

# 电压变化对两回交叉跨越直流线路 地面合成电场影响的试验研究

谢莉, 陆家榆, 赵录兴, 何堃, 吴桂芳, 鞠勇

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

## Experimental Research on Ground Total Electric Field Affected by the Variation of Voltages of Two Crossing HVDC Transmission Lines

XIE Li, LU Jiayu, ZHAO Luxing, HE Kun, WU Guifang, JU Yong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** With the development of HVDC technology in China, the crossing of HVDC and UHVDC transmission lines has occurred frequently, which brings new challenges to the prediction and control technology of electromagnetic environment. In order to obtain the distribution characteristics and influence factors of the ground total electric field of two crossing HVDC transmission lines, it is of great importance to carry out the experimental research on the ground total electric field of two crossing HVDC lines. The outdoor crossing HVDC test line was built with 4-bundle conductor, and the array arrangement of electric field measurement devices was adopted for the experimental research on the influence of conductor voltage change on ground total electric field. The distribution characteristics of the ground total electric field in the crossing area were obtained, and the effects on ground total electric field by the polarities and corona intensities of the crossing conductors were summarized. The experimental results can provide basic data for the prediction of the total electric field, and give technical support for the design and environmental assessment of the crossing HVDC transmission lines.

**KEY WORDS:** ground total electric field; corona of conductor; variation of voltage; crossing HVDC transmission lines

**摘要:** 随着中国直流输电技术的发展, 高压、特高压直流线路交叉跨越的情况已频繁出现, 对电磁环境的预测和控制技术提出新的挑战。为获得两回交叉跨越直流线路地面合成电场的分布特性和影响因素, 亟需开展交叉跨越直流线路地面合成电场的试验研究。该文搭建4分裂导线的户外交叉跨越

直流试验线段, 采用阵列式布置的地面合成电场测试方式, 开展导线电压变化对地面合成电场影响的试验研究, 获得交叉跨越区域地面合成电场的分布特性, 并总结地面合成电场随导线交叉极性、电晕程度变化的规律。研究结果可为交叉跨越直流线路合成电场的预测研究提供基础数据, 为交叉跨越直流线路的设计和评价提供技术依据。

**关键词:** 地面合成电场; 导线电晕; 电压变化; 交叉跨越直流线路

## 0 引言

随着我国直流输电技术的发展, 已建和待建的特高压直流输电线路总数已达几十回<sup>[1-5]</sup>, 高压、特高压直流线路交叉跨越的情况已频繁出现, 而且今后将越来越多。很多新的技术问题随之而来, 其中之一是电磁环境预测和控制方面的技术挑战<sup>[6]</sup>。这是我国特高压技术发展遇到的新问题, 也是世界性的新问题。

预测和分析单回直流线路档距中部的合成电场时, 一般可忽略导线弧垂, 近似认为导线纵向各横截面上的电场分布相同, 可简化为二维平行平面场<sup>[7-8]</sup>。而在两回直流线路交叉跨越时, 上、下层导线交叉点附近的导线表面电场发生变化, 且与交叉处上、下层导线的极性组合和电压相关, 造成上、下层导线纵向各处的电晕程度不同, 导线电荷、空间离子和空间合成电场呈三维分布, 地面合成电场的分布特性显著区别于下层线路的地面合成电场或者两回线路单独产生的地面合成电场叠加。对于此类三维合成电场问题, 需要对其分布特性、影响因素、正负极性电场差别等重要问题开展研究, 掌

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“两回交叉跨越直流输电线路地面合成电场三维预测和控制技术研究”(GYB17201800203)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation “Research on 3-D Prediction Method and Control Measures of the Ground Total Electric Field of Two Crossing HVDC Transmission Lines” (GYB17201800203).

握地面合成电场的变化规律。

在计算方法方面,直流线路合成电场的三维方法是从二维发展而来。1989年,秦柏林等人就将通量线法扩展到了三维情况<sup>[9]</sup>,用来预测换流站模型中的合成电场。近年来,直流线路合成电场的三维计算方法有较快的发展,在标称电场求解、数值算法稳定性、计算效率等方面都有很大提升,三维计算方法已应用于直流输电线路邻近建筑物、树木、人体时的合成电场计算<sup>[10-12]</sup>。交叉跨越直流输电线路合成电场的三维计算方法也实现了突破,通量线法<sup>[13]</sup>、有限元法<sup>[14-15]</sup>、特征线法<sup>[16]</sup>都已应用于计算和分析中。但是,由于直流输电线路电晕放电受环境因素影响大<sup>[17-19]</sup>,并且正、负极导线电晕特性存在较大差别<sup>[20-21]</sup>,目前计算方法只有在特定环境条件下的预测结果能与试验结果较为接近,存在一定局限性。

在试验研究方面,直流输电线路地面合成电场的试验研究仍以二维问题为主<sup>[22-23]</sup>。关于交叉跨越直流线路的地面合成电场问题,未见国内外有系统性试验研究的报道。

为了掌握交叉跨越直流输电线路地面合成电场的分布特性和影响因素,亟需开展交叉跨越直流线路地面合成电场的试验研究。因此,本文搭建了两回交叉跨越直流试验线段,研究地面合成电场分布特性的测试布置方案。采用三维方法计算不同电压组合下的导线表面电场变化范围,通过改变上、下层导线电压,调整交叉跨越导线的电晕程度,试验获得地面合成电场的分布特性,总结电压变化对交叉跨越直流线路地面合成电场的影响规律。研究结果可为交叉跨越直流线路合成电场的三维预测方法提供基础数据,为高压直流线路的设计和环评提供技术支持。

## 1 两回交叉跨越直流线路地面合成电场的试验方案

### 1.1 两回交叉跨越直流模拟试验线段

为了模拟实际工程中直流线路交叉跨越的情况,在北京昌平特高压直流试验基地搭建了户外交叉跨越直流试验线段。

上层试验线段长100m,下层试验线段长55m,两回正负极均架设4×JL/G1A-95/15导线,交叉角为90°。试验线段架设的子导线半径虽然比实际工程稍小,但由于采用4分裂形式,且分裂间距达到

40cm,其等效半径与实际工程中基本的4分裂导线等效半径接近,二者的电晕特性也相近。

为了使交叉跨越直流线路导线达到不同的电晕程度,两回线路的直流试验电源均为0~±400kV连续可调。同时,杆塔设计时采用多个导线挂点,导线对地高度和极间距可调。户外交叉跨越直流试验线段如图1所示。

