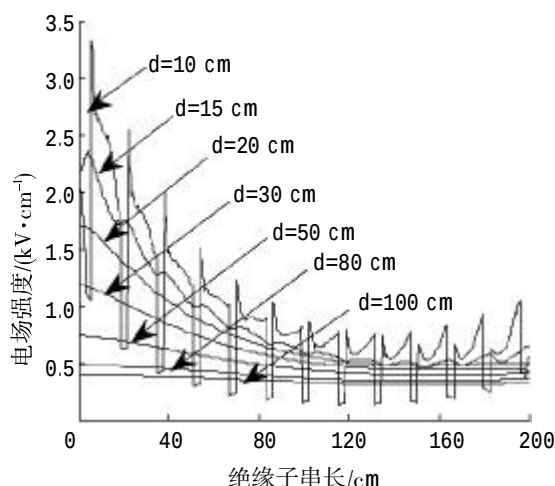


图 8 绝缘子串周围空间的合成电场分布情况

Fig. 8 The electric field distribution around the space of the insulator string

在瓷—空气双重介质中,电场分布曲线的波峰为靠近瓷表面空气中的电场值;波谷为瓷中的电场值。在靠近伞裙下表面的空气中,电场出现极大值,进入伞裙后电场值逐渐减小,且始终保持较小的电场值;从伞裙进入空气后,靠近伞裙上表面附近空气中电场再次出现极大值;随后,在两个伞裙之间的空气中的电场值也有一定规律性;在位于高压端处其值逐渐减小,在位于低压端处逐渐增加,位于中部其值基本保持不变;在下一片绝缘子伞裙与空气的界面处电场值急剧减小,进入伞裙后再次出现极小值,当再次从伞裙进入空气时电场再次出现极大;

位于高压端的伞裙内部及其之间的空气中电场较大,中部最小,低压端略微增加。根据这个规律,串中各片绝缘子的电场强度较大位置均出现在靠近伞裙表面附近的空气中。当 $d=15.0$ cm 时,空间电场的最大值为 2.347 kV/cm;当 $d=20.0$ cm 时,其值为 1.684 kV/cm,电场值减小了 28.2%;当 d 由 20.0 cm 增加到 30 cm 时,其值减小了 29.9%;当 d 再增加 10.0 cm 时,其值减小了 37.7%。可见,随着 d 增加,绝缘子串的空间电场值衰减变化量减小,变化率增大。

3 瓷绝缘子串空间电场影响因素的分析

现场实测分析瓷绝缘子串周围空间电场的影响因素需要耗费大量的人力和物力,同时测量工作也有一定的危险性,因此文中通过绝缘子串的有限元仿真模型分析瓷绝缘子串空间的影响因素显得比较有意义,仿真结果也可绝缘子状态在线监测提供一定的借鉴。以下所有情况分析均采用距离瓷绝缘子串中心轴 15 cm 处且正对塔身面的合成电场分布情况。

3.1 绝缘子伞下棱对绝缘子串空间电场的影响

由于瓷绝缘子伞下棱的存在,会使仿真时的网格剖分数量和求解自由度大大增加,有时甚至造成求解自由度太大而无法求解。有棱与无棱的最大电场差值为 2.03%,见图 9。可见瓷绝缘子伞下棱对绝缘子串周围空间电场影响很小。考虑到仿真时间与精度的优化,可忽略瓷绝缘子伞下棱的影响。

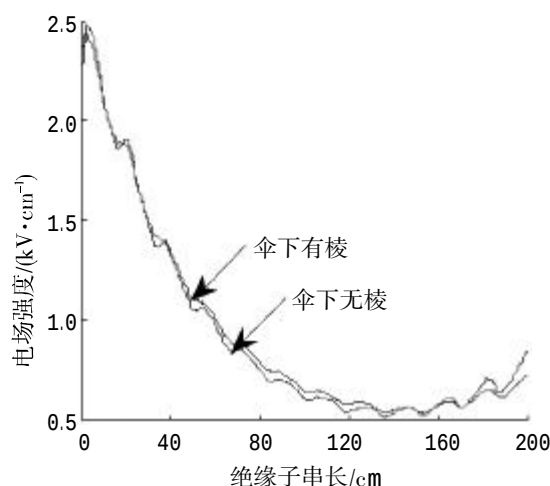


图 9 瓷绝缘子伞下棱对绝缘子串周围空间电场的影响

Fig. 9 The influence of the umbrella aris to the electric field around the insulator string

