

劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响

蒋兴良, 夏强峰, 胡琴, 舒立春, 孙才新

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Influence of Deteriorated Insulator on the Electric Field Distribution of Overhang String

JIANG Xing-liang, XIA Qiang-feng, HU Qin, SHU Li-chun, SUN Cai-xin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Existence of deteriorated insulators is a direct threat to the safety of power system operation. With the method combining simulation analysis and laboratory test, the space electric field distribution of overhang porcelain insulator string with and without deteriorated insulator was analyzed, and the analysis was focused on the influence of measurement distance, position, type and number of deteriorated insulators, and pollution on the space axial electric field distribution of overhang string. Study showed: deteriorated insulator had the greatest effect on the axial electric field of insulator string; the measurement distance farther, the rate of the axial electric field changed smaller; the rate of axial electric field change increased with the deteriorated insulator approaching the high-voltage end, became the smallest and almost stayed constant in the middle position, and had a slight increase near to the low-voltage end; the rate of axial electric field change with two adjacent deteriorated insulator was greater than that with two separate deteriorated insulator; just by analyzing axial electric field change rate of three insulators in the low-voltage end of the 220 kV overhang string, we can determine whether it contains a zero-value insulator. Therefore, the deteriorated insulator and its position can be detected by analyzing the space axial electric field change of insulator string directly.

KEY WORDS: high voltage insulation technology; deteriorated insulator; porcelain insulator string; electric field distribution; finite element

摘要: 劣化绝缘子的存在会直接威胁到电力系统的安全运行。以仿真和实验室试验相结合的方法, 分析悬垂瓷绝缘子

串中有/无劣化绝缘子时的空间电场分布特性, 着重分析了测量距离、劣化绝缘子位置和片数及其型式、污秽对悬垂绝缘子串空间轴向电场的影响。结果表明: 劣化绝缘子对空间轴向电场分量影响最大; 测量距离越远, 其空间轴向电场的变化率越小; 劣化绝缘子位置靠近高压端时, 其空间轴向电场变化率增加, 中间位置时最小且基本不变, 靠近低压端时又略微增加; 2片绝缘子连续劣化比不连续劣化引起空间轴向电场变化率大; 对于220 kV线路悬垂串只需分析低压端的3片绝缘子空间轴向电场变化率就可判断出串中是否含有零值绝缘子。因此, 直接分析绝缘子串空间轴向电场的变化能够判断出劣化绝缘子及其位置。

关键词: 高电压绝缘技术; 劣化绝缘子; 瓷绝缘子串; 电场分布; 有限元

0 引言

绝缘子串是输电线路的重要组成部分, 绝缘子的闪络故障会引起整条线路的故障, 导致不必要的经济损失; 绝缘子串周围空间电场分布特征信息可以用来检测线路中的故障绝缘子^[1], 国内外已经对其开展了相关研究^[2-6]。文献[7-8]提出可根据绝缘子表面轴向电场的变化规律检测劣化绝缘子。文献[9]分析得到了绝缘子劣化对其表面径向和轴向电场分量的影响。文献[10]基于模拟电荷法的局部电场逆计算, 提出了检测劣化绝缘子的非接触式电场测量法。文献[11-12]研究了合成绝缘子内部导通性故障及其表面污秽和水分对合成绝缘子表面电场的影响。文献[13]研究了劣化绝缘子对直流绝缘子串谐波电场的影响, 提出了检测直流劣化绝缘子的谐波电场法。可见目前的研究集中在劣化绝缘子对绝缘子串表面电位分布和沿伞裙外沿处电场分布的影响。本文基于这些研究成果分析了劣化绝缘子对绝缘子串空间电场分布特性的影响, 以仿真和试验相结合的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB-724503); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A19)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724503); Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006BAA02A19).

