

# 特高压交流输电线路工频电磁环境分析

许翠娥<sup>1</sup> 文艺<sup>2</sup> 李建明<sup>3</sup>

(1. 华电四川宝珠寺水力发电厂, 四川 广元 628003; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;  
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 随着特高压交直流输变电工程建设的逐渐开展, 该电压等级下线路走廊附近电磁环境越来越受到人们和环境部门的重视。以晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 单回交流输电线路为例, 利用 ANSYS 有限元分析软件对不同导线布置情况下输电线路附近的电场和磁场分布进行了建模分析。研究表明, 1 000 kV 特高压单回交流输电线路附近电磁场满足相关标准要求。

**关键词:** 特高压; 有限元分析; ANSYS; 工频电磁场

**Abstract:** With the gradual construction of the ultra-high voltage (UHV) AC/DC power transmission and transformation projects, the electromagnetic environment near the line corridors under such voltage level gets more and more attention of the people and the environmental department. Taking Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1 000 kV single-circuit AC transmission line for example, the distribution of electric field and magnetic field near the transmission line under different conductor configurations are analyzed in modeling using ANSYS finite element analysis software. The researches show that the electromagnetic field near 1 000 kV UHV single-circuit AC transmission line satisfies the requirements of the related standards.

**Key words:** ultra-high voltage (UHV); finite element analysis; ANSYS; power-frequency electromagnetic field

中图分类号: TM451+2 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0063-05

## 0 引言

交流输电线路在正常工作时, 导线上的电荷将在周围空间产生工频电场, 导线内的电流将在周围空间产生工频磁场。特高压电网随着电压等级的升高和电流的增加, 使得其工频电磁场对周边环境的影响变大, 因而越来越受到工作人员和普通民众的关注。沿特高压交流输电线路走廊附近的工频电磁场分析, 也成为了世界各国学者研究的热点问题。沿特高压输电线路附近的工频交变电场不仅会造成无线电干扰和可听噪声等环境问题, 还会对处于线路附近人体的健康和精神造成影响<sup>[1]</sup>。

输电线路产生的工频电场对人类的影响主要是稳态电击、暂态电击和可能的生态影响, 导线表面的电场分布关系到线路电晕放电, 而电晕效应正是引起无线电干扰和可听噪声的主要原因; 处于输电线路附近的人体会在线路产生的工频磁场作用下产生感应电流, 超过一定限制的感应电流会使人体产生不适感, 影响人的健康。鉴于特高压输电线路对周

围电磁环境的重要影响, 各国对其周围电磁场分布做了大量的研究, 也提出了各自的电磁环境限值标准, 可为特高压输电线路铁塔、线路走廊、导线选型等提供重要依据。因此, 研究特高压交流输电线路的工频电磁环境是非常有必要的。

## 1 空间工频电磁场计算方法

可用于交流输电线路工频电磁场分析的数学模型和计算方法有很多种。出于简化特高压交流输电线路周围电磁场分布模型的考虑, 目前的工程计算中大多采用二维空间模型。其主要的计算方法包括: 等效电荷法、有限差分法、有限元法和矩量法等<sup>[2]</sup>。以电场分布为例, 利用等效电荷法和有限元法的计算原理如下。

### 1.1 等效电荷法理论基础

以边界上的电荷分布或一组虚设的模拟电荷为未知数, 根据库仑定律直接决定的由电荷分布求解电位的积分方程, 利用已知的边界条件, 写出一组对电荷求解的线性方程组, 再按所求得的电荷, 便得出

电场空间分布的近似解。这类数值计算方法主要就是等效电荷法。

作为求解静电场的有效方法,模拟电荷法是基于电磁场的唯一性定理,将电极表面连续分布的自由电荷或介质分界面上连续分布的束缚电荷用一组离散化的模拟电荷予以等值替代,再应用叠加原理,将离散的模拟电荷在空间所产生的场量叠加,即得原连续分布电荷所产生的空间电场分布。静态电场的数学模型可视为以电位函数为待求量的泊松方程或拉普拉斯方程的定解问题,但在实际工程问题中,电荷的分布情况往往是未知的,不能直接由给定的边界条件解出。