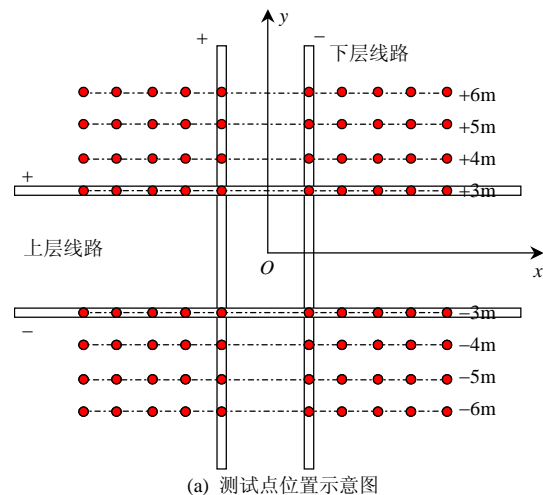


图1 户外交叉跨越直流试验线段

Fig. 1 Photograph of outdoor crossing HVDC test lines

### 1.2 地面合成电场测试布置方案

交叉跨越直流线路与单回直流线路的地面合成电场分布有较大区别。为了获得地面合成电场的整体分布情况,需在地面多个位置上布置合成电场测量仪<sup>[24]</sup>,同时进行测试。本文采用80个合成电场测试仪进行阵列式布置,如图2所示。同时建立坐标系,如图2(a),线路中心为原点,垂直于下层线路的方向为x轴,下层负极导线侧为x轴正向,垂直于上层线路的方向为y轴,上层正极导线侧为y轴正向。则所有的合成电场测试点可以看作8条垂直于下层线路的横向分布,根据它们对应的y坐标分别记为-6、-5、-4、-3、+3、+4、+5和+6m处横向分布。上层正极导线和下层负极导线的交叉点位于Oxy平面第一象限,下文将简称为上正下负象限,同理,第二到第四象限依次简称为上正下正





(b) 测试点位置照片

图 2 户外交叉跨越直流试验线段合成电场测试位置图

Fig. 2 Diagram of test locations under outdoor crossing HVDC test lines

象限、上负下正象限和上负下负象限。

本文合成电场测试布置的优点在于，既可以获得某一回线路多个截面上的地面合成电场横向分布特性，又可以了解地面各个象限内的电场分布情况。与单回直流线路合成电场横向分布测试相比，本文测试点呈二维布置。

### 1.3 试验电压方案

在进行电压变化试验时，为了获得更多的导线电晕状态组合下的地面合成电场，采取固定某一层导线电压、改变另一层导线电压的试验方法。电压的选取需要使试验导线的表面电场强度覆盖实际直流工程的导线表面电场强度范围。

首先，采用二维方法计算架设  $4 \times \text{JL/G1A-95/15}$  导线的单回线路在各种电压、极间距和导线对地距离下的导线表面电场强度，确定上层导线水平极间距为 6m、对地高度为 6m，下层导线水平极间距为 3m、对地高度为 3m。同时可以得出，当试验电压达到  $\pm 220\text{kV}$  时，单回线路的导线表面电场最大值已超过实际工程的导线表面电场范围。

两回直流线路交叉跨越时，导线表面场强会沿纵向变化，需要采用三维方法来计算导线表面电场，了解其变化范围。图 3 为上下层线路电压均为  $\pm 120\text{kV}$  时各极导线所有子导线表面电场平均值的计算结果。可知，在导线纵向各位置的表面场强不同，交叉点附近表面电场有局部变化。在不同的电压组合下，导线表面电场强度的局部改变程度不同。因此，需要掌握各种电压组合下的上、下层导线表面电场变化范围，控制导线局部的电晕程度。根据计算结果，筛选得出试验采用的电压组合方案，如表 1 所示。

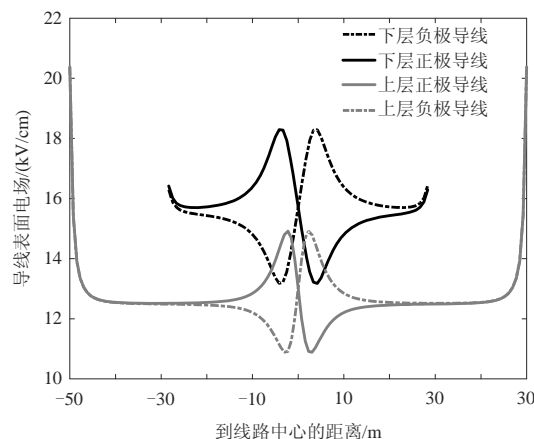


图 3 导线纵向不同位置处的表面电场曲线

Fig. 3 Diagram of surface voltage gradient curves along the lines

表 1 交叉跨越直流试验电压及其对应的导线表面电场范围

Table 1 Range of surface voltage gradients under different voltages of the crossing HVDC test lines

上/下导线电压	导线表面电场范围/(kV/cm)
$\pm 80\text{kV}/\pm 80\text{kV}$	上: 7.2~10.0, 下: 8.6~12.1
$\pm 80\text{kV}/\pm 100\text{kV}$	上: 6.8~10.3, 下: 11.2~14.7
$\pm 80\text{kV}/\pm 120\text{kV}$	上: 6.5~10.6, 下: 13.7~17.3
$\pm 80\text{kV}/\pm 140\text{kV}$	上: 6.1~11.0, 下: 16.3~19.9
$\pm 80\text{kV}/\pm 150\text{kV}$	上: 6.0~11.2, 下: 17.6~21.2
$\pm 80\text{kV}/\pm 160\text{kV}$	上: 5.8~11.3, 下: 18.9~22.5
$\pm 150\text{kV}/\pm 80\text{kV}$	上: 14.6~17.5, 下: 7.0~13.7
$\pm 150\text{kV}/\pm 100\text{kV}$	上: 14.3~17.8, 下: 9.6~16.3
$\pm 150\text{kV}/\pm 120\text{kV}$	上: 14.0~18.2, 下: 12.2~18.9
$\pm 150\text{kV}/\pm 140\text{kV}$	上: 13.6~18.5, 下: 14.8~21.5
$\pm 150\text{kV}/\pm 150\text{kV}$	上: 13.5~18.7, 下: 16.1~22.8
$\pm 150\text{kV}/\pm 160\text{kV}$	上: 13.3~18.8, 下: 17.3~24.1
$\pm 200\text{kV}/\pm 80\text{kV}$	上: 20.0~22.8, 下: 5.9~14.8
$\pm 200\text{kV}/\pm 100\text{kV}$	上: 19.6~23.2, 下: 8.5~17.4
$\pm 200\text{kV}/\pm 120\text{kV}$	上: 19.3~23.5, 下: 11.1~20.0
$\pm 200\text{kV}/\pm 140\text{kV}$	上: 19.0~23.9, 下: 13.6~22.6
$\pm 200\text{kV}/\pm 150\text{kV}$	上: 18.8~24.0, 下: 14.9~23.9
$\pm 200\text{kV}/\pm 160\text{kV}$	上: 18.6~24.2, 下: 16.2~25.2
$\pm 200\text{kV}/\pm 180\text{kV}$	上: 18.3~24.5, 下: 18.8~27.8
$\pm 200\text{kV}/\pm 200\text{kV}$	上: 17.9~24.9, 下: 21.4~30.3

