

# 影响特高压直流输电线路表面电场的因素及分析

马 力, 王珍雪, 叶会英, 朱君瑶

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 导线表面电场是特高压直流(UHVDC)输电线路无线电干扰、可听噪声以及电晕损失的决定因素,为此准确计算导线表面电场强度显得格外重要.国内外对表面电场的影响因素分析较少,本文以模拟电荷法为基础,以每个子导线内部设置 12 个模拟电荷为例,针对线路的分裂导线数、子导线分裂间距、子导线横截面积、导线对地高度及极导线间距等影响因素进行分析.运用 MATLAB 语言编写程序,对模型进行计算仿真,得出每个变量对表面电场的定量影响,为工程架设中选择导线结构参数提供重要的理论依据.

**关键词:** UHVDC; 表面电场; 模拟电荷法; 因素分析

**中图分类号:** TM726 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.020

## 0 引言

特高压直流是指  $\pm 800$  kV 及以上电压等级的直流输电.由于输电线路电压高、分裂导线多,导致导线表面电场强度升高.随之出现的电晕现象和强电场效应对人体和生态环境产生危害<sup>[1-2]</sup>,所以研究导线表面的电场强度至关重要.目前输电线路导线规格的选择、导线对地距离的确定等,已不完全是根据工作电流或绝缘要求设定,而是由电晕特性及对地面场强的限制来决定的<sup>[3]</sup>.分裂导线表面的最大电场强度,不仅是特高压直流线路导线选择的重要依据,也是多项电磁环境参数计算分析的基础<sup>[3-5]</sup>.因此笔者对特高压直流输电线路表面电场影响因素进行分析,对线路的架实施施和环境的电磁检测具有重要的工程实用价值.

## 1 表面电场

### 1.1 电晕产生

特高压直流线路发生电晕后,由于导线电压极性固定<sup>[6-9]</sup>,正极性导线电离出的离子,由于斥力的作用,将背离导线,沿着电力线向四周运动.那么正极性导线周围将充满着正离子;而负极性导线周围会充满负离子,如图 1 所示.

直流输电线路所带来的一切电磁环境问题都与导线的电晕现象有关,而导线表面起晕与否,主要是看导线表面的最大电场强度是否大于导线的起晕场强<sup>[10]</sup>.

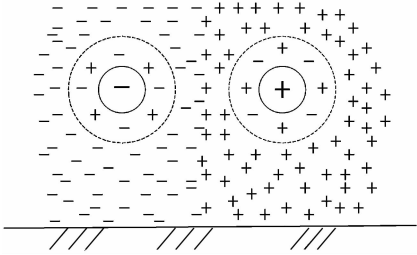


图 1 电晕产生过程

Fig. 1 Corona generating process

### 1.2 线路模型

特高压直流输电工程一般都用于远距离输电,因此线路所经过的区域必然有较为复杂的地形.为了计算方便,基于以下几点考虑建立通用的数学计算模型.

①忽略干扰的存在,将计算转化为求取静态场的问题.

②将地面视为无穷大的、导电性能良好的导体平面,并设地面电位为零.

③将导线视为一条无限长平行的直线,取与此直线垂直的平面作为计算平面,并取线路最低

收稿日期:2014-11-11;修订日期:2014-12-25

基金项目:河南省科技攻关资助项目(142102210497)

作者简介:马力(1980-),女,河北黄骅人,郑州大学讲师,博士,主要从事电磁环境预测、电磁场与电磁波方面的研究,E-mail:jemaili@zzu.edu.cn.

点的高度作为导线的对地高度,如图 2 所示。

④ 将分裂导线中每根子导线简化为半径  $r$  相同的光滑圆柱形导体. 子导线横截面积为  $S = \pi \times r^2$ ; 子导线之间的距离为横截面的圆心之间的距离(每级中子导线之间的距离相等)用  $S_c$  表示; 在束导线中过每根子导线横截面圆心的圆,其中心为束导线的圆心,两级束导线圆心之间的距离为极导线间距,用  $L$  表示;束导线圆心到地面的高度,为导线对地高度,用  $H$  表示. 以四分裂导线为例,如图 3 所示<sup>[11]</sup>.