### 1.2 有限元法理论基础

从拉普拉斯方程或泊松方程出发,将电场连续域内的问题变为离散系统的问题来求解。也就是说,把场域空间划分为有限个网格,以网格节点的电位为所求未知数,利用已知的边界条件,写出一组对节点上的电位求解的线性方程组,从而求出电场空间分布的近似解。这类数值计算方法主要就是有限元法。

有限元法是一种以变分原理和剖分插值为基础的方法<sup>[3]</sup>。在计算时,他将研究场域剖分为若干有限单元,再利用彼此间的插值函数来表达每个单元的解,进而利用电磁学中相关原理来建立以求解节点未知量的有限元方程,从而将一个连续域中的无限自由度问题转化为离散的有限自由度问题。

### 1.3 计算方法比较

通过比较计算特高压交流输电线路周围电磁场的方法可以知道,采用等效电荷法可计算无边界区域,计算数据量小,计算时间短;但对于分析边界情况复杂,变化比较严重的场域问题时,应用性较差。有限元法具有多种网格划分方法,能够适应于复杂多变的边界形状,有限单元即可以为曲面也可以为曲线单元,从而保证了复杂边界形状的计算精度<sup>[4]</sup>。故采用有限元分析软件 ANSYS 来分析特高压交流输电线路周围工频交变电磁场的分布状况。

## 2 仿真模型建立

### 2.1 仿真计算方法

1 000 kV 特高压交流输电线路通常都处在比较复杂的地理环境中,计算它产生的电磁场较为复杂。为了便于分析和计算,现对其输电线路周围电磁场

计算模型做了如下简化处理。

- 1) 将工频电磁场看作准静态场;
- 2) 把三维电磁场视作二维场。因特高压输电线路较长,为简化计算模型,故而忽略线路端部效应和弧垂,并取输电线路弧垂的最低点为导线对地高度;
- 3) 忽略线路附近铁塔、树木以及其他建筑物对电磁场分布的影响;
- 4) 忽略系统和负荷的不对称性以及电压、电流的波动,将线路运行电压看作三相对称的正弦电压;
- 5) 将大地视作良导体,在计算电场分布时取大地电位为零;
- 6) 电晕放电时,不影响导线表面的电磁场分布情况和附近空气介电常数,即可将输电线路周围空气视为同一介质。

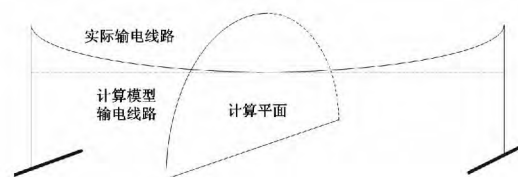
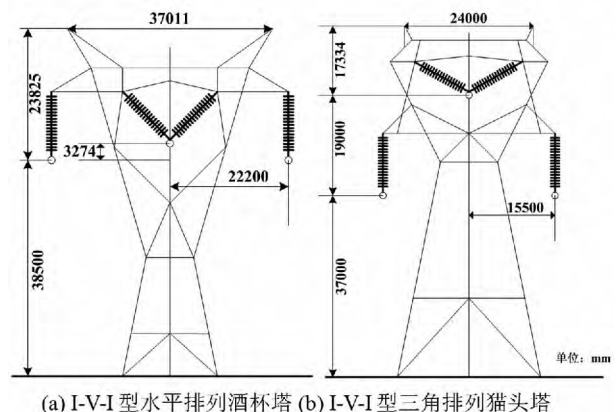


图 1 特高压线路等效计算模型

### 2.2 特高压交流输电线路尺寸和导线布置

中国晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压单回交流输电线路杆塔典型塔型如图 2 所示。图 2 (a)、(b) 中输电线路均采用 8 分裂导线,分裂间距均为 0.4 m,导线型号为 8 × LGJ - 500/45 钢芯铝绞线,子导线半径为 0.015 m,弧垂为 17 m;避雷线型号为 LBGJ - 150 - 20AC 铝包钢绞线,避雷线半径为 0.008 m,弧垂为 15 m<sup>[5]</sup>。