## 2 两回交叉跨越直流线路地面合成电场的分布特性

根据制定的试验方案，在图 2 所示的测量点上对每一种电压组合开展地面合成电场测试，获得了地面合成电场的分布特性。为体现分布规律，将垂直于下层线路的多条地面合成电场横向分布进行对比。

图 4—10 为几种典型电压组合下，垂直于下层

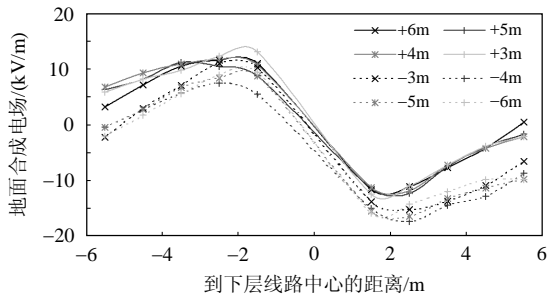


图4 上层±80kV/下层±80kV时的地面合成电场分布

Fig. 4 Distribution of ground total electric field with the voltages ±80kV/±80kV of upper and lower lines

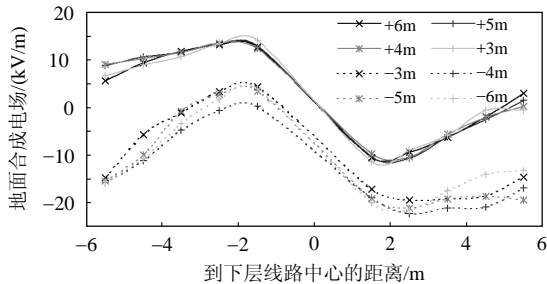


图5 上层±150kV/下层±80kV时的地面合成电场分布

Fig. 5 Distribution of ground total electric field with the voltages ±150kV/±80kV of upper and lower lines

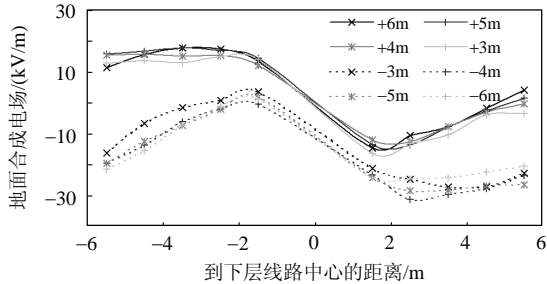


图6 上层±200kV/下层±80kV时的地面合成电场分布

Fig. 6 Distribution of ground total electric field with the voltages ±200kV/±80kV of upper and lower lines

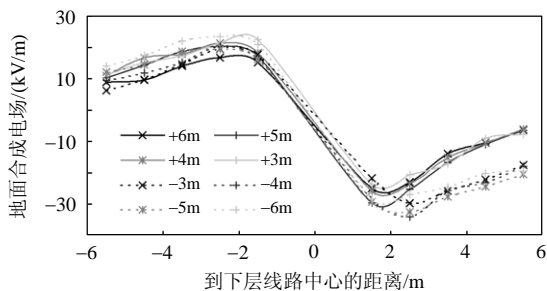


图7 上层±80kV/下层±150kV时的地面合成电场分布

Fig. 7 Distribution of ground total electric field with the voltages ±80kV/±150kV of upper and lower lines

线路方向上的地面合成电场分布曲线,对应的相对湿度范围为52%~68%。上层/下层电压分别为±80kV/±80kV、±150kV/±80kV、±150kV/±150kV、±200kV/±150kV、±220kV/±200kV,对应着上、下层导线不同的电晕状态。

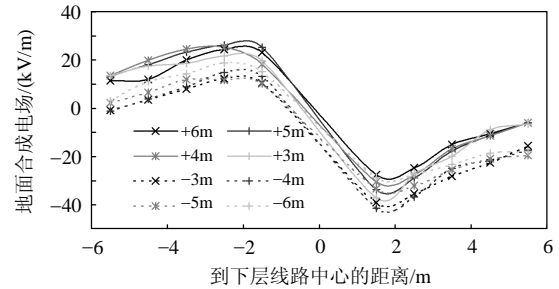


图8 上层±150kV/下层±150kV时的地面合成电场分布

Fig. 8 Distribution of ground total electric field with the voltages ±150kV/±150kV of upper and lower lines

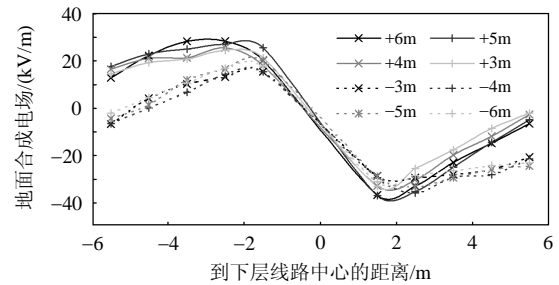


图9 上层±200kV/下层±150kV时的地面合成电场分布

Fig. 9 Distribution of ground total electric field with the voltages ±200kV/±150kV of upper and lower lines

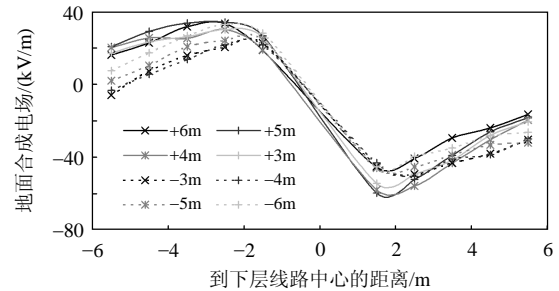


图10 上层±200kV/下层±200kV时的地面合成电场分布

Fig. 10 Distribution of ground total electric field with the voltages ±200kV/±200kV of upper and lower lines

由图4—10可知,交叉跨越的两回直流线路地面合成电场分布存在以下特性。

1) 对于每一种电压组合,在垂直于下层线路的方向上,地面合成电场的各条横向分布曲线形状类似,幅值大小与测试点和上层正、负极导线的相对位置有关。

2) 下层线路电压升高时,上层正、负极导线各侧的4条横向分布曲线间的幅值波动变大,且负极侧的横向分布曲线间差别大于正极侧。

3) 对于垂直于下层线路的横向分布曲线,同极性交叉点外电场随距离衰减慢,异性交叉点外电场随距离衰减快。上、下层导线电压越高,这种现象越明显。

4) 对于垂直于下层线路方向的地面合成电场分布,下层电压为±80kV时:上层正极侧的横向分

布曲线与上层负极侧的横向分布曲线相比，有整体正向的偏移；上层线路的电压比下层线路高出越多，偏移越明显；正极性电场绝对值均小于对称位置处的负极性电场绝对值。

5) 对于垂直于下层线路方向的地面合成电场分布，下层电压为 $\pm 150\text{kV}$  时：上层正极侧的横向分布曲线与上层负极侧的横向分布曲线有比较接近的部分；上层电压 $\pm 80\text{kV}$  时，横向分布接近的部分出现在正极性电场侧；上层电压为 $\pm 150\text{kV}$  和 $\pm 200\text{kV}$  时，横向分布接近的部分出现在负极性电场侧。