3.2 不同塔型对绝缘子串空间电场的影响

图 10 为不同塔型对瓷绝缘子串周围电场的影响。由图 10 可知:两种杆塔的中相绝缘子串都处于四周等电位体包围中,两者的空间电场非常接近,最

大电场差值为 1.51%; 边相绝缘子串所处四周的等电位体不同, 门型杆塔的有更多的钢结构靠近绝缘子串, 使其边相绝缘子串的电场分布值略大于酒杯型杆塔的边相绝缘子串, 最大差值出现在低压端为 24.1%。

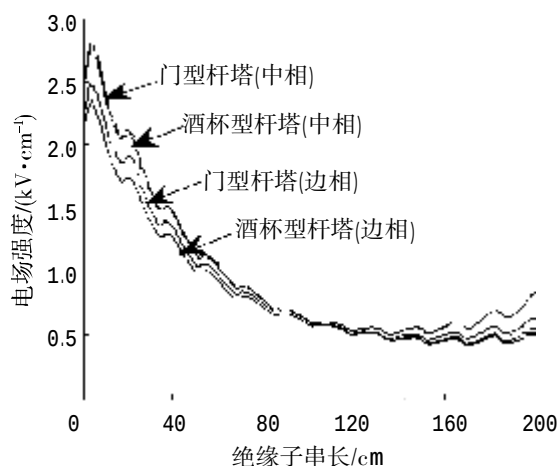


图 10 不同塔型对瓷绝缘子串周围电场的影响

Fig. 10 The influence of different tower types to the electric field around the insulator strings

3.3 导线与避雷线对绝缘子串空间电场的影响

双分裂导线使得整个绝缘子串的周围电场分布更均匀, 两种情况下最大电场差值为 20.4%, 见图 11。双分裂导线由两根单导线组成, 绝缘子串高压端处其各自产生的电场矢量方向间的夹角为钝角, 合成电场小于单导线产生的电场矢量和, 对绝缘子串空间电场的叠加作用小于单导线; 当远离高压端时, 其各自产生的分量间的夹角逐渐减小, 合成场强增大且最终大于单导线产生的电场, 对空间电场的叠加作用大于单导线, 可见导线布置方式对绝缘子周围空间的电场影响较大。避雷线使绝缘子串周围空间电场略微增大, 最大电场差值为 2.85%, 见图 12。可见在仿真时可以不考虑避雷线的影响。

3.4 不同相导线对绝缘子串空间电场的的影响

文[24]指出计算瓷绝缘子串电压分布时可将三相带电简化为单相带电。三相带电与单相带电对瓷绝缘子串周围空间电场的影响见图 13。在单相与三相带电时, 由于其他两相导线的电场叠加作用的影响使边相的空间电场变化明显, 最大电场值变化为 8.4%, 中相由于其他两相导线的电场叠加作用相互抵消, 所以其周围空间电场变化不明显, 两条电场曲线几乎重合, 最大电场差值为 0.58%。

3.5 绝缘子串布置方式对其空间电场的影响

绝缘子串型式对其周围空间电场的影响见图 14。由图 14 可知, 绝缘子串型式与其周围空间电场

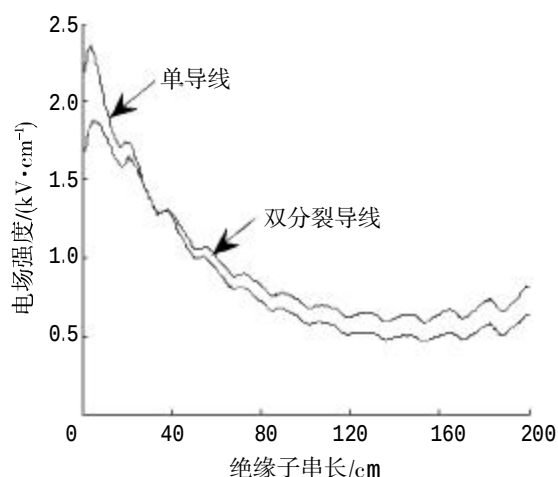


图 11 单、双分裂导线对绝缘子串周围空间电场的影响

Fig. 11 The influence of the divided wire to the electric field around the insulator string