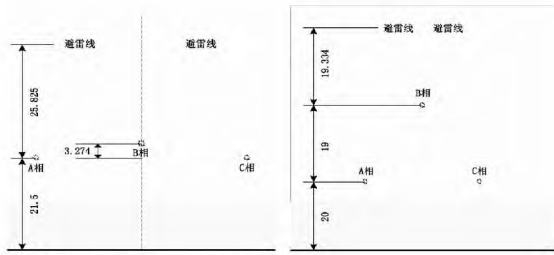


(a) I-V-I 型水平排列酒杯塔 (b) I-V-I 型三角排列猫头塔

图 2 1 000 kV 特高压单回线路杆塔参数

### 2.3 有限元仿真模型

按照上述电场计算条件和导线布置数据,分别建立考虑了避雷线影响的 I - V - I 型水平排列和 I

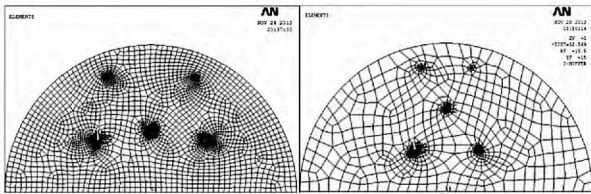


(a) 酒杯塔导线布置及相序 (b) 猫头塔导线布置及相序

图 3 导线离地最低点界面图

-V-I 型三角排列的 1 000 kV 特高压单回交流输电线路 ANSYS 有限元计算模型。

为了方便分析线路周围电场分布,酒杯塔和猫头塔建立了圆心在 B 相分裂导线正下方地表,半径分别为 60 m 和 70 m 的半圆弧的远场边界。其网格划分结果如图 4 所示。



(a)水平排列导线网格划分结果(b)三角排列导线网格划分结果

图 4 输电线路有限元模型网格划分结果

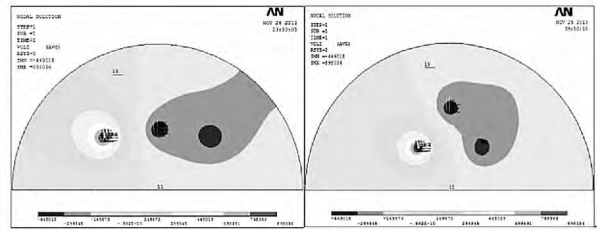
### 3 仿真计算结果

#### 3.1 输电线路周围电场分布

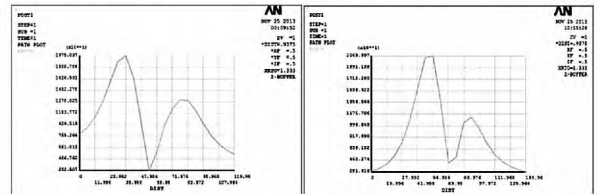
中国 1 000 kV 特高压交流电网最高运行线电压为 1 100 kV 相电压峰值为 898 kV。当 A 相初始相角为 0°时,三相导线施加的电压载荷为  $U_A = 898.036$  kV  $U_B = -449.018$  kV  $U_C = -449.018$  kV;当 A 相初始相角为 30°时,三相导线施加的电压载荷为  $U_A = 777.722$  kV  $U_B = -777.722$  kV  $U_C = 0$  kV;当 A 相初始相角为 60°时,三相导线施加的电压载荷为  $U_A = 449.018$  kV  $U_B = -898.036$  kV  $U_C = 449.018$  kV;两根避雷线和地面电压载荷均设为 0 V,半圆弧施加远场边界条件。当 A 相初始相角为 90°和 120°时,输电线路周围工频电场分布与相角为 0°和 30°时的情况相似,仅仅是关于铁塔中心线轴对称了而已,故不再分析。