方法重点分析劣化绝缘子对空间轴向电场的影响，为非接触式检测劣化绝缘子提供一定的借鉴。

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近似认为是稳定的，且假设绝缘子串在所加电压下无电晕产生，绝缘子清洁干燥，空气湿度低，可忽略沿面泄漏电流和空间电流，绝缘子钢帽上的电荷保持不变。因此可以采用静电场分析瓷绝缘子串周围的空间电场。本文以 13 片 XP-160 瓷绝缘子为研究对象，采用 Comsol 3.4 有限元软件进行仿真分析。绝缘子的具体技术参数和各部分相对介电常数如表 1，2 所示。

表 1 XP-160 绝缘子技术参数

Tab. 1 Technical parameters of XP-160 insulator

结构	盘径/mm	爬电距离/mm	钢脚长度/mm	钢脚直径/mm	钢帽高度/mm	钢帽(上下)直径/mm
高度/mm	255	305	62	21	128	74/107

表 2 各介质材料的相对介电常数

Tab. 2 Relative permittivity of the dielectrics

介质材料	空气	瓷	水泥
相对介电常数	1.0	6.0	14.0

本文对开场域问题的处理选用人工截断法^[14]，设置边界为零电荷/对称。根据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 1 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，可以看出，空气介质厚度大于 4.0 m 时对计算结果的影响不明显。因此，本文仿真计算时取空气介质厚度为 4.0 m。

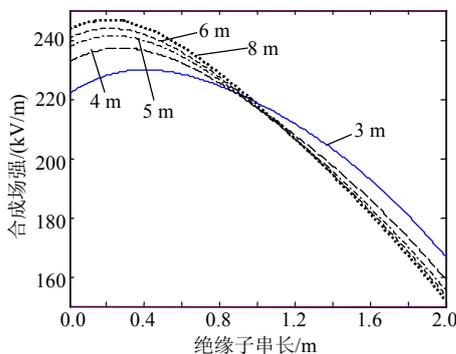


图 1 空气介质厚度改变时绝缘子串周围空间的电场分布

Tab. 1 Electric field distribution in the vicinity of insulators under different thickness of air dielectric

本文仿真计算时采用虚拟大介电常数法^[15]来考虑悬浮导体。仿真中用圆柱导体来模拟金具和导线的大小和形状，导线长度取为绝缘子串长度的 4

倍，用平面模拟横担复杂的网状结构^[16]。整个模型包含横担、绝缘子串、上/下端金具、导线及空气，如图 2(a)所示。瓷绝缘子串的高压端、导线及该侧金具的电位设置为 220 kV 线路的相电压峰值 179 kV，低压端、横担及该侧金具的电位设置为 0kV。模型中除地面及地面与绝缘子串的距离按实际值设定以外，其他 5 个界面均设为人工截断边界。

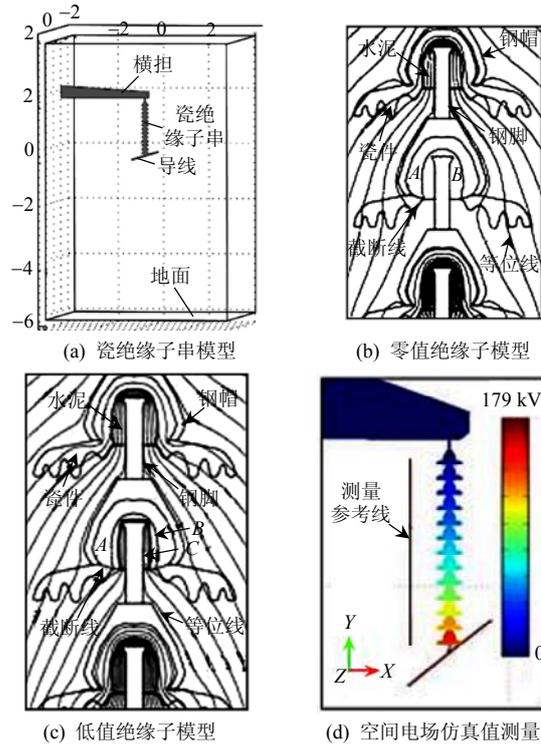


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

劣化瓷绝缘子在运行状态下时，其钢帽与钢脚之间的瓷和水泥中存在的非贯穿和贯穿性空气间隙会被击穿而短路^[17]。仿真时对于存在贯穿性气隙的劣化绝缘子(零值绝缘子)设置其钢帽与钢脚之间的绝缘部分(即图 2(b)中区域 A 和 B)为金属导体材料属性。对于存在非贯穿性气隙的劣化绝缘子(低值绝缘子)设置其钢帽与钢脚之间绝缘中的气隙部分(即图 2(c)中区域 A 和 B)为金属导体材料属性，其余部分仍设置为绝缘材料属性，如图 2(c)中的区域 C，同时改变 A 与 B 总区域的大小来模拟绝缘子的不同劣化程度。钢帽部分瓷件与瓷盘部分由截断线区分开。空间电场仿真值的测量参考线如图 2(d)所示。