6) 各象限地面合成电场最大值相对大小与导线起晕状态的关系如表 2 所示。在图 4—8 中，上负下负象限的电场绝对值为最大；而在图 9、10 中，即上、下层电压分别为 $\pm 200\text{kV}/\pm 150\text{kV}$ 、 $\pm 200\text{kV}/\pm 200\text{kV}$  时，上正下负象限的电场最大值已超过上负下负象限的电场最大值。

表 2 四个象限地面合成电场最大值的顺序

Table 2 Order of the maximum values of the ground total electric field in four quadrants

上/下层 导线电压	上层导线 电晕状态	下层导线 电晕状态	四个象限的 电场绝对值顺序
$\pm 80\text{kV}/\pm 80\text{kV}$	不起晕	不起晕	上负下负>上正下正>上正下负>上负下正
$\pm 150\text{kV}/\pm 80\text{kV}$	局部起晕	不起晕	上负下负>上正下正>上正下负>上负下正
$\pm 200\text{kV}/\pm 80\text{kV}$	整体起晕	不起晕	上负下负>上正下正>上正下负>上负下正
$\pm 80\text{kV}/\pm 150\text{kV}$	不起晕	局部起晕	上负下负>上正下负>上正下正>上负下正
$\pm 150\text{kV}/\pm 150\text{kV}$	局部起晕	局部起晕	上负下负>上正下负>上正下正>上负下正
$\pm 200\text{kV}/\pm 150\text{kV}$	整体起晕	局部起晕	上正下负>上负下负>上正下正>上负下正
$\pm 200\text{kV}/\pm 200\text{kV}$	整体起晕	整体起晕	上正下负>上负下负>上正下正>上负下正

### 3 电压变化对两回交叉跨越直流线路地面合成电场的影响

下文将给出导线电压变化对各象限地面合成电场横向分布的影响，分为下层导线电压变化和上层导线电压变化。

#### 3.1 下层导线电压变化

当上层导线电压 $\pm 80\text{kV}$ 、下层导线电压在 $\pm 80\text{kV}\sim\pm 160\text{kV}$  间变化时，四个象限内的地面合成

电场极大值分别出现在 $+3\text{m}$  和 $-3\text{m}$  处的横向分布曲线上，地面合成电场如图 11、12 所示。

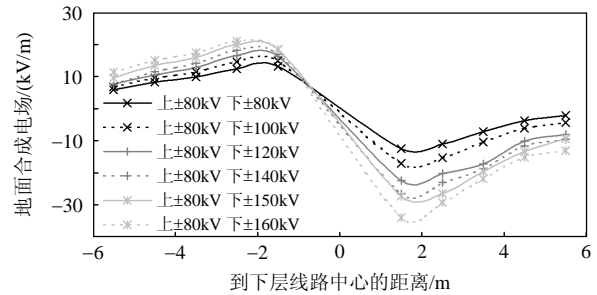


图 11 上层 $\pm 80\text{kV}$ 、下层电压变化时 $+3\text{m}$  处的地面合成电场分布

Fig. 11 Distribution of total electric field at  $+3\text{m}$  with changing voltage of lower line and  $\pm 80\text{kV}$  of upper line

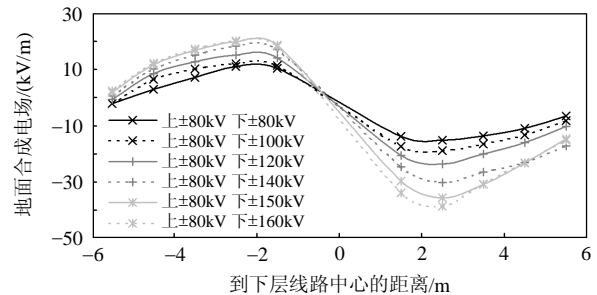


图 12 上层 $\pm 80\text{kV}$ 、下层电压变化时 $-3\text{m}$  处的地面合成电场分布

Fig. 12 Distribution of total electric field at  $-3\text{m}$  with changing voltage of lower line and  $\pm 80\text{kV}$  of upper line

上层导线电压 $\pm 150\text{kV}$ 、下层导线电压在 $\pm 80\text{kV}\sim\pm 160\text{kV}$  间变化时，四个象限内的地面合成电场极大值分别出现在 $+3\text{m}$  和 $-3\text{m}$  处的横向分布曲线上，地面合成电场如图 13、14 所示。

上层导线电压 $\pm 200\text{kV}$ 、下层导线电压在 $\pm 80\text{kV}\sim\pm 200\text{kV}$  间变化时，四个象限内的地面合成电场极大值分别出现在 $+5\text{m}$ 、 $-3\text{m}$  和 $-6\text{m}$  处的横向分布曲线上，地面合成电场如图 15—17 所示。

根据试验结果，可知交叉跨越直流线路下层导线电压变化时的地面合成电场分布存在以下规律。

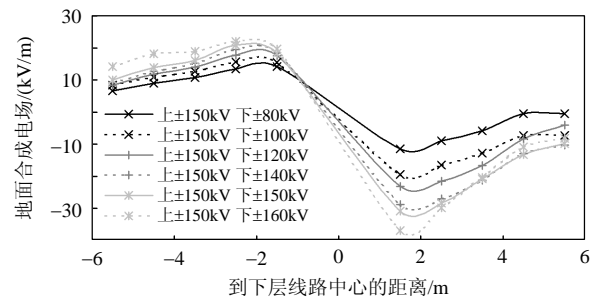


图 13 上层 $\pm 150\text{kV}$ 、下层电压变化时 $+3\text{m}$  处的地面合成电场分布

Fig. 13 Distribution of total electric field at  $+3\text{m}$  with changing voltage of lower line and  $\pm 150\text{kV}$  of upper line