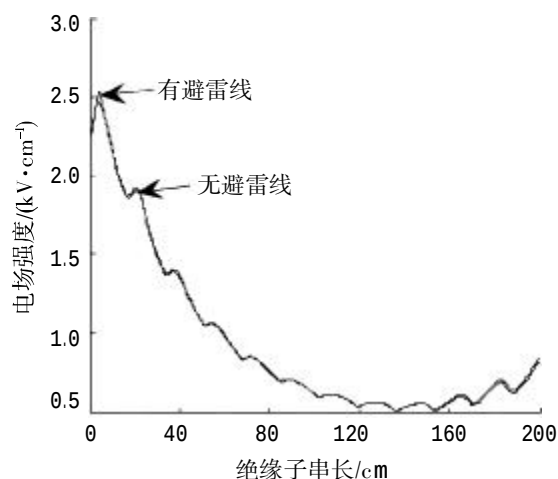


图 12 避雷线对绝缘子串周围空间电场的影响

Fig. 12 The influence of the ground wire to the electric field around the insulator string

分布规律无明显关系。V 型串、耐张串、双联悬垂串、单联悬垂串外沿空间最大电场分别为 2.914、2.765、2.548、2.347 kV/cm, 最大差值为 19.5%。

3.6 绝缘子型式的影响

不同绝缘子型式其空间电场分布的比较见图 15。由图 15 可知, 两种型式的瓷绝缘子具有不同的结构高度、公称直径、伞型等, 使得其在相同位置处具有不同的电场值。如图 15 中当 $d=15.0$ cm 时, XP-160 型绝缘子串外沿空间电场分布比较平滑, 受绝缘子瓷件的影响已经很小, 而 XWP-160 型绝缘子串外沿空间电场分布仍旧具有瓷件—空气两种介质电场分布特征, 受绝缘子瓷件的影响较大, 使得两者的电场分布规律有所不一致; 当 $d=20.0$ cm 时, XWP-160 型和 XP-160 型绝缘子串外沿空间电场已经受瓷件的影响很小, 其电场分布规律基本一致。

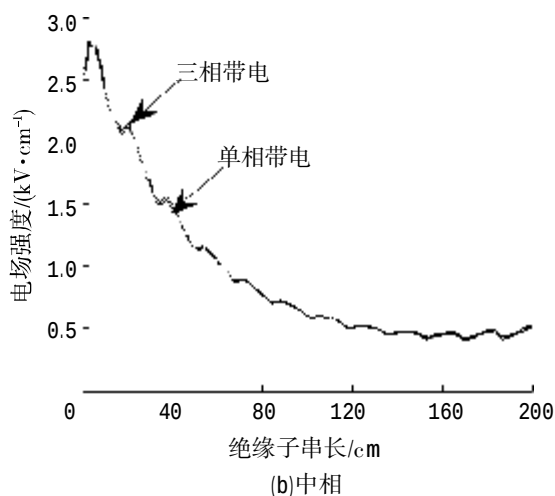
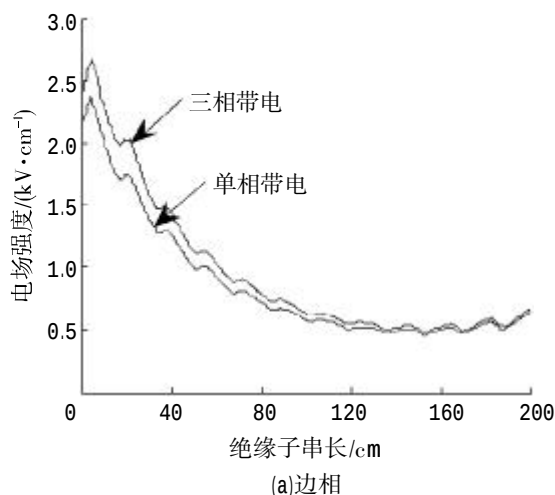


图 13 边相与中相绝缘子串周围空间电场分布比较

Fig. 13 The comparison between the electric field around the brim and middle insulator strings