2 瓷绝缘子串电场分布仿真结果及分析

2.1 良好绝缘子串的电场分布情况

良好瓷绝缘子串的电场分布如图 3 所示，图中

d 为电场测量参考线或测量参考点到绝缘子串中轴的距离。高压端到低压端的绝缘子编号依次为 No.1~No.13。

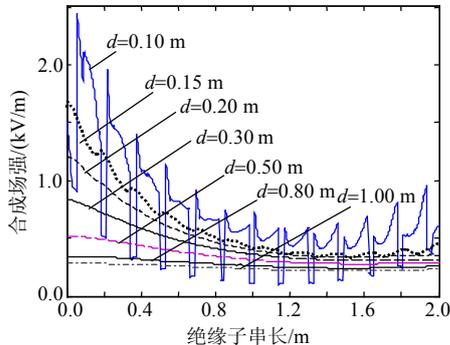


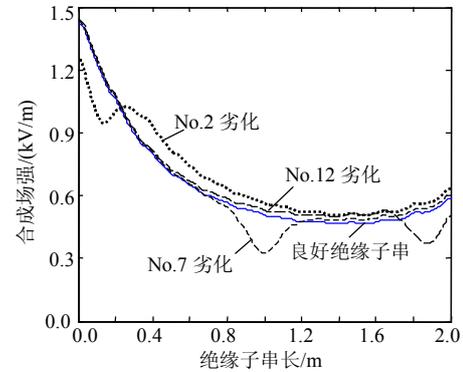
图3 良好瓷绝缘子串的电场分布
Fig. 3 Distribution of electric field around fine insulator string

由图3可知: 1) 整串绝缘子的电场分布极不均匀。靠近导线侧第1片绝缘子电场值较高, 达到2.46 kV/cm, 中部绝缘子电场值较低, 最低仅为0.11 kV/cm, 靠近横担侧(No.12, No.13)绝缘子电场值分别为0.29和0.36 kV/cm, 比中间几片略有增大。2) 沿瓷绝缘子伞裙-空气-伞裙路径的电场分布呈现出明显的规律性。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, 但减小量很小且保持较小的电场值; 从伞裙进入空气后, 靠近伞裙上表面附近空气中的电场再次出现极大值; 随后在2个伞裙之间的空气中电场值逐渐减小, 在下一片绝缘子伞裙与空气的交界面处急剧减小, 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值; 位于高压端的伞裙内部及其之间的空气中电场值较大, 中部的最小, 低压端的略微增加。因此, 每片绝缘子的电场最大值均出现在靠近伞裙表面附近的空气中。3) 当 d 从0.15 m增加到0.20 m时, 绝缘子串空间最大电场值变化了28.2%, 当 d 由0.20 m增加到0.30 m时变化了29.9%, 当 d 再增加0.10 m时变化了37.7%, 可见随着 d 的增加, 空间电场的衰减变化量逐渐减小, 变化率逐渐增大。

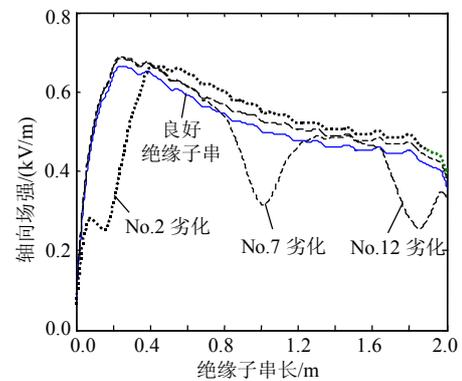
2.2 含有1片劣化绝缘子的绝缘子串电场分布情况

由于劣化绝缘子分担的电压较小, 其钢脚和钢帽之间的电位线分布较稀疏, 如图2(b)和(c)所示, 使得其附近空间电场值明显减小。图4为含有1片劣化(贯穿气隙)绝缘子($d=0.15$ m)时绝缘子串的电场分布。可以看出, 劣化绝缘子周围的空间电场值