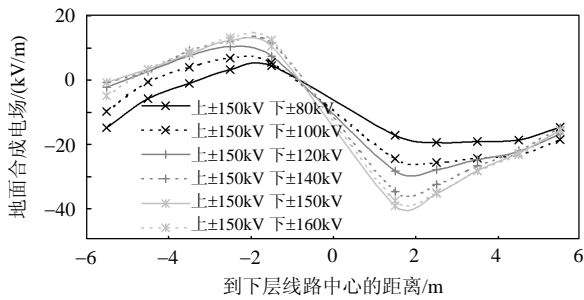


图 14 上层 $\pm 150\text{kV}$ 、下层电压变化时  
-3m 处的地面合成电场分布

Fig. 14 Distribution of total electric field at -3m with changing voltage of lower line and  $\pm 150\text{kV}$  of upper line

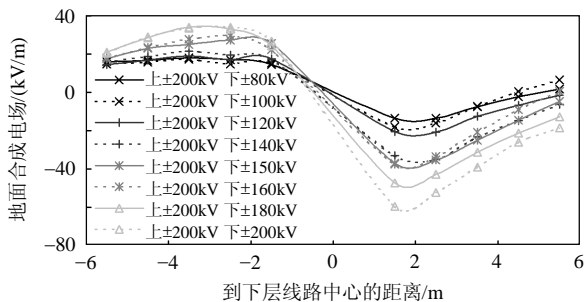


图 15 上层 $\pm 200\text{kV}$ 、下层电压变化时  
+5m 处的地面合成电场分布

Fig. 15 Distribution of total electric field at +5m with changing voltage of lower line and  $\pm 200\text{kV}$  of upper line

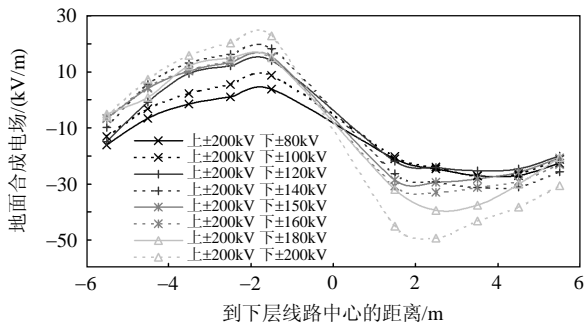


图 16 上层 $\pm 200\text{kV}$ 、下层电压变化时  
-3m 处的地面合成电场分布

Fig. 16 Distribution of total electric field at -3m with changing voltage of lower line and  $\pm 200\text{kV}$  of upper line

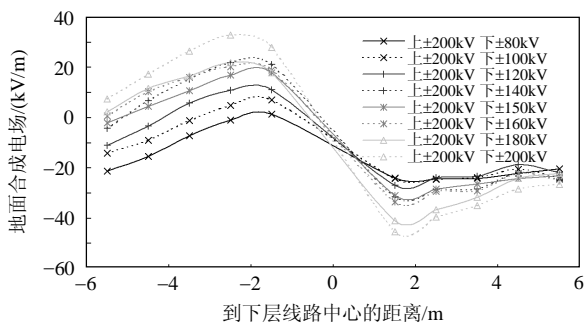


图 17 上层 $\pm 200\text{kV}$ 、下层电压变化时  
-6m 处的地面合成电场分布

Fig. 17 Distribution of total electric field at -6m with changing voltage of lower line and  $\pm 200\text{kV}$  of upper line

1) 若交叉位置的上、下层导线为同极性时, 下层导线起晕后升压时地面合成电场的增速大多趋缓; 若交叉位置的上、下层导线为异极性时, 下层导线起晕后升压时地面合成电场增速大多加快。

2) 某一层导线从不起晕到电晕程度逐渐加强时, 各象限内的电场极大值位置从交叉点向远离该导线的方向逐渐偏移约 1~3m。

3) 上层导线 $\pm 80\text{kV}$  时: 下层导线电压在 $\pm 80\text{kV}$ ~ $\pm 160\text{kV}$  范围内都是上负下负象限出现负极性电场最大值; 下层导线在 $\pm 80\text{kV}$ ~ $\pm 120\text{kV}$  范围内是上正下正象限出现正极性电场最大值, 下层导线在 $\pm 140\text{kV}$ ~ $\pm 160\text{kV}$  范围内是上正下正和上负下正象限同出现正极性电场最大值。

4) 上层导线 $\pm 150\text{kV}$  时: 下层导线在 $\pm 80\text{kV}$ ~ $\pm 160\text{kV}$  范围内都是上负下负象限出现负极性电场最大值, 但当下层导线电压达 $\pm 160\text{kV}$  时, 上负下负和上正下负象限的负极性电场最大值非常接近; 下层导线在 $\pm 80\text{kV}$ ~ $\pm 160\text{kV}$  范围内都是上正下正象限出现正极性电场最大值。

5) 上层导线 $\pm 200\text{kV}$  时: 下层导线在 $\pm 80\text{kV}$ ~ $\pm 120\text{kV}$  范围内是上负下负象限出现负极性电场最大值, 下层导线在 $\pm 140\text{kV}$ ~ $\pm 200\text{kV}$  范围内是上正下负象限出现负极性电场最大值; 下层导线在 $\pm 80\text{kV}$ ~ $\pm 200\text{kV}$  范围内是上正下正象限出现正极性电场最大值, 但下层导线在 $\pm 200\text{kV}$  时上负下正象限的电场最大值已与上正下正象限非常接近。

### 3.2 上层导线电压变化

接着考虑上层导线的电压影响。下层导线电压 $\pm 80\text{kV}$ , 上层导线分别为 $\pm 80\text{kV}$ 、 $\pm 150\text{kV}$ 、 $\pm 200\text{kV}$  时, +3m、+4m、+5m、+6m 各条横向分布上体现出的规律是类似的, -3m、-4m、-5m、-6m 各条横向分布上体现出的规律也是类似的, +3m 和 -3m 处的曲线如图 18、19 所示。

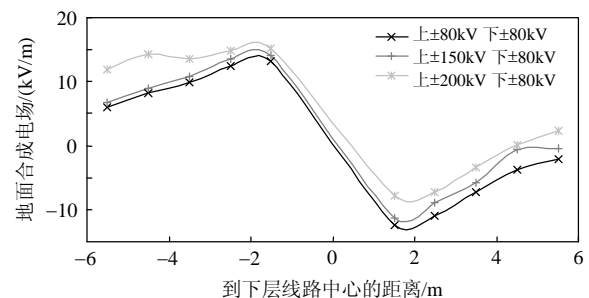


图 18 下层 $\pm 80\text{kV}$ 、上层电压变化时+3m 处的  
地面合成电场分布

Fig. 18 Distribution of total electric field at +3m with changing voltage of upper line and  $\pm 80\text{kV}$  of lower line

