

上海地区典型 220 kV 架空线线下场强的研究

孟毓¹, 张永隆², 肖鑫鑫¹

(1. 上海电力设计院有限公司, 上海市 卢湾区 200025; 2. 上海电力公司, 上海市 浦东新区 200041)

Research on Electric Field Strength Below Typical 220 kV Overhead Transmission Lines in Shanghai Region

MENG Yu¹, ZHANG Yong-long², XIAO Xin-xin¹

(1. Shanghai Electrical Designing Institute, Luwan District, Shanghai 200025, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New District, Shanghai 200041, China)

ABSTRACT: According to concrete condition of Shanghai region, the electric field strengths below various kinds of 220 kV overhead transmission lines, including double 220 kV circuit on the same tower, four 220 kV circuit on the same tower and four 220 kV/110 kV hybrid-circuit on the same tower, under different arrangement of phase sequence are calculated by charge simulation method, while the influence of adjacent UHVAC transmission line on electric field strength below 220 kV transmission line is taken into account. By means of simulation of electric field strengths below various kinds of 220 kV overhead transmission lines with different conditions, the impacts of existing 220 kV overhead transmission lines on environment are evaluated and the adoptable measures to reduce electric field strength are proposed. Besides, the influence of adopting shield wire on electric field strengths below 220 kV overhead transmission line is analyzed and it is pointed out that adopting shield wire can take effect of reducing electric field strengths below overhead transmission line. The calculation results are verified by on-site measured data, and both calculation results and measured results show that at present the electric field strengths below 220 kV overhead transmission lines in Shanghai region will not exceed the specified limit value in specifications.

KEY WORDS: overhead transmission line; electric field strength below transmission lines; double circuit on the same tower; multi-circuit on the same tower

摘要: 针对上海地区条件, 基于模拟电荷法对多种 220 kV 架空线下的电场强度进行了计算, 包括同塔双回路、220 kV 四回路、220 kV/110 kV 四回路等不同相序排列情况下的线下场强值, 并考虑了邻近存在超高压线路时对线下场强的影响。通过对不同条件架空线下场强的仿真计算, 评估了现有 220 kV 架空线对环境的影响, 并提出了降低场强可采取的措施。另外, 探讨了采用屏蔽线对 220 kV 线路线下工频电场的影响, 指出架设屏蔽线能够起到降低线下场强的作用。

通过现场实测数据对计算结果进行了验证, 计算及实测结果均表明, 目前上海地区的 220 kV 架空线线下场强一般不会超过标准限值。

关键词: 架空线; 线下场强; 同杆双回路; 同杆多回路

0 引言

随着电网规模的不断扩大, 架空线路越来越接近公众活动区域, 甚至进入市区, 由超高压线路引起的环境投诉与纠纷也越来越多。高压输电线路下的电磁环境受到越来越多的关注, 特别是高压线下电场强度, 已成为环境保护和电磁兼容技术领域不可忽视的问题^[1-4]。上海地区有关架空线(特别是 220 kV 架空线)环保指标的争端时有发生, 在这种条件下, 上海电力公司针对上海地区典型的 220 kV 架空线线下场强开展了研究工作, 并取得了初步成果。本文针对上海地区 220 kV 架空线实际条件, 对双回路、四回路、不同线路邻近等多种情况及线下屏蔽线效果等进行了计算分析。

1 线下场强的基本理论

架空线下场强的计算方法很多, 如模拟电荷法^[5]、模拟电流法、矩量法等数值方法^[6], 本文采用了等效电荷法对线下场强进行分析。为便于理论分析, 对场强计算问题作了一定的简化:

1) 输电导线是无限长光滑圆柱型导体, 线径相同, 彼此与大地间平行。

2) 送电线半径 $r \ll h$ (架设高度), 则高压送电线上的等效电荷可视为线电荷, 其位置为送电导线的几何中心。

3) 电压等级已知, 电荷分布沿线路无畸变, 即忽略线路电压降、杆塔、横担和周围相邻杆塔的

影响。

4) 导线对地高度按一年中可能的最低高度(即炎热夏季线路满负荷运行时档距中央的对地高度)考虑。

模拟电荷法采用镜像方法来考虑大地对计算场强的影响,如图1所示,设大地是导体,则导线1的镜像载有均匀电荷 $-Q$,且与P点的距离为 L 。

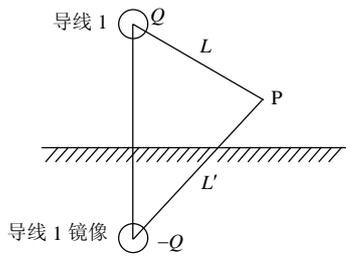


图1 等效电荷原理

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent electric charge

求出各模拟电荷的电位系数,列出矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[p]$ 为 $n \times n$ 阶电位系数矩阵; $[Q]$ 为模拟电荷电量列向量; $[U]$ 为悬链线电位列向量。则可得

$$[Q] = [p]^{-1}[U] \quad (2)$$

求解 $[Q]$ 得出等效电荷,则不同导线电荷在某一场点所引起的电场强度用叠加原理可以求得。当求出各导线单位长度的等效电荷量后,空间任意一点的电场强度可根据叠加原理计算得出。

$$\bar{E}_x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^m Q_i \left(\frac{x-x_i}{L_i^2} - \frac{x-x_i}{L_i^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^m Q_i \left(\frac{y-y_i}{L_i^2} + \frac{y+y_i}{L_i^2} \right) \quad (4)$$

式中: m 为导线(包括地线)数目; Q_i 为导线 i 的等效电荷($i=1,2,\dots,m$); x_i, y_i 为导线 i 的坐标。

求出所求点的场强在 x, y 方向上的分量,在观察点(导线最大弧垂处离地 1m)合成场强:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (5)$$

按照有关环境评价标准要求,计算场强点离地高度取为 1.5m ^[7](架空线设计规程中计算点为 1m 处^[8])。空气介电常数按 $\epsilon=8.86\text{pF/m}$ 计算,则 220kV 双分裂导线的等效半径为

$$R=(rs)^{1/2} \quad (6)$$

式中: r 为子导线半径; s 为子导线间距。计算点位于导线中点弧垂最大处,垂直导线方向。

2 220 kV 双回路线路场强研究

通过对架空线电场强度计算原理的分析,可以知道架空线电场强度大小与架空线导线等效半径、架空线高度、导线相序等因素有直接的关系。我们针对上海地区常用的 220kV 双回路架空线,对不同导线相序条件下的线下场强进行了计算分析。本文采用的架空线铁塔模型见图2。图中标注尺寸的单位为 mm 。典型 220kV 双回路输电线路相序的排列方式见表1。

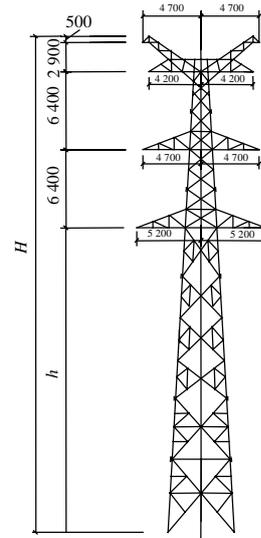


图2 220 kV 铁塔模型($h=27\text{m}$)

Fig. 2 Model of the 220 kV tower ($h=27\text{m}$)

表1 导线相序排列方式

Tab. 1 Arrangement mode of the phase sequence

| 导线排列方式 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| 上相 | AA | AA | AB | AB | AC | AC |
| 中相 | BB | BC | BA | BC | BA | BB |
| 下相 | CC | CB | CC | CA | CB | CA |

对于 220kV 架空线来说,在其他参数不变时,改变架空线的导线排列方式,对计算弧垂最大处垂直导线方向的工频电场的影响很大,图3为表1中导线6种不同排列方式下的线下场强,6种相序分别对应图中由上而下的6条曲线。从图3可知,双回架空线以同相序布置(即 ABCABC)时,线路下