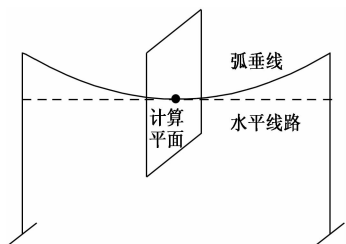


图 2 计算平面设置示意图

Fig. 2 Line simplified model

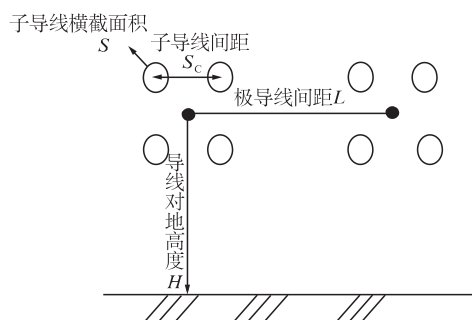


图 3 计算模型示意图

Fig. 3 Calculation model

## 2 模拟电荷法

模拟电荷法的本质是广义的镜像法. 该方法的优点是考虑全面且计算准确<sup>[13]</sup>. 模拟电荷法是计算 UHVDC 线路的基础, 笔者以单极四分裂导线为例, 说明模拟电荷法计算导线表面电场的步骤.

### ① 设置模拟电荷

每根子导线的内部设置 12 个模拟电荷. 子导线半径为  $r$ , 模拟电荷均匀分布在半径为  $r_0 = 0.6r$  的同轴圆柱面上, 如图 4 所示. 全部模拟电荷构成矩阵

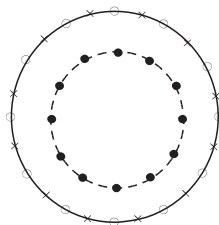
$$[q] = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_N]^T,$$

式中:  $N$  是导线模拟线电荷的总数.

### ② 设置匹配点

在子导线表面设置匹配点, 数量等于模拟电

荷数量. 匹配点位于导线表面正对模拟电荷的位置, 如图 4 所示. 各匹配点的电位分别等于所在导线的对地电压, 构成矩阵



● 模拟电荷 ○ 匹配点 × 校验点

图 4 模拟电荷分布示意图

Fig. 4 Distribution of the simulation charge

$$[u] = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_N]^T.$$

### ③ 列电位方程, 求解电位系数矩阵 $[P]$

$$\begin{cases} u_1 = p_{1,1}q_1 + p_{1,2}q_2 + \dots + p_{1,N}q_N \\ u_2 = p_{2,1}q_1 + p_{2,2}q_2 + \dots + p_{2,N}q_N \\ \dots\dots\dots \\ u_N = p_{N,1}q_1 + p_{N,2}q_2 + \dots + p_{N,N}q_N \end{cases}, \quad (1)$$

写成矩阵形式为<sup>[1,11]</sup>

$$[u] = [p][q], \quad (2)$$

式中:  $p_{i,j}$  表示第  $j$  个模拟电荷在第  $i$  个匹配点上产生电位的电位系数, 计算公式为

$$p_{i,j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'_{i,j}}{r_{i,j}}, \quad p_{j,i} = p_{i,j}, \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_0$  是真空中介电常数;  $r_{i,j}$  和  $r'_{i,j}$  分别是第  $j$  个模拟电荷及其镜像电荷与第  $i$  个匹配点的距离.

④ 求解线性方程组式 (2), 得出模拟电荷  $[q]$ .

⑤ 在导线表面异于匹配点的位置另取一些校验点, 对计算结果进行校验. 校验点一般选择在与匹配点等间距的位置, 如图 4 所示. 第  $i$  个校验点的电位

$$v_i = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'_{i,j}}{r_{i,j}}, \quad (4)$$

式中:  $r_{i,j}$  与  $r'_{i,j}$  分别是第  $j$  个模拟电荷及其镜像电荷与第  $i$  个校验点间的距离. 设第  $i$  个校验点所在导线的实际电位是  $u_0$ , 则电位相对误差为<sup>[11-12]</sup>

$$\delta = \left| \frac{v_i - u_0}{u_0} \right| \times 100\%. \quad (5)$$

当设置的模拟电荷满足精度要求时, 可求出导线表面任意一点的场强与电位, 继而可得导线表面最大电场强度. 导线表面任意一点  $p$  的场强  $E_p$  为

$$E_p = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{r_{p,j}}{r_{p,j}} - \frac{r'_{p,j}}{r'_{p,j}} \right), \quad (6)$$