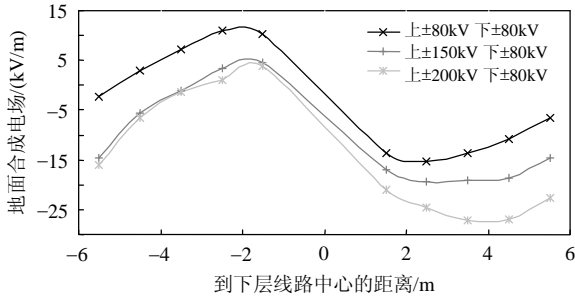


图 19 下层 $\pm 80\text{kV}$ 、上层电压变化时 $-3\text{m}$ 处的地面合成电场分布

Fig. 19 Distribution of total electric field at  $-3\text{m}$  with changing voltage of upper line and  $\pm 80\text{kV}$  of lower line

下层导线电压 $\pm 150\text{kV}$ ，上层导线分别为 $\pm 80\text{kV}$ 、 $\pm 150\text{kV}$ 、 $\pm 200\text{kV}$ 时， $+3\text{m}$ 和 $-3\text{m}$ 处的曲线如图 20、21 所示。

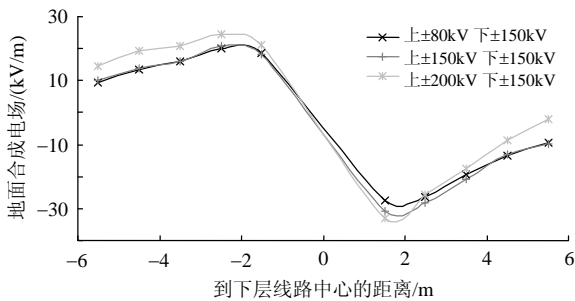


图 20 下层 $\pm 150\text{kV}$ 、上层电压变化时 $+3\text{m}$ 处的地面合成电场分布

Fig. 20 Distribution of total electric field at  $+3\text{m}$  with changing voltage of upper line and  $\pm 150\text{kV}$  of lower line

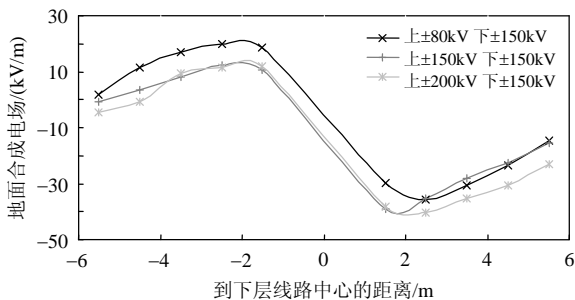


图 21 下层 $\pm 150\text{kV}$ 、上层电压变化时 $-3\text{m}$ 处的地面合成电场分布

Fig. 21 Distribution of total electric field at  $-3\text{m}$  with changing voltage of upper line and  $\pm 150\text{kV}$  of lower line

可知，交叉跨越直流线路上层导线电压变化时的地面合成电场试验数据存在以下现象。

1) 下层线路 $\pm 80\text{kV}$ 、上层线路升压时：上层正极侧的正极性电场变大，负极性电场减小；上层负极侧的正极性电场减小，负极性电场增大。

2) 下层线路 $\pm 150\text{kV}$ 、上层线路升压时：上层正极侧的正极性和负极性电场都增大；上层负极侧的正极性电场减小，负极性电场增大。

## 4 两回交叉跨越直流线路地面合成电场的试验规律总结及原因分析

从试验结果来看，在试验涉及的电压组合范围内，根据导线电晕程度，四个象限的地面合成电场相对大小关系存在三个阶段。

### 4.1 第一阶段

主要特点是：下层导线不起晕，对应下层导线表面电场最大值不超过 $15\text{kV/cm}$ ；上负下负和上正下正象限分别出现地面合成电场的负极性最大值和正极性最大值；上层导线电压不变、下层导线升压时，各象限内的合成电场均增大；下层导线电压不变、上层导线升压时，上层正极侧的正极性电场变大、负极性电场减小，上层负极侧的正极性电场减小、负极性电场增大。

当上、下层导线均不起晕时，地面合成电场仅为标称电场。由于同极性电场互相叠加、异极性电场互相抵消，同极性导线交叉处的地面合成电场绝对值变大，异极性交叉处的地面合成电场绝对值变小，并且离交叉点越近变化越明显。此时，上层线路电压不变、下层线路电压升高时，地面各象限内的正负极性电场绝对值均增大，主要是由于下层线路导线电荷增加，在地面处产生的正、负极性标称电场数值增大。而下层线路电压不变、上层线路电压升高时，受上层正极导线影响的一侧，地面合成电场中由上层正极导线产生的正极性标称电场成分增加，导致地面正极性电场数值增大、负极性电场数值减小。同理，受上层负极导线影响的一侧，地面正极性电场数值减小、负极性电场数值增大。

当下层线路不起晕、上层线路起晕时，地面合成电场由上、下层导线产生的标称电场和上层导线产生的离子流场组成。地面标称电场的分布规律与两回线路均不起晕时相同。而上层线路产生的离子流场，使得上层线路在地面产生的正极性电场和负极性电场都增大，地面合成电场的整体分布规律和随上、下层导线电压升高的变化规律与不起晕时相同。

### 4.2 第二阶段

主要特点是：下层导线发生电晕但不太强烈，上层导线不起晕或电晕不强烈，对应下层导线表面电场在 $15\sim 22\text{kV/cm}$ ，且上层导线表面电场整体不超过 $19\text{kV/cm}$ ；上负下负和上正下正象限仍然分别出现地面合成电场的负极性最大值和正极性最大

值,上正下负象限的地面合成电场最大值大于上正下正象限的地面合成电场最大值;上层导线电压不变、下层导线升压时,上层同极性导线影响象限的地面合成电场增速大多趋缓,上层异极性导线影响象限的地面合成电场增速大多加快;下层线路电压不变、上层线路升压时,上层正极侧的正极性和负极性电场都增大,上层负极侧的正极性电场减小,负极性电场增大。

在此阶段,地面合成电场由上、下层导线产生的标称电场和离子流场共同组成。地面标称电场的规律仍与第一阶段相同,而地面离子流场的分布规律与标称电场有所差别。上、下层导线同极性交叉时,交叉点附近的导线表面电场减小、电晕减弱,产生的地面离子流场减小。上、下层导线异极性交叉时,交叉点附近的导线表面电场增大、电晕变强,产生的地面离子流场增大。由于交叉导线极性对地面标称电场和地面离子流场的影响规律是相反的,地面合成电场的变化规律取决于标称电场和离子流场的占比。而在此阶段,下层线路电晕不强,上、下层线路导线局部的电晕状态改变对地面合成电场影响有限,但离子流场随电压升高而增大的幅度最大,上正下负交叉处导线电晕对地面局部合成电场的增强作用已大于标称电场的抵消作用,该象限的电场最大值随着下层导线电压升高已开始增大,且已超过上正下正象限的电场最大值,与上负下负象限电场最大值的差别也越来越小。但上负下正象限的地面合成电场规律尚未有如此变化。说明负极导线的起晕场强比正极导线低,在异极性导线交叉时负极导线更易发生电晕。