不同 A 相电压初始相角情况下, I-V-I 型水平排列导线和 I-V-I 型水平排列三角排列导线线路周围电位梯度分布云图以及离地 1.5 m 处电场横

向分布如图 5、6、7 所示。

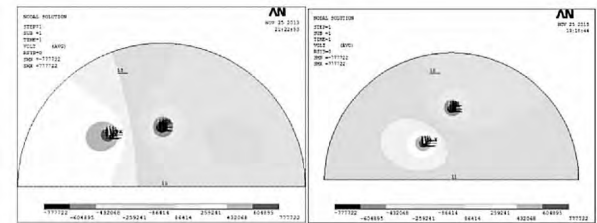


(a)水平排列导线电位分布云图 (b)三角排列导线电位分布云图

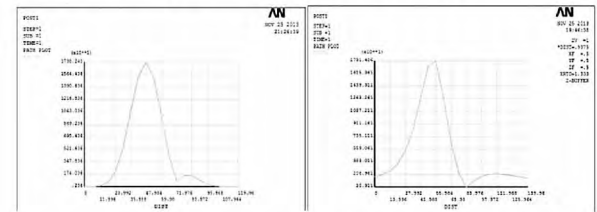


(a)水平排列导线电场横向分布 (b)三角排列导线电场横向分布

图 5 A 相电压初始相角为 0°时电位分布云图及离地 1.5 m 处电场横向分布



(a)水平排列导线电位分布云图(b)三角排列导线电位分布云图



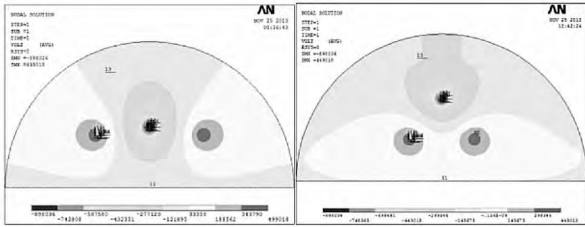
(a)水平排列导线电场横向分布 (b)三角排列导线电场横向分布

图 6 A 相电压初始相角为 30°时电位分布云图及离地 1.5 m 处电场横向分布

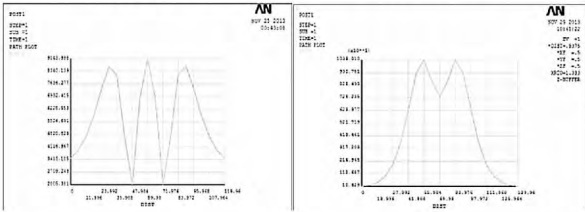
#### 3.2 输电线路周围磁场分布

由于 1 000 kV 特高压交流输电线路,采用了 8 分裂导线,当无并联电抗时,根据 1 000 kV 线路参数计算分析,波阻抗为 242.5 Ω,自然功率为 4 546 MVA,按自然功率传输时相的电流为 2.5 kA<sup>[6]</sup>。故相导线电流峰值为 3.536 kA。

当 A 相初始相角为 0°时,三相导线施加的电流载荷为  $I_A = 3.536$  kA  $I_B = -1.768$  kA  $I_C = -1.768$  kA;当 A 相初始相角为 30°时,三相导线施加的电流载荷为  $I_A = 3.062$  kA  $I_B = -3.062$  kA  $I_C = 0$  kA;当 A 相初始相角为 60°时,三相导线施加的电流载荷



(a) 水平排列导线电位分布云图 (b) 三角排列导线电位分布云图



(a) 水平排列导线电场横向分布 (b) 三角排列导线电场横向分布

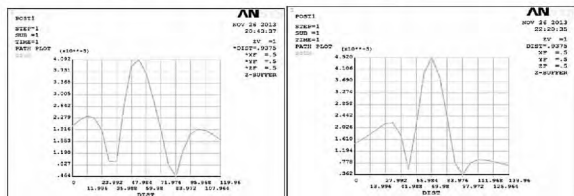
图7 A相电压初始相角为60°时电位分布云图及  
离地1.5m处电场横向分布

为  $I_A = 1.768 \text{ kA}$   $I_B = -3.536 \text{ kA}$   $I_C = 1.768 \text{ kA}$ ; 与电场分布类似; 当A相初始相角为90°和120°时输电线路周围磁场分布与相角为0°和30°时关于铁塔中心线轴对称, 故不再分析。