式中： $r_{p,j}$  和  $r'_{p,j}$  分别是第  $j$  个模拟线电荷及其镜像电荷到点  $p$  的距离。

导线表面最大电场强度  $E_{p\max}$  为

$$E_{p\max} = \max(E_p). \quad (7)$$

3 因素分析

在特高压直流输电线路的研究中,分析地面合成电场和离子流密度的影响因素较多,但是对导线表面电场的影响因素分析较少. 由于导线表面最大电场强度与地面合成场强的计算息息相关,且它是研究导线电磁环境的基础,所以笔者对于导线表面电场的因素分析是十分必要的。

由于两极导线相距较远,极间距离远远大于极导线的等效半径,所以在计算导线表面场强时,将双极导线中的极导线作单级导线处理,即认为一极导线不影响另一极导线的表面场强. 在计算过程中,导线电压为  $\pm 800$  kV 的直流输电. 子导线组成的导线束为同心圆. 当子导线数  $n$  为奇数时,第一根子导线分布在该同心圆的正上方,即  $\theta = \pi/2$  处,当子导线  $n$  为偶数时,第一根子导线分布  $\theta = 2 \times \pi/n$  处,其余子导线分布圆周上,且每根子导线等间距分布. 如无特殊说明,本文中子导线的分布按照如上排列. 以五分裂和六分裂导线为例,如图 5 所示。

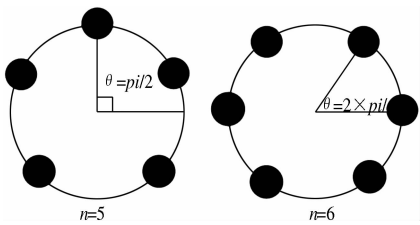


图 5 子导线的排列

Fig. 5 Arrangement of sub-conductor

3.1 导线分裂数的影响

笔者计算了分裂导线  $n = 3 \sim 9$  时导线表面最大电场强度. 其中,导线对地高度  $H = 29$  m,极导线间距  $L = 22$  m,子导线分裂间距  $S_c = 0.45$  m,子导线横截面积  $S = 1\,000$  mm<sup>2</sup>. 影响规律如图 6(a)。

由图 6(a) 可知,随着分裂导线数增多,导线表面最大场强非常明显地减小,减小幅度逐渐降低. 此外在导线架构过程中,分裂数的增加会极大消耗投资支出. 结合表面电场的大小和投资效益分析,导线分裂数宜选取  $4 \sim 6$  之间. 所以在分析以下各因素时,如无特殊说明,都是选取四分裂导

线进行探讨.

3.2 子导线分裂间距的影响

笔者计算了子导线间距  $S_c = 20 \sim 60$  cm 时的变化,其余各参数按 3.1 节中保持不变. 导线表面最大电场强度的变化规律见图 6(b)。

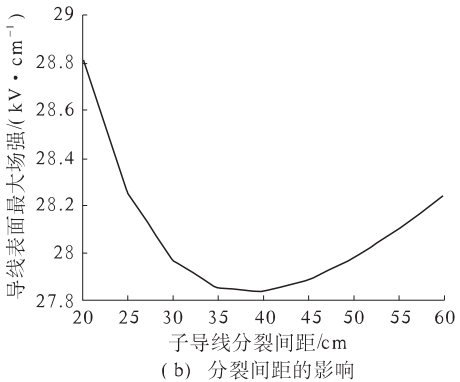
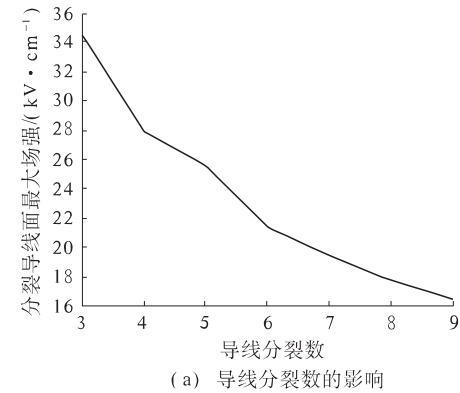