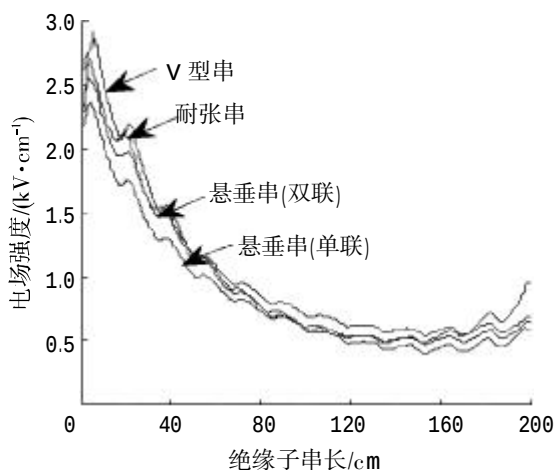


图 14 绝缘子串型式对其周围空间电场的影响

Fig. 14 The influence of string types to the electric field around the insulator strings

3.7 污秽状态的影响

国内外对污秽绝缘子串的沿面电场分布特性已有大量的研究,但对其空间电场的研究甚少。该文建立了污秽瓷绝缘子串的空间电场三维仿真模型来分

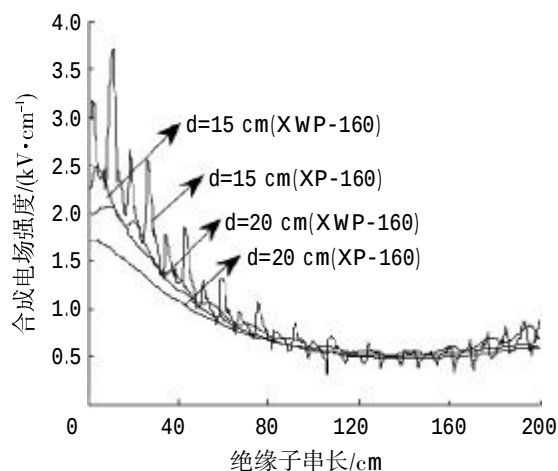


图 15 不同绝缘子型式其空间电场分布的比较

Fig. 15 The comparison of space electric field distribution of different insulators

析其未起弧时的空间电场分布特征。污秽层厚度为 0.2 mm,为均匀污秽,文[25]指出污秽的相对介电常数在高频时为 72.8~81.0,而介电常数随频率减小而增加,所以文中取污秽的相对介电常数为 79.0。绝缘子表面电导率 σ_s ($\mu\text{s}/\text{cm}$) 与等值覆盐盐密 ESDD(mg/cm^2)和灰密 NSDD(mg/cm^2)的关系等价转换采用文[26]通过试验得到的计算公式,即

$$\sigma_s = 230 \times \text{ESDD} \times (\text{NSDD})^{0.575} \quad (1)$$

有限元求解方法采用与文[2]的求解方法一致,即采用复介电常数法求解。污秽瓷绝缘子串的三维模型见图 16。湿润污秽下绝缘子串的空间电场分布见图 17。由图 17 可看出,绝缘子串在干燥污秽时其周围空间电场分布与清洁时基本一致,干燥污秽对绝缘子串的空间电场分布影响较小;在湿润污秽条件下,绝缘子串空间电场分布发生了明显改变,电场分布曲线与干净绝缘子串相比有剧烈的波动。这是由于运行电压使污秽绝缘子表面多处发生了电晕,导致该处附近的电场发生畸变,从而改变其电场分布规律。随着覆盐密度的增加,绝缘子串高压侧的第 1 片绝缘子伞裙处的空间电场值也逐渐增大,若此处的沿面电场强度大于空气的电离场强时将导致该处产生局部电弧,降低绝缘子的绝缘强度^[27-28]。