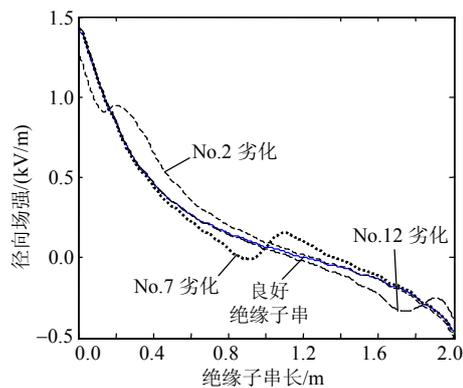
明显减小, 其对空间电场各分量影响一致, 但总体上对轴向分量的影响最大。因此本文以空间轴向电场的变化来分析劣化绝缘子位置和片数及距离 d 的变化对悬垂串周围空间电场的影响。



(a) 合成电场强度



(b) 轴向电场强度



(c) 径向电场强度

图4 劣化绝缘子对悬垂串空间电场强度的影响

Fig. 4 Influence of deteriorated insulator on space electric field of the overhang string

图5为不同劣化程度(即气隙长度不同)对劣化绝缘子轴向电场影响的仿真结果, 图中2/3贯穿气隙指钢帽和钢脚之间绝缘厚度的2/3存在破裂空气间隙, 其他类似。由图5可知: 随着劣化绝缘子劣化程度的增加, 其对空间轴向电场的的影响越明显。当劣化程度不同时, 劣化绝缘子处的空间电场值仍

降低，但降低幅度不同。1/3 贯穿气隙的劣化绝缘子对其空间轴向电场分布特性的影响已经不明显。

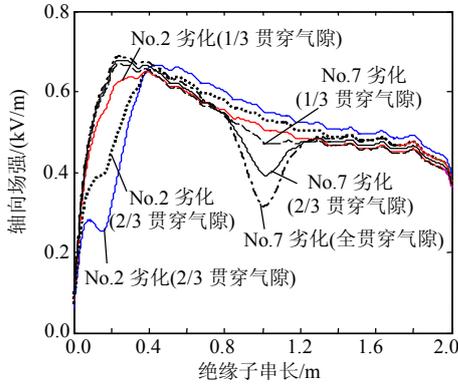


图 5 劣化程度对绝缘子串空间轴向电场的影响
Fig. 5 Influence of deterioration degree on the axial electric field distribution of overhang string

2.3 含有 2 片劣化绝缘子的绝缘子串电场分布情况

实际运行中一相瓷绝缘子串可能存在 1 片以上的劣化绝缘子。图 6 为当 $d=0.15\text{ m}$ 时绝缘子串中含有 1, 2 片劣化绝缘子(全贯穿气隙)的情况下空间轴向电场的变化情况。由图 6 可知：2 片连续劣化时空间轴向电场变化比 1 片劣化明显；2 片不连续劣化时每片对空间轴向电场的影响与同位置的单片劣化时基本一致，如图 6 中的 No.3；2 片连续劣化引起空间轴向电场畸变的程度比不连续劣化明显；2 片不连续劣化对空间轴向电场的影响不相互干扰。由大量的仿真可知：2 片连续和不连续劣化的各种组合对空间轴向电场的影响与上述一致。

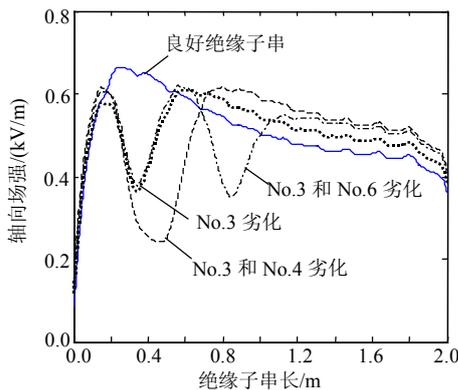


图 6 劣化绝缘子片数对空间轴向电场的影响
Fig. 6 Influence of the number of deteriorated insulators on the axial electric field distribution of overhang string

3 试验结果及分析

3.1 试验布置

为验证仿真结果，在实验室内进行了大量的试验。试验中模拟 220 kV 线路的实际运行情况，所

加交流电压有效值为 127.0 kV，模拟导线长度 5.0 m。电场测量仪为综合场强测量分析仪，主机与探头之间采用光纤连接，探头可同时测量 x 、 y 、 z 3 个方向电场值和合成电场值。试验测量原理如图 7 所示。