图 6 导线分裂数和子导线分裂间距的影响

Fig. 6 Influence of number of conductor and split spacing

由图 6(b) 可以看出,随着分裂间距变化,导线表面最大电场强度呈 V 型变化,存在最小值. 所以在特高压输电线路的实际设计架设中,考虑到导线电压过大而产生档距震荡现象,子导线的分裂间距有一个相对优化的变化范围,图 6(b) 可看出,子分裂导线间距取  $35 \sim 50$  cm 较为合适。

3.3 子导线横截面积的影响

计算了横截面积  $S = 600 \sim 1\,000$  mm<sup>2</sup> 时的变化,其余各参数按 3.1 节中保持不变. 导线表面最大电场强度的变化规律见图 7(a)。

由图 7(a) 可以看出,子导线横截面积越大,导线表面的最大电场强度越小,且变化显著,但继续增加子导线的横截面积,实际应用中会使导线变重,增加安全风险,且投资成本变高,所以子导线的横截面积最大不要超过  $1\,000$  mm<sup>2</sup>。

3.4 导线对地高度的影响

笔者计算了高度  $H = 18 \sim 26$  m 时的变化,其余各参数按 3.1 节中保持不变. 导线表面最大电场强度的变化规律见图 7(b)。

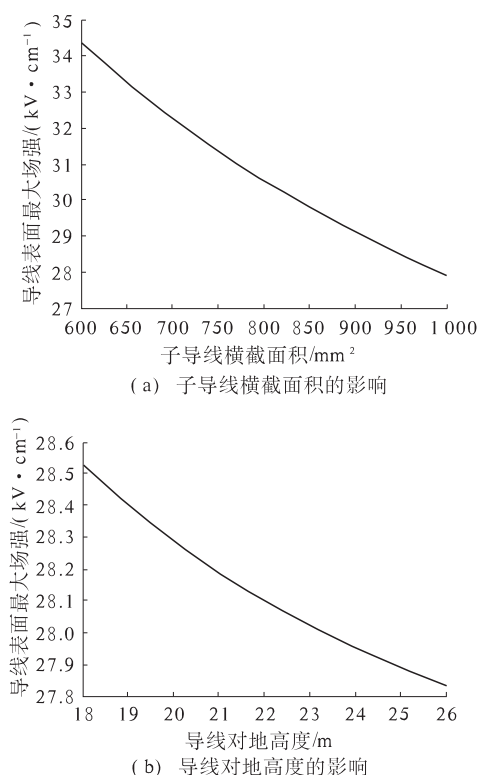


图7 子导线横截面积和导线对地高度的影响

Fig.7 Influence of bundle cross-section and height of lines

由图7(b)可知,随着导线高度增加,导线表面的最大电场强度值减小,但相对变化量并不显著.导线对地高度对于表面电场的影响不大.在特高压输电线路的实际架设过程中,可根据线路附近电磁环境敏感点的分布情况,有选择地设置导线高度.

### 3.5 极导线间距的影响

笔者取极导线间距  $L = 22 \sim 30$  m,其余各参数按3.1节中保持不变.导线表面最大电场强度的变化规律见图8.由图8可知,极导线间距和导线表面最大电场强度的变化也成反比关系.即随着极导线间距增大,导线表面最大场强值减小,其影响效果并不明显,这和第三节中设定的将

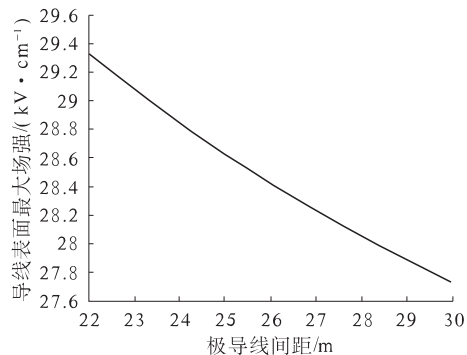


图8 极导线间距的影响

Fig.8 Influence of pole spacing

双极导线当作单极导线处理的假设完全符合.

## 4 结论

分裂导线数、子导线横截面积、导线对地高度和极导线间距这4种影响因素均与导线表面的最大电场呈反比关系.其中,导线分裂数对表面电场的影响较大,但当分裂导线超过6时,影响效果会减小;其次子导线横截面积的影响较明显,然而考虑施工要求,当超过  $1000 \text{ mm}^2$  时,会增加施工难度;导线对地高度和极导线间距的影响相对来说比较小,可根据实际工程的要求适当调整.