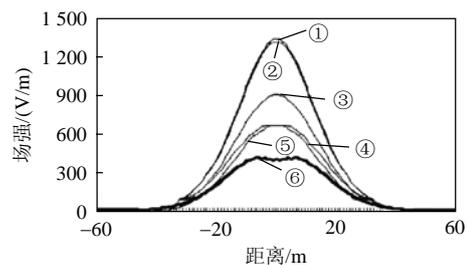


图3 导线相序排列变化时的电场分布
Fig. 3 Electric field distribution under the different phase sequence

方电磁场场强最大，以逆相序排列 (ABCCBA) 时，线路下方电磁场场强最小，其余排列方式产生的场强介于两者之间。所以同杆双回线路在架设时，从环保的角度考虑，为尽量减小地面处场强，应尽可能采用逆相序排列。

3 220 kV 同塔四回路线路场强分布研究

3.1 塔型选择

上海地区除 220 kV 同塔双回路外，在特殊地段还应用了同塔四回路线路，主要为 220 kV 同塔四回路(图 4)及 220 kV 与 110 kV 同塔四回路(图 5)，以

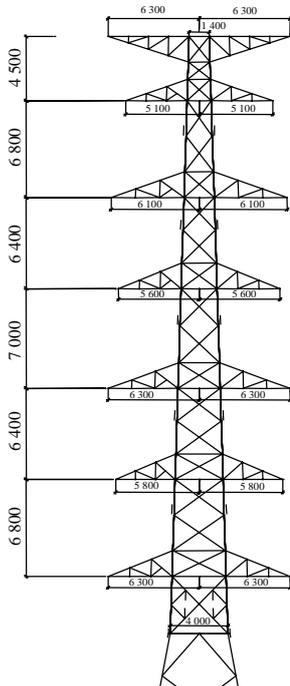


图 4 220 kV/220 kV 同塔四回路塔型
Fig. 4 Drawing of 220 kV/220 kV tower

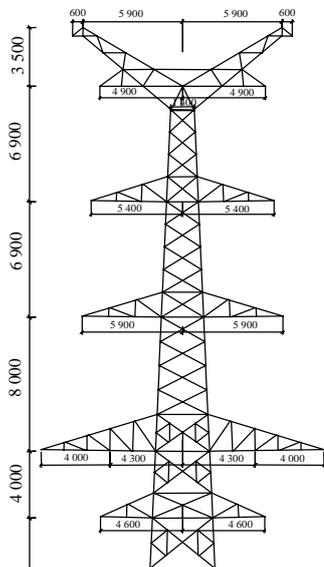


图 5 220 kV/110 kV 同塔四回路塔型
Fig. 5 Drawing of 220 kV/110 kV tower

下即对这 2 种同塔四回路型式进行分析。图中标注尺寸的单位为 mm。

3.2 220 kV/220 kV 型塔线路下场强分布

220 kV/220 kV 型塔分别按照表 2 相序排列导线，以 220 kV 四回路为例，假设呼高为 22 m 时进行线路下场强计算。计算结果见图 6。

表 2 220 kV/220 kV 型塔相序布置形式
Tab. 2 Arrangement mode of the different 220 kV/220 kV phase sequence

| 相序布置 1 | 相序布置 2 | 相序布置 3 | 相序布置 4 |
|--------|--------|--------|--------|
| C | C | C | A |
| B | B | B | B |
| A | A | A | C |
| C | C | A | C |
| B | B | B | B |
| A | A | C | A |

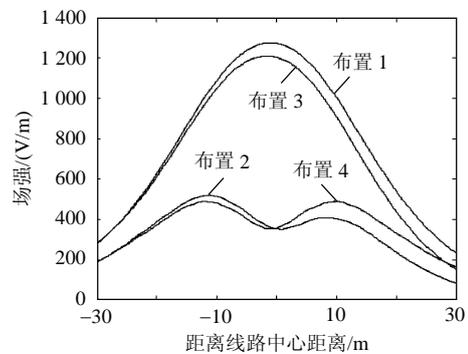


图 6 220 kV/220 kV 型塔线路下场强分布曲线
Fig. 6 Electric field distribution under the different 220 kV/220 kV phase sequence