### 4.3 第三阶段

主要特点是:下层导线电晕不太强烈但上层导线电晕比较强烈,或者上、下层导线电晕都比较强烈,对应下层导线表面电场最大值达到  $22\text{kV/cm}$ ,且上层导线表面电场整体达到  $19\text{kV/cm}$  以上;上正下负象限的电场最大值超过上负下负象限的电场最大值,成为地面合成电场的负极性最大值,上正下正象限的地面合成电场仍为正极性最大值;上、下层导线电压变化时地面合成电场的变化规律与第二阶段相同。

在此阶段,由于空间离子浓度较高,上正下负交叉处导线电晕对地面合成电场的局部增强作用更加突出,导致该象限的地面合成电场最大值超出上负下负象限的地面合成电场最大值。上负下正交

叉处导线电晕对地面合成电场的增强作用虽不如上正下负时明显,但在上下层电压达  $\pm 200\text{kV}/\pm 200\text{kV}$  时该象限内的电场最大值已与上正下正象限的电场最大值非常接近。

正、负极导线电晕特性的差别在单回直流线路的地面合成电场试验中已有所体现,在两回直流线路交叉跨越时更加显著。正极性导线的起晕场强更高,正极性地面合成电场随机波动更小、随电压升高时增长更慢。以上原因使得交叉跨越直流线路的负极性电场最大值比正极性电场最大值约大  $5\sim 20\text{kV/m}$ ,导线从起晕到电晕程度增强,正、负极电场最大值的差距变明显。当负极导线电晕率先趋于饱和后,正、负极电场最大值的差距又将逐渐缩小。

对于现有的交叉跨两回直流输电线路,设计时通常会使得导线处于弱起晕状态,对应于第一阶段或第二阶段,此时地面合成电场最大值出现在上负下负交叉点对地投影附近。而当直流线路受到环境因素影响电晕增强,并且上下层导线距离较近时,对应于第三阶段,此时上正下负交叉点对地投影附近的地面合成电场变为最大。

## 5 结论

本文搭建了导线为  $4\times\text{JL/G1A-95/15}$ 、上下层长度分别为  $100$  和  $50\text{m}$  的户外交叉跨越直流模拟试验线段,采用阵列式布置的地面合成电场测试方式,开展了导线电压变化对地面合成电场影响的试验研究,获得了地面不同位置处合成电场的分布特性,总结了电压变化对交叉跨越直流线路地面合成电场的影响规律。

根据上、下层线路的电晕程度,上正下正、上正下负、上负下正、上负下负四个象限的地面合成电场相对大小关系存在三个阶段。从第一阶段到第三阶段,随着下层导线电晕程度的加强,以及上层导线对下层导线电晕影响的加强,地面合成电场最大值出现的象限逐渐由上负下负变为上正下负。对于实际交叉跨越的两回直流输电线路,导线弱电晕时地面合成电场最大值出现在上负下负交叉点对地投影附近,而当导线电晕较强时上正下负交叉点对地投影附近的地面合成电场变为最大。

本文获得的交叉跨越直流线路地面合成电场试验规律,可为直流线路合成电场的三维预测方法提供基础数据,为交叉跨越直流线路的电磁环境预测和评估提供技术依据。



## 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.  
LIU Zhenya . Ultra-high voltage AC & DC grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013(in Chinese).
- [2] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.  
LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8(in Chinese).
- [3] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).
- [4] 刘泽洪.  $\pm 1100\text{kV}$  特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7782-7791.  
LIU Zehong . Findings in development of  $\pm 1100\text{kV}$  UHVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7782-7791(in Chinese).
- [5] 谷琛, 李鹏, 何慧雯, 等.  $\pm 1100\text{kV}$  以上电压等级直流输电技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6745-6753.  
GU Chen, LI Peng, HE Huiwen, et al. Research on  $\pm 1100\text{kV}$  and above UHV DC transmission technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6745-6753(in Chinese).
- [6] 刘振亚. 特高压直流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
LIU Zhenya. Electromagnetic environment of UHVDC transmission projects[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009(in Chinese).
- [7] 崔翔, 周象贤, 卢铁兵. 高压直流输电线路离子流场计算方法研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 130-141.  
CUI Xiang, ZHOU Xiangxian, LU Tiebing. Recent progress in the calculation methods of ion flow field of HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36): 130-141(in Chinese).
- [8] MARUVADA P S. Corona performance of high-voltage transmission lines[M]. Baldock: Research Studies Press, 2000.
- [9] 秦柏林, 盛剑霓, 严璋. 高压直流输变电系统下的三维离子流场计算[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(2): 27-33.  
QIN Bailin, SHENG Jianni, YAN Zhang. 3-dimensional analysis of ion flow field under HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(2): 27-33(in Chinese).
- [10] 罗兆楠, 崔翔, 甄永赞, 等. 直流输电线路三维离子流场的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 102-107.  
LUO Zhaonan, CUI Xiang, ZHEN Yongzan, et al. A calculation method for 3-D ionized field under HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 102-107(in Chinese).
- [11] LI Xuebao, CUI Xiang, ZHEN Yongzan, et al. The ionized fields and the ion current on a human model under  $\pm 800\text{-kV}$  HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2141-2149.
- [12] ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LU Tiebing. Modeling of an ionized electric field on the building near the UHVDC transmission line[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(4): 747-753.
- [13] 王东来, 卢铁兵, 崔翔, 等. 两回高压直流输电线路交叉跨越时地面合成电场计算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 77-84.  
WANG Donglai, LU Tiebing, CUI Xiang, et al. Simulation of total electric field under the crossing of two circuit HVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 77-84(in Chinese).
- [14] 甄永赞, 崔翔, 罗兆楠, 等. 直流输电线路三维合成电场计算的有限元方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 153-160.  
ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LUO Zhaonan, et al. FEM for 3D total electric field calculation near HVDC lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 153-160(in Chinese).
- [15] MA Xiaoqian, XIE Li, HE Kun, et al. Research on 3-D total electric field of crossing high voltage direct current transmission lines based on upstream finite element method[J]. High Voltage, 2021, 6(1): 160-170.
- [16] XIAO Fengyu, ZHANG Bo, MO Jianghua, et al. Calculation of 3-D ion-flow field at the crossing of HVDC transmission lines by method of characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1611-1619.
- [17] 陆家榆, 何堃, 马晓倩, 等. 空中颗粒物对直流电晕放电影响研究现状: 颗粒物空间电荷效应[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6222-6234.  
LU Jiayu, HE Kun, MA Xiaoqian, et al. Current status of study on the effects of airborne particles on DC corona discharge: space-charge effect of particles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6222-6234(in Chinese).
- [18] 陆家榆, 何堃, 鞠勇, 等. 空中悬浮颗粒物对直流电晕放电影响研究现状: 颗粒物覆污电极效应[J]. 中国电机