子导线间距变化为V型,因此在特高压直流线路的实际架设过程中,可以从子导线间距的最优值范围中选择合适的数值,从而使线路导线表面的最大电场强度达到更小.

## 参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 14-53.
- [2] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
- [3] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
- [4] 王小凤, 周浩.  $\pm 800 \text{ kV}$  特高压直流输电线路电磁环境研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 109-112, 121.
- [5] 陈习文. 单极直流输电线路分裂导线表面电场强度和地面标称电场强度的计算[J]. 电气应用, 2012, 31(8): 70-73.
- [6] 甘运良, 卢铁兵.  $\pm 800 \text{ kV}$  直流输电线路分裂导线表面电场强度计算[J]. 南方电网技术, 2009, 3(6): 44-46.
- [7] 孙才华, 宗伟. 一种较准确的分裂导线表面场强的计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 92-96.
- [8] 赵桂峰, 张猛, 李杰, 等. 高压输电导线非线性振动分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(3): 72-75.
- [9] HU Qin, SHU Li-chun. Analysis of conductors' surface electric field of UHVDC transmission lines based on optimized charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2547-2551.
- [10] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-77.
- [11] 司雯. 高压直流及交直流并行输电线路电磁环境研究[D]. 山东: 山东大学信息工程学院, 2011.
- [12] 杨勇, 陆家榆, 雷银照. 极导线垂直排列直流线路地面合成电场的一种计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 13-18.

[13] 杨文翰,吕英华.用模拟电荷法求解高压输电线路附近电磁场[J].电网技术,2008,32(2):47-50,55.

Factors and Analysis on Surface Electric Field of UHVDC Transmission Line

MA Li, WANG Zhen-xue, YE Hui-ying, ZHU Jun-yao

(Department of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Conductor surface electric field strength is the determining factor for radio interference, audible noise and corona loss of ultra-high voltage direct current(UHVDC) transmission line, so it is particularly important to accurately calculate the conductor surface electric field strength. The study of factors on the surface electric field at home and abroad is more less. Therefore the investigation is carried out on the influence of sub-conductor number, sub-conductor cross section, split spacing and conductor height on the conductor surface maximum field strength, which used charge simulation method by set 12 charge simulation in each sub-conductor. The program is written in MATLAB language to calculate and simulate, and each variable affecting on surface electric field strength is resulted quantitatively, which provides an important theoretical basis for engineering construction how to select the structural parameters of conductor.

**Key words:** UHVDC; surface electric field; charge simulation method; Factor analysis

(上接第 51 页)

[15] 王俊,赵静超,刘立新. 预应力度对梁徐变系数与徐变挠度系数数值关系影响[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34 (5):26~30.

[16] 王俊,刘立新. 折线先张预应力混凝土梁徐变试验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26 (9): 7~10.

Calculation Model for Long-term Deflection of Prestressed Concrete Beam with Pretensioned Bent-up Tendons

WANG Jun<sup>1,2</sup> KONG Ya-mei<sup>1</sup> LIU Li-xin<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering , Xuchang University, Xuchang 461000, China; 2. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Precisely predicting the long term deflection is one of the most important advantages of prestressed concrete beam with pretensioned bent-up tendons. By loading three prestressed concrete beams with pretensioned bent-up tendons in a long term, the mid-span deflection and section creep strain were studied. Together with the numerical relationship expression between creep coefficient and creep deflection coefficient which was established earlier, the numerical relationships among creep coefficient, long-term deflection coefficient, and creep deflection coefficient were further studied. The results show that: The value of the long-term deflection coefficient is 1.1 times that of the creep coefficient. Finally, a practical expression was derived for calculating the long-term deflection of prestressed concrete beam with pretensioned bent-up tendons, which took a number of influencing factors into consideration, such as concrete shrinkage, concrete creep, partially prestressed ratios, the axial compression and the moment value due to prestressing, component equivalent sectional area and the section modulus of bending, etc..

**Key words:** prestressed concrete beam with pretensioned bent-up tendons; long-term deflection; creep coefficient; creep deflection coefficient; calculation model