4 结论

1)在计算瓷绝缘子串周围的空间电场时,可以忽略绝缘子伞下棱以及避雷线的影响,但需考虑输电导线、杆塔、绝缘子型式及其布置方式等因素的影响。

2)绝缘子串内部的电场分布与沿瓷绝缘子伞裙—空气—伞裙路径的电场分布有明显的规律性。随着测量距离增加,绝缘子串的空间电场值衰减变

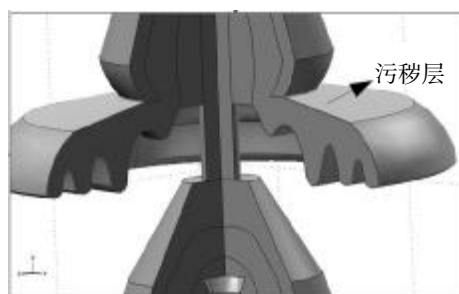


图 16 污秽仿真模型局部图

Fig. 16 Part-graph of the pollution simulation model

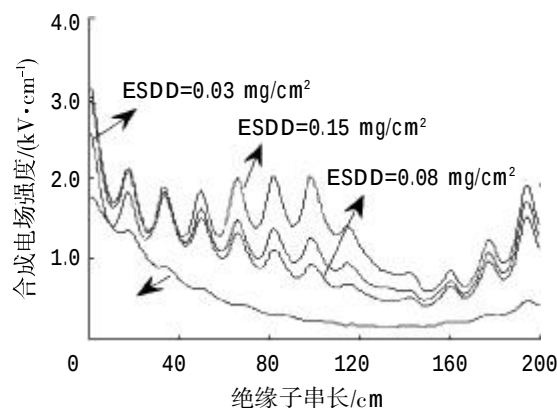


图 17 湿润污秽下绝缘子串的空间电场分布

Fig. 17 The space field distribution of insulator strings under wet pollution

化量减小,变化率增大。

3)门型与酒杯型杆塔的绝缘子串的空间电场分布规律相近,中相的电场值相近,边相的电场值相差较大。

4)绝缘子型式和其表面干燥污秽对绝缘子串的空间电场分布规律无影响,湿润污秽对其有较大的影响。

参考文献:

- [1] 盛剑霓.电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 司马文霞, 邵进, 杨庆. 应用有限元法计算覆冰合成绝缘子电位分布[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 21-25.
SIMA Wen-xia, HAO Jin, YANG Qing. Calculation of potential distribution to 220 kV icing non-ceramic insulators by finite element method [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4): 21-25.
- [3] 黄欢, 蒋兴良, 罗利云, 等. 超、特高压直流线路瓷和玻璃绝缘子污闪特性研究[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 424-427.
HUANG Huan, JIANG Xing-Liang, LUO Li-yun, et al. Pollution flashover performances porcelain and glass insulators intended for EHV/ UHV DC transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 424-427.
- [4] ASENJO S E, MORALES O N. Low frequency complex fields in polluted insulators [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, 17(3): 262-268.
- [5] 张波, 江秀臣, 曾奕, 等. 基于 C8051F330 和 RTX51Tiny 的绝缘子串分布电压测量仪的设计[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 380-383.
ZHANG Bo, JIANG Xiu-chen, ZENG Yi, et al. Design of measuring apparatus for high voltage insulator's distributed voltage based on C8051F330 and RTX51tiny [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 380-383.
- [6] 袁致川. 沿绝缘子串电位分布的数值算法[J]. 高电压技术, 1997, 23(6): 69-80.
YUAN Zhi-chuan. Calculation of potential distribution along and around an insulator string [J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(6): 69-98.
- [7] 沈鼎申, 张孝军, 万启发, 等. 750 kV 线路绝缘子串电压分布的有限元计算[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 54-57.
SHEN Ding-shen, ZHANG Xiao-jun, WAN Qi-fa, et al. Calculation of voltage distribution along insulator of 750 kV by finite element method [J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 54-57.
- [8] 马春华. 线路避雷器和绝缘子串的伏秒特性配合问题研究[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 68-69.
MA Chun-hua. Study on voltage-time characteristic coordination between line arrester and insulator string [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 68-69.
- [9] 杜轶, 蒋兴良, 林峰, 等. PRTV 涂料对绝缘子串交流闪电压的影响[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 135-138.
DU Yuan, JIANG Xing-liang, LIN Feng, et al. Effect of PRTV coating on AC flashover voltage of ice-covered insulator strings [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 135-138.
- [10] QUE Wei-guo, SEBO S A. Electric field and voltage distributions along non-ceramic insulators [D]. USA: The Ohio State University, 2002.
- [11] QUE Wei-guo, SEBO S A. Electric field and potential distributions along dry and clean non-ceramic insulators [J]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, 12(3): 437-440.
- [12] 蒋一平, 陈安明, 蒋兴良, 等. 预染污方式对瓷和玻璃绝缘子人工覆冰交流闪络电压影响的研究 [J]. 高压电器, 2010, 46(5): 42-46.
JIANG Yi-ping, CHEN An-ming, JIANG Xing-liang, et al. Effects of pre-polluting modes on artificial icing AC flashover characteristics of porcelain and glass insulators [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 42-46.
- [13] KAANA-NKUSI S, ALEXANDER P H, HACKAM R. Potential and electric field distributions at a high voltage insulators shed [J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1988, 23(2): 307-317.