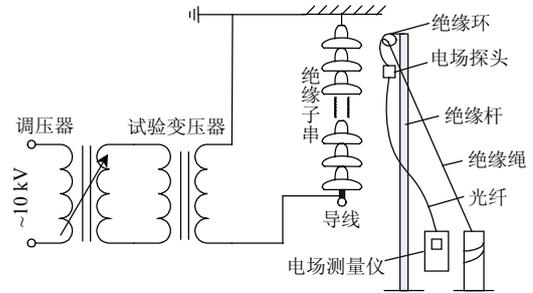


图 7 试验测量接线图
Fig. 7 Wiring diagram of test measurement

试验中每次测量由低压端到高压端依次测量 13 个点，再由高压端到低压端依次测量 13 个点，取 2 次测量值的平均值得到 1 组测量数据。试验所用低值绝缘子的绝缘电阻为 $40\text{ M}\Omega$ ，零值绝缘子采用地线短路钢脚钢帽来模拟，测量时短接地线背对探头。图 8 为清洁绝缘子串的试验与仿真结果，由图 8 可知，在大多数位置处实测值比计算值略微偏低，但两者的变化规律基本吻合。由此证明，利用有限元仿真计算方法对瓷绝缘子串的电场分布规律进行仿真分析是可行的。

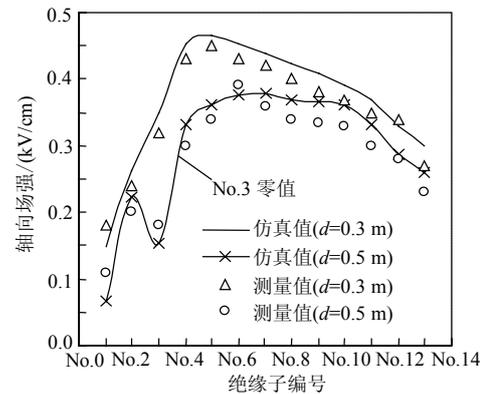


图 8 仿真与试验结果比较
Fig. 8 Comparison between simulation and test results

3.2 劣化绝缘子对轴向电场变化率的影响分析

良好绝缘子串中每片绝缘子对应有不同的电场值，电场的变化量不能反映不同劣化绝缘子位置对其空间电场变化的影响。本文以空间轴向电场变化率 $\sigma_{i,j}$ 分析劣化位置和距离 d 对其空间电场变化的影响，其表达式为

$$\sigma_{i,j} = \left| \frac{\Delta E_{i,j,f} - \Delta E_{i,S}}{\Delta E_{i,S}} \right| \quad (1)$$

式中： i 为各个绝缘子位置； j 为劣化绝缘子所在位置($i, j=1\sim 13$)； f 代表含有劣化绝缘子的绝缘子串； S 代表良好绝缘子串。

图9为当 $d=0.3, 0.5\text{ m}$ 时劣化绝缘子位置对空间轴向电场变化率的影响，可以看出试验结果与仿真结果基本一致。劣化绝缘子靠近高压端时其空间电场变化率增加；远离高压端时其空间电场变化率逐渐减小；位于绝缘子串中部时其空间电场变化率最小且基本保持不变；靠近低压端时其空间电场变化率又有所增加。当 $d=0.30\text{ m}$ 时，最小电场变化率为0.13；当 $d=0.50\text{ m}$ 时，最小电场变化率为0.04。可见随着距离 d 的增大，劣化绝缘子位置处的空间电场变化率逐渐减小。

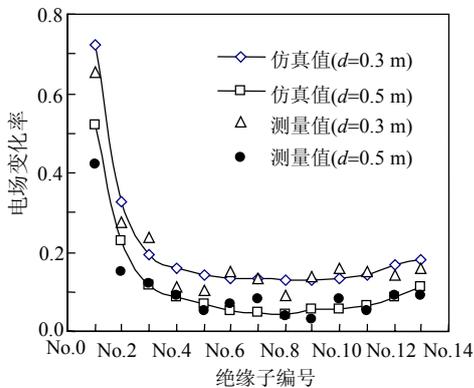


图9 劣化绝缘子位置对轴向电场变化率的影响

Fig. 9 Influence of deteriorated insulator's position on the rate of the axial electric field change