- 工程学报, 2015, 35(24): 6552-6559.
- LU Jiayu, HE Kun, JU Yong, et al. Current status of study on the effects of airborne suspended particles on DC corona discharge: electrode-contamination effect of particles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6552-6559(in Chinese).
- [19] 申南轩, 张远航, 徐鹏, 等. 基于气象数据的雾天气条件下高压直流输电线路合成电场计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7805-7816.
- SHEN Nanxuan, ZHANG Yuanhang, XU Peng, et al. Calculation and analysis of ground-level total electric field of HVDC lines in fog based on meteorological data[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7805-7816(in Chinese).
- [20] 孟晓波, 卞星明, 陈枫林, 等. 负直流下绞线电晕起始电压分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 77-84.
- MENG Xiaobo, BIAN Xingming, CHEN Fenglin, et al. Analysis on negative DC corona inception voltage of stranded conductors[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 77-84(in Chinese).
- [21] 赵录兴, 崔翔, 李学宝, 等. 低气压对直流正极性导线地面合成电场特性影响的实验研究[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3638-3644.
- ZHAO Luxing, CUI Xiang, LI Xuebao, et al. Experimental study on influence of low atmospheric pressure on total ground electric fields of DC positive conductors[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3638-3644(in Chinese).
- [22] 刘泽洪, 陆家榆, 余军, 等. 同走廊两回±800kV 直流线路地面合成电场研究(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 121-130.
- LIU Zehong, LU Jiayu, YU Jun, et al. Study on the total electric field at the ground level under two-circuit ±800kV DC transmission lines in the same corridor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 121-130(in English).
- [23] 田丰, 余占清, 曾嵘, 等. 高海拔地区特高压直流试验线段下的地面合成电场强度特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1374-1381.
- TIAN Feng, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Characteristics of resultant electric field under ultra high voltage direct current test lines in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1374-1381(in Chinese).
- [24] 赵录兴, 崔翔, 陆家榆, 等. 直流输电线路地面合成电场测量方法探讨[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 644-652, 695.
- ZHAO Luxing, CUI Xiang, LU Jiayu, et al. Discussion on measurement method of total electric field for DC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 644-652, 695(in Chinese).



谢莉

在线出版日期: 2021-06-11。

收稿日期: 2021-03-18。

作者简介:

谢莉(1980), 女, 工学博士, 高级工程师, 主要从事输变电工程电磁环境方面的研究工作, xieli@epri.sgcc.com.cn。

(编辑 胡琳琳)

# Experimental Research on Ground Total Electric Field Affected by the Variation of Voltages of two Crossing HVDC Transmission Lines

XIE Li, LU Jiayu, ZHAO Luxing, HE Kun, WU Guifang, JU Yong

(China Electric Power Research Institute)

**KEY WORDS:** ground total electric field; corona of conductor; variation of voltage; crossing HVDC transmission lines

With the development of HVDC technology in China, the crossing of HVDC and UHVDC transmission lines has occurred frequently, which brings new challenges to the prediction and control technology of the ground total electric field. To obtain the distribution characteristics and influence factors of the ground total electric field of two crossing HVDC transmission lines, it is of great importance to carry out the experimental research on the ground total electric field of two crossing HVDC lines.

The outdoor crossing HVDC test lines are built with the bundle of 4×JL/G1A-95/15, and the array arrangement of electric field measurement devices, shown in Fig. 1, is adopted for the experimental research on the influence of conductor voltage change on ground total electric field.

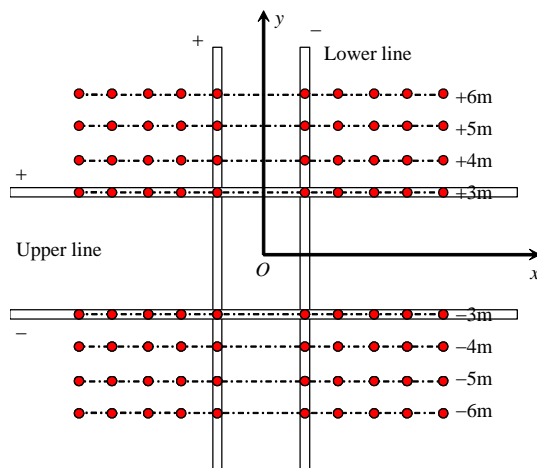


Fig. 1 Diagram of test locations under two crossing HVDC lines

The 2-D and 3-D methods are used to calculate the surface voltage gradient of the upper and lower lines. The test voltage combinations of these lines are determined according to the range of the surface voltage gradients.

The distribution characteristics of the ground total electric field in the crossing area are obtained by the experiments. All the experimental data of the ground total electric field are displayed in three types. The first type is the distribution characteristics of all the positions under a certain voltage combination. The second type is

the distribution characteristics of positions on a certain line when the upper conductors' voltage is fixed and the lower conductors' voltage is increasing. The third type is the distribution characteristics of positions on a certain line when the voltage of the lower conductors is fixed and the voltage of the upper conductors is increasing.

The effects on ground total electric field by the polarities and corona intensities of the crossing conductors are summarized. If we sort the magnitude of ground total electric field in four quadrants, there are three stages of the order according to the corona intensity of the upper and lower lines. In the first stage, when the lower lines have no corona, the order of the magnitude of ground total electric field from large to small is U-/L-, U+/L+, U+/L- and U-/L+, where U represents the upper lines, L represents the lower lines, + and - represent the polarity. In the second stage, when the corona of the lower lines is not too hard, and the upper lines have no corona or the corona is not too hard, the order of the magnitude from large to small changes to U-/L-, U+/L-, U+/L+ and U-/L+. In the third stage, when the corona of the upper and lower lines is quite intense, the order of the magnitude of ground total electric field from large to small changes to U+/L-, U-/L-, U+/L+ and U-/L+. From the first stage to the third stage, with the enhancement of the corona intensity of the lower lines and the influence of the upper lines on the corona of the lower lines, the ground total electric field in the U+/L- quadrant gradually increases and becomes to the largest. For the practical crossing HVDC transmission lines, if the conductor corona is weak, the maximum ground total electric field appears in the position near the ground projection of U-/L- intersection. While, if the conductor corona is intense, the maximum ground total electric field may change to the position near the ground projection of U+/L- intersection.

The experimental results can provide basic data for the prediction of the total electric field, and give technical support for the design and environmental assessment of the crossing HVDC transmission lines.