不同A相电流初始相角情况下, I-V-I型水平排列导线和I-V-I型水平排列三角排列导线线路周围磁力线分布以及离地1.5m处磁感应强度横向分布云图如图8、9、10所示。



(a) 水平排列导线磁力线分布云图 (b) 三角排列导线磁力线分布云图

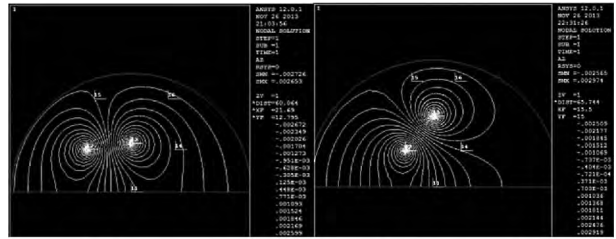


(a) 水平排列导线磁感应强度横向分布 (b) 三角排列导线磁感应强度横向分布

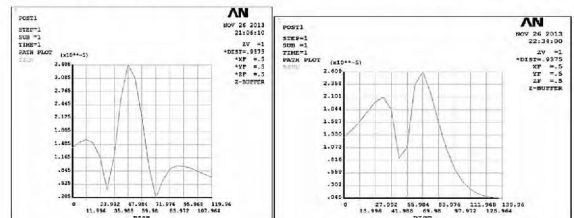
图8 A相电流初始相角为0°时磁力线分布及  
离地1.5m处磁感应强度横向分布

### 3.3 特高压交流输电线路电磁场仿真结果

输电线路下方在距离地面1.5m处电场强度和磁感应强的仿真结果最大值如表1所示。

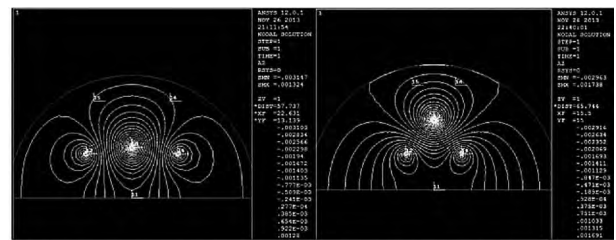


(a) 水平排列导线磁力线分布 (b) 三角排列导线磁力线分布

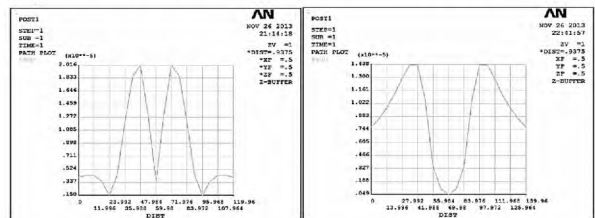


(a) 水平排列导线磁感应强度横向分布 (b) 三角排列导线磁感应强度横向分布

图9 A相电流初始相角为30°时磁力线分布及  
离地1.5m处磁感应强度横向分布



(a) 水平排列导线磁力线分布 (b) 三角排列导线磁力线分布



(a) 水平排列导线磁感应强度横向分布 (b) 三角排列导线磁感应强度横向分布

图10 A相电流初始相角为60°时磁力线分布及  
离地1.5m处磁感应强度横向分布

表1 离地1.5m处电磁场仿真结果最大值

导线布置形式	电场强度幅值 /(kV·m <sup>-1</sup> )			磁感应强度幅值 /μT		
	0°	30°	60°	0°	30°	60°
I-V-I 水平排列	1.975	1.738	0.904	40.92	34.08	20.16
I-V-I 三角排列	2.070	1.791	1.033	35.20	26.09	14.38