表3为No.1, No.3, No.5, No.9, No.11, No.13分别为劣化绝缘子时绝缘子串空间轴向电场变化率；表4为No.3, No.4; No.6, No.7; No.10, No.11绝缘子分别同时为零值时绝缘子串空间轴向电场的变化率；表5为No.2, No.4; No.6, No.8; No.10, No.12绝缘子分别同时为零值时绝缘子串空间轴向电场的变化率。可以看出，劣化绝缘子片数对空间轴向电场的影响其试验结果与仿真结果基本一致；低值和零值绝缘子对空间电场的影响一致，但低值绝缘子引起的空间电场变化率不如零值明显。绝缘子的劣化程度越小，距离绝缘子串越远，劣化绝缘子对空间电场的影响越小。

表3 1片绝缘子劣化时($d=0.3\text{ m}$)空间轴向电场的变化率
Tab. 3 Influence of one deteriorated insulator on the rate of the axial electric field change($d=0.3\text{ m}$)

绝缘子	$\sigma_{1,1}$	$\sigma_{3,3}$	$\sigma_{5,5}$	$\sigma_{9,9}$	$\sigma_{11,11}$	$\sigma_{13,13}$
零值	0.652	0.236	0.103	0.137	0.157	0.159
低值	0.321	0.120	0.069	0.054	0.063	0.066

表4 2片连续零值时绝缘子空间轴向电场的变化率
Tab. 4 Rate of the axial electric field change with two neighboring zero-value insulator

d/m	$\sigma_{3,3}$	$\sigma_{4,4}$	$\sigma_{6,6}$	$\sigma_{7,7}$	$\sigma_{10,10}$	$\sigma_{11,11}$
0.3	0.354	0.306	0.253	0.243	0.254	0.250
0.5	0.276	0.224	0.183	0.189	0.162	0.159

表5 2片不连续零值时绝缘子空间轴向电场的变化率
Tab. 5 Rate of the axial electric field change with two separate zero-value insulator

d/m	$\sigma_{2,2}$	$\sigma_{4,4}$	$\sigma_{6,6}$	$\sigma_{8,8}$	$\sigma_{10,10}$	$\sigma_{12,12}$
0.3	0.382	0.181	0.163	0.171	0.156	0.151
0.5	0.319	0.153	0.147	0.149	0.128	0.123

综合仿真和试验数据分析可知：绝缘子串中存在劣化绝缘子时，不但其本身附近的空间电场会发生变化，还会影响其他绝缘子附近的空间电场。高压端的绝缘子劣化时，转移到其他绝缘子上的电压较多，整串绝缘子中各绝缘子位置处的空间电场变化明显；当劣化绝缘子位于中部和低压端时，转移到其他绝缘子上的电压较少，其他绝缘子位置处的电场变化较小。

表6为当 $d=0.3\text{ m}$ 时No.11, No.12, No.13绝缘子的空间轴向电场变化率。由表6可知，当劣化绝缘子在串中任何位置时，横担侧3片绝缘子周围空间轴向电场的变化率基本稳定，且3片中至少有2片的空间轴向电场变化率大于5.0%。基于敏感绝缘子法^[18]的思想，本文定义横担侧3片绝缘子为敏感绝缘子组，通过测量这3片绝缘子的空间轴向电场变化率，就可判断出绝缘子串中是否含有零值绝缘子，但试验中处于绝缘子串中部的40 M Ω 低值绝缘子此规律不明显。由于测量低压端绝缘子的周围空间电场时不易受导线和绝缘子电晕的干扰，测量数据具有一定的稳定性，使判别比较小的变化量有

表6 No.11, No.12, No.13绝缘子的空间轴向电场变化率
Tab. 6 Rate of the axial electric field change of No.11, No.12 and No.13 insulators

劣化位置 j	含有1片零值的绝缘子串			含有1片低值的绝缘子串		
	$\sigma_{1,j}$	$\sigma_{2,j}$	$\sigma_{3,j}$	$\sigma_{1,j}$	$\sigma_{2,j}$	$\sigma_{3,j}$
No.1	0.136	0.116	0.167	0.101	0.121	0.150
No.2	0.089	0.089	0.090	0.073	0.075	0.082
No.3	0.067	0.067	0.068	0.059	0.059	0.064
No.4	0.056	0.056	0.057	0.045	0.046	0.046
No.5	0.051	0.050	0.055	0.035	0.037	0.038
No.6	0.050	0.049	0.052	0.026	0.030	0.022
No.7	0.046	0.051	0.050	0.015	0.022	0.025
No.8	0.054	0.051	0.057	0.013	0.012	0.017
No.9	0.050	0.056	0.064	0.020	0.041	0.061
No.10	0.024	0.052	0.069	0.046	0.028	0.013
No.11	0.150	0.030	0.072	0.063	0.058	0.046
No.12	0.049	0.144	0.073	0.059	0.064	0.091
No.13	0.083	0.066	0.159	0.045	0.097	0.066