3.3 220 kV/220 kV 型塔计算结果分析

由图 6 可看出：相序布置 1 和相序布置 3 情况下，高压线下场强较大，最大值分别约为 1300 V/m 和 1200 V/m，其相序特点为下相 220 kV 导线均为顺相序布置而上相 220 kV 分别为顺相序和逆相序布置；而相序布置 2 和 4，即下相 2 回逆相序布置时，场强极值仅为 450 V/m；相序布置 2 和 4 的场强分布差别不大，最大值均不是出现在线路正下方，而是离线路中心约 10 m 处均会出现 2 个场强极值点，2 种布置的场强最大均为 500 V/m。可以看出，220 kV/220 kV 四回路塔型线路下的场强主要由下相导线决定。

3.4 220 kV/110 kV 型塔线路下场强分析

220 kV/110 kV 型塔相序布置见表 3，以上 220 kV 下 110 kV 四回路为例，假设呼高 22 m，计算线路下场强分布，结果见图 7。

3.5 220 kV/110 kV 型塔计算结果分析

由场强分布曲线图 7 可见，相序布置 1 情况下，场强最大，达到约 480 V/m；相序布置 2 和 3 场强

表3 220 kV/110 kV 型塔相序布置形式
Tab. 3 Arrangement mode of the different 220 kV/110 kV phase sequence

| 相序布置1 | | 相序布置2 | | 相序布置3 | | 相序布置4 | | 相序布置5 | |
|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| A | A | A | C | A | C | A | A | A | C |
| B | B | B | B | B | A | B | B | B | B |
| C | C | C | A | C | B | C | C | C | A |
| A B | B A | A B | B A | A B | B A | A B | B C | C B | B A |
| C C | C C | C C | C C | C C | C C | C A | C A | A C | A C |

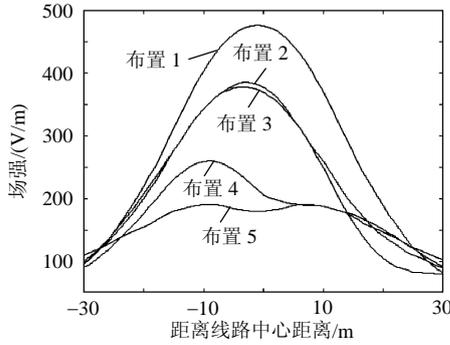


图7 220 kV/110 kV 型塔线路下场强分布曲线
Fig. 7 Electric field distribution under the different 220 kV/110 kV phase sequence

曲线差不多，最大值约 380 V/m。这 3 种相序的布置特点是下相 110 kV 双回路导线为顺相序排列，上相 220 kV 导线排列顺序各不同。

相序布置 4 和 5 均为 110 kV 两回路为逆相序布置，线下场强明显降低。而上相 220 kV 线路逆相序排列时，与其顺相序排列时相比，明显削平了离线路中心 10 m 处的一个场强极值。相序布置 5 的情况下，线路下场强值较小且变化幅度较小。

4 高压线路对邻近线路走廊场强分布的影响

4.1 220 kV 双回路与 220 kV 双回路相邻模型

为节约土地资源，合理利用土地，上海地区几条 220 kV 架空线走廊往往以一定间距(30 m)平行布置，在这种条件下，架空线下的场强是否受到相邻线路的影响也作为研究的一个方向。

图 8 为常规的 2 条 220 kV 双回路走廊平行布置

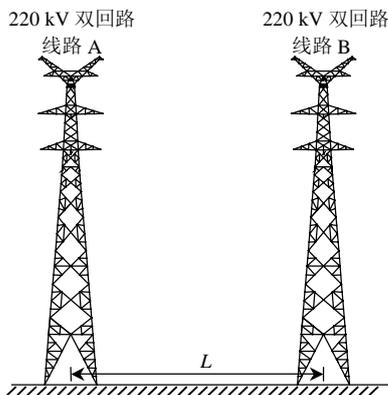


图8 220 kV 双回路线路典型走廊
Fig. 8 Typical corridor of 220 kV two-circuit overhead line

的情况。为了研究邻近线路对场强分布的影响，以线路 A 下场强为研究对象，假设其导线高度为 23 m，塔头类型同图 2，2 回导线均垂直分布，相序为顺相序布置。线路 B 的塔型与 A 相同。