- [14] ZHAO T, COMBER M G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 313-318.
- [15] EL-KISHKY H, GORUR R S. Electric potential and field computation along AC HV insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(11): 982-990.
- [16] 顾乐观, 张建辉, 孙才新. 计算染污绝缘子沿面电场分布的部分优化模拟电荷法[J]. 电机工程学报, 1993, 13(10): 65-71.
- GU Le-guan, ZHANG Jian-hui, SUN Cai-xin. Partially optimized charge simulation method for calculating electrical field distribution along pollution insulator [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(10): 65-71.
- [17] 杨帆, 李家祥, 姚德贵, 等. 基于模拟电荷法的绝缘子电场非接触式测量法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 95-99.
- YANG Fan, LI Jia-xiang, YAO De-gui, et al. Charge simulation method based insulator non-touching electric field mapping method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 95-99.
- [18] ZHANG Bo, HE Jin-liang, CUI Xiang, et al. Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission tower by coupling CSM with BEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 543-546.
- [19] KONTARGYRI V T, PLATI L N, GONOS I F, et al. Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string [J]. Measurement, 2008(41): 471-480.
- [20] 张晓明, 杨新华. 复合绝缘子运行过程中的损伤蠕变分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(3): 10-13.
- ZHANG Xiao-ming, YANG Xin-hua. Creep damage analysis for composite insulators in service[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(3): 10-13.
- [21] 王颖, 马西奎, 邱关源. 渐近边界条件在轴对称无界高压静电场计算中的应用[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 62-66.
- WANG Ying, MA Xi-kui, QIU Guan-yuan. The application of the asymptotic boundary conditions technique in the numerical analysis of axisymmetrical unbounded high-voltage static field [J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 62-66.
- [22] 张国强, 张元录, 崔翔. 高压套管均压球电极形状优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 37-40.
- ZHANG Guo-qiang, ZHANG Yuan-lu, CUI Xiang. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 37-40.
- [23] 张强, 王维庆, 李长凯. 均压环对改善复合绝缘子的电场分布影响[J]. 电瓷避雷器, 2010(4): 26-29.
- ZHANG Qiang, WANG Wei-qing, LI Chang-kai. Effect of grading rings for improving the electric field distribution of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(4): 26-29.
- [24] 李自品, 段开洪, 刘生琳, 等. 基于子模型法的 330 kV 线路绝缘子串电压分布计算[J]. 武汉大学学报, 2006, 39(1): 92-96.
- LI Zi-pin, DUAN Kai-hong, LIU Sheng-lin, et al. Voltage distribution calculation and analysis of insulator strings on 330 kV transmission line based on sub-model method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(1): 92-96.
- [25] 高强, 曾常安, 李和明. 复介电常数在绝缘子污秽检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 72-76.
- GAO Qiang, ZENG Chang-an, LI He-ming. A study of contamination detecting of insulators using the complex dielectric constant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 72-76.
- [26] 苑吉河. 输电线路绝缘子串交流污闪特性及放电过程研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- YUAN Ji-he. Study on AC pollution flashover performance and discharge process of transmission line insulators[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [27] 王镔. 直流悬式系列瓷绝缘子设计性能及应用[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 13-18.
- WANG Bin. Design performance and application of DC suspension porcelain insulators [J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(1): 13-18.
- [28] 高军, 王永晖. 悬式绝缘子头部形状对电气性能的影响[J]. 电瓷避雷器, 2010(6): 13-15.
- GAO Jun, WANG Yong-hui. The influence of suspension insulator head structure to its electrical performance [J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(6): 13-15.

夏强峰(1984—), 男, 硕士研究生, 从电气高压试验工作。

2011 年印度清洁能源投资创历史新高

简讯

据彭博新能源财经(BNEF)公司 2012 年 2 月 3 日发布的报告,印度的清洁能源投资 2011 年达到 103 亿美元,比 2010 年投入 68 亿美元高出约 52%。这是世界上任何重要经济体中最高增长数字,并提高了风能和太阳能的成本竞争力。印度 2011 年清洁能源投资额约占当年全球清洁能源投资总额的 4%。