上述计算结果均满足国家环保总局制定的HJ/T 24-1998《500kV超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》标准对电磁场限值的要求。从表1中可以看出,距地面1.5m处最大电场强度未超过4kV/m的限值,最大磁感应强度未超过100

$\mu\text{T}$  的限值<sup>[7]</sup>。由图 5、6、7 可以得到, A 相电压初始相角为  $0^\circ$  或  $120^\circ$ 、 $30^\circ$  或  $90^\circ$  时, 离地 1.5 m 处场强最大值出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内, A 相电压初始相角为  $60^\circ$  时, 场强最大值出现在边相导线附近; 由图 8、9、10 可以得到, A 相电流初始相角为  $0^\circ$  或  $120^\circ$ 、 $30^\circ$  或  $90^\circ$  时, 离地 1.5 m 处磁感应强度最大值出现在距离线路中心 0 ~ 15 m 范围内, A 相电流初始相角为  $60^\circ$  时, 磁感应强度最大值出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内。

## 4 结 论

运用 ANSYS 有限元分析软件, 对 1 000 kV 特高压单回交流输电线路在典型导线布置形式下的电磁环境做了仿真计算, 其计算结果与参考文献 [1] 类似。结果表明如下。

1) 特高压单回交流输电线路下方离地 1.5 m 处电磁场强度均满足国家相关标准的要求, 不会对地面人员产生危害;

2) 电场强度最大值在 A 相电压初始相角为  $0^\circ$  或  $120^\circ$ 、 $30^\circ$  或  $90^\circ$  的情况下, 出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内, 初始相角为  $60^\circ$  时, 出现在边相导线附近; 磁感应强度最大值在 A 相电压初始相角为

0°或 120°、30°或 90°的情况下, 出现在距离线路中心 0 ~ 15 m 范围内, 初始相角为 60°时, 出现在距离线路中心 10 ~ 30 m 范围内;

3) 酒杯塔导线到地面的距离较猫头塔略高, 故典型水平布置导线电场强度较三角布置导线略低; 且导线水平布置时磁感应强度较大。

## 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 王晓燕. 特高压交流输电线路电磁环境研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [3] 刘红文, 杨卓, 谭向宇, 等. 高海拔 500 kV 紧凑型输电线路电场仿真分析与对比研究 [J]. 电线电缆, 2013 (2): 42 - 45.
- [4] 程炜. 特高压输电线路电磁环境的数值仿真研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [5] 庄秋月. 1 000 kV 变电站雷电侵入波的分析研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [6] 刘振亚. 特高压输电知识问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] HJ/T 24 - 1998, 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范 [S].

(收稿日期: 2013 - 12 - 10)

(上接第 22 页)

挖掘的潜力, 通过开发人工智能和调度算法能进一步提高调度指令准确性与科学性, 不断探索创新, 创造更大的经济价值和社会效益。

## 参考文献

- [1] 雷怀光, 张振. 国基于 .NET 技术的高校人事管理系统的研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2008, 26(5): 162 - 165.
- [2] Ferrero RW, Rivera JF, Shahidehpour SM. A Dynamic Programming Two - stage Algorithm for Long - term Hydrothermal Scheduling of Multireservoir Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1534 - 1540.
- [3] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 120 - 130.
- [4] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment

of Plug - in Hybrid Electric Vehicles [R]. New York: EPRI, 2007: 23 - 27.

- [5] 王志平, 熊光泽. 实时调度算法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(2): 205 - 208.
- [6] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49 - 52.

## 作者简介:

银涛 (1981), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;  
王彦洋 (1981), 学士学位, 从事科技、项目及工程管理工作;

张宏图 (1973), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;  
吴璇 (1980), 学士学位, 从事电力监控运行工作;  
胡翔 (1976), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作;  
张勤勤 (1982), 学士学位, 从事通信运维工作;  
蒋科 (1983), 硕士研究生, 从事电力调度运行工作。

(收稿日期: 2013 - 11 - 05)