了可行性，有利于劣化绝缘子的现场检测。

3.3 绝缘子型式的影响

不同型式的绝缘子具有不同的结构高度、伞型、盘径、钢帽、钢脚，从而具有不同的电场分布值^[19]。图 10 为不同型式劣化绝缘子对其周围空间电场分布影响的试验结果($d=0.30\text{ m}$)。由图 10 可知：XP-160 型和 XWP-160 型绝缘子串在零值绝缘子位置处的空间轴向电场明显降低。当绝缘子串中 No.2, No.7 分别为零值绝缘子时，XWP-160 型的空间轴向电场变化率为 29.4%、16.1%。XP-160 型的空间轴向电场变化率为 27.6%、13.2%。绝缘子型式不同导致良好和劣化绝缘子串周围空间轴向电场值及其差值不同，但其差值变化与绝缘子型式无明显关系。

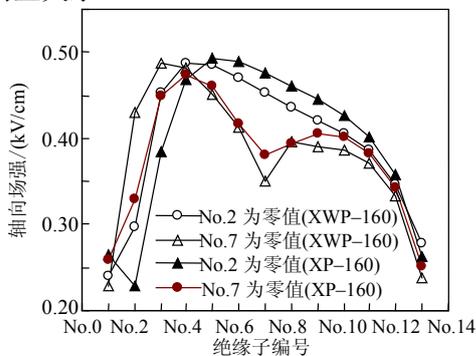


图 10 劣化绝缘子型式对绝缘子串空间轴向电场的影响
Fig. 10 Influence of insulator types on the axial electric field around the insulator string

3.4 污秽的影响

湿润污秽对绝缘子的表面电场影响较大^[20]，污秽和水分会增加绝缘子表面的泄漏电流，绝缘子串的电场按电阻分布，从而改变其电场分布。在实验室中测量了盐密为 0.03, 0.08, 0.15 mg/cm^2 的 XP-160 绝缘子串($d=0.3\text{ m}$)的空间电场。为模拟湿润污秽，测量前向涂有污秽的绝缘子喷水，直到绝缘子表面出现一层小水珠为止。图 11 为盐密为

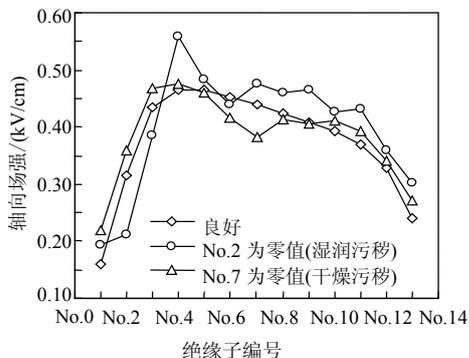


图 11 污秽对绝缘子串空间轴向电场的影响
Fig. 11 Influence of contamination on the axial electric field around the insulator string

$0.08\text{ mg}/\text{cm}^2$ 时的典型测量结果。可以看出：绝缘子表面(干湿)污秽度大小对绝缘子串周围空间电场影响较小，干燥污秽几乎不影响含有劣化绝缘子的绝缘子串空间电场分布，湿润污秽时劣化绝缘子位置处的电场仍有畸变；但由于绝缘子串许多地方发生电晕，其他位置处的电场也有明显波动变化。

4 结论

1) 瓷绝缘子外表面最大场强值出现在靠近伞裙表面附近的空气中，劣化时电场值减小；测量距离越远，劣化绝缘子引起空间电场的变化率越小。

2) 在空间三维电场中，绝缘子劣化对绝缘子串空间轴向电场分量的影响最明显，且其影响与劣化绝缘子位置有关，高压端和横担端较为明显，中部影响较小。

3) 多片绝缘子连续劣化对其空间电场变化率的影响大于间断劣化，且劣化绝缘子对空间电场的影响互不干扰。

4) 分析横担端 3 片瓷绝缘子轴向电场变化率($d=0.3\text{ m}$)即可判别 220 kV 线路悬垂串是否含有零值绝缘子。

5) 劣化绝缘子对绝缘子串周围空间电场的影响与绝缘子型式无明显关系，但污秽湿润会干扰根据空间电场变化来判别劣化绝缘子及其位置的结果。

参考文献

- [1] Kontargyri V T, Plati L N, Gonos I F, et al. Stathopulos. Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string[J]. Science Direct, Measurement, 2008(41): 471-480.
- [2] 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 Zhichuan. Calculation of potential distribution along and around an insulator string[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(6): 69-80(in Chinese).
- [3] Huo Feng, Chen Yong, Cai Wei, et al. Surface electrical field distribution simulation and insulation characteristics test of polluted insulators[J]. High Voltage Engineering, 2008, 12(12): 2621-2625.
- [4] Que Weiguo. Electric field and voltage distributions along non-ceramic insulators[D]. Ohio: The Ohio State University, 2002.
- [5] Que Weiguo, Sebo S A. Electric field and potential distributions along dry and clean non-ceramic insulators[C]. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Cincinnati, USA, 2001.
- [6] Kaana-Nkusi S, Alexander P H. Potential and electric field distributions at a high voltage insulators shed[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1988, 23(2): 307-317.
- [7] Vaillancourt G H, Bellerive J P, St-Jean M, et al. New live line tester

- for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(1): 208-219.
- [8] 程养春, 李成榕, 马晓华, 等. 电场法带电检测零值绝缘子的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 8-9.
Cheng Yangchun, Li Chengrong, Ma Xiaohua, et al. Study on on line detection of faulty insulators by electric field method[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 8-9(in Chinese).
- [9] Birlasekaran S, Li H J. Detection of faulty insulators on power transmission line[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000.
- [10] 陈涛. 基于非接触式的劣化绝缘子检测方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
Chen Tao. Study on non-contact detection for faulty insulators [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006(in Chinese).
- [11] Shaffner D H, Ruff D L, Vaillancourt G H. Experience with a composite insulator testing instrument based on the electric field method[C]. IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, Montreal, Canada, 2000.
- [12] 李成榕, 程养春. 电场测量法在线检测合成绝缘子内绝缘缺陷的研究[J]. 高电压技术, 1993, 25(3): 39-41.
Li Chengrong, Cheng Yangchun. The research of on-line detecting inside insulation defects of composite insulators with electric field measurement method[J]. High Voltage Engineering, 1993, 25(3): 39-41(in Chinese).
- [13] Shen Xiaojun, Jiang Xiuchen, Cheng Yangchun, et al. A novel method for live detection of faulty direct current insulators[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, 23(1): 24-29.
- [14] 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 Xikui, Qiu Guanyuan. 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(in Chinese).
- [15] 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 Guoqiang, Zhang Yuanlu, Cui Xiang. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 37-40(in Chinese).
- [16] 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 Zipin, Duan Kaihong, Liu Shenglin, et al. Voltage distribution calculation and analysis of insulator strings on 330 kV transmission line based on sub-model method[J]. Journal of Wuhan University, 2006, 39(1): 92-96(in Chinese).
- [17] 安玲. 架空输电线路状态检修技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
An Ling. Condition maintenance technique of the overhead power line[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2002(in Chinese).
- [18] 安玲, 江秀臣. 检测劣质绝缘子的新方法: 敏感绝缘子法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 109-112.
An Ling, Jiang Xiuchen. A new method of detection degradation insulator: sensitive insulator method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 22(9): 109-112(in Chinese).
- [19] El-Kishky H, Gorur R S. Electric potential and field computation along AC HV insulators[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 982-990.
- [20] Asenjo S E, Morales O N. Low frequency complex fields in polluted insulators[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1982, 17(3): 262-268.



蒋兴良

收稿日期: 2009-11-24。

作者简介:

蒋兴良(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高电压与绝缘技术及输电线路覆冰和防护研究工作, xljiang@cqu.edu.cn;

夏强峰(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术, xiaqiangfeng@126.com;

孙才新(1944—), 男, 工程院院士, 研究方向为高电压绝缘技术、电气设备在线监测与故障诊断。

(责任编辑 马晓华)