4.2 邻近线路相序布置对场强的影响

假设线路 B 的导线高度为 20 m， $L=22$ m。根据前面分析，线路相序布置一般顺相序的影响最大，逆相序的影响最小，其他相序对场强的影响介于两者之间，这里比较的相序布置就分别取为顺相序、逆相序和一种其他相序，见表 4。计算结果见图 9。

表4 线路 B 相序排列方式
Tab. 4 Arrangement of phase sequence of line B

| 导线排列方式 | 1 | 2 | 3 |
|--------|----|----|----|
| 上相 | AA | AA | AC |
| 中相 | BB | BC | BB |
| 下相 | CC | CB | CA |

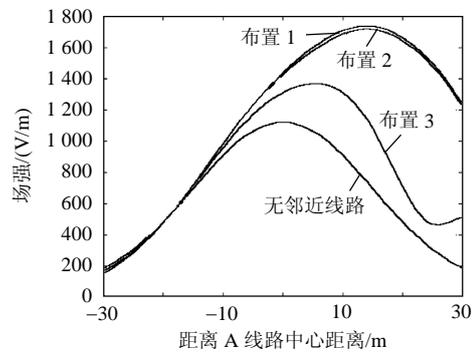


图9 邻近线路不同相序时场强分布曲线
Fig. 9 Electric field distribution under the different phase sequence of the adjacent line

由计算结果可见：邻近线路逆相序布置时，对线路 A 线下场强的影响相对最小，在计算条件下，场强极值从无邻近线路影响时的约 1 000 V/m 增大到 1 300 V/m；邻近线路顺相序布置时，极值达到 1 700 V/m，但仍小于规定的限值。

4.3 邻近线路的远近对场强的影响

假设线路 B 为逆相序布置，导线高度为 20 m，取 $L=22、26、30、35、40$ m 时，计算线路 A 下场强分布见图 10。

由计算结果可见，邻近线路越远，对线路下最高场强的影响越小。当线路间距离从 22 m 增加到

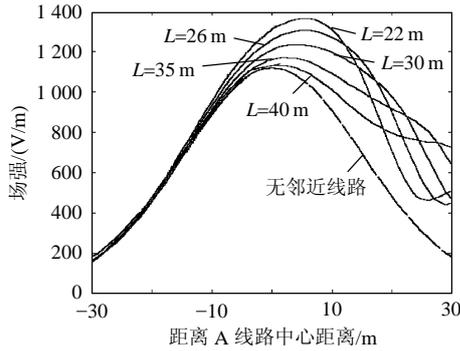


图 10 邻近线路不同距离场强分布曲线
Fig. 10 Electric field distribution under the different distance of the adjacent line

40m 时, 场强极值从 1350 V/m 降到 1100 V/m, 但总体来说, 场强随线路距离增加而减小的幅度不大(邻近线路为 500 kV 亦时有类似影响)。

5 现场实测结果对比

为验证不同条件 220 kV 线下场强的计算结果, 对上海地区 5 条较为典型的 220 kV 线路进行了现场测量, 表 5 为现场实测与计算的线下场强的最大值。可以看出: 电场分布和计算分析结果基本吻合。架空线下的电场强度小于标准规定值, 线下场强的分布趋势也和计算水平相当。虽然实测值与计算值存在一定误差, 但误差不大, 在工程可接受的范围内。从计算和实测结果看, 上海地区 220 kV 架空线线下地面场强一般不会超过 4 kV/m 的标准限值。

表 5 现场实测线下场强
Tab. 5 Measured electric field below the line

| 序号 | 线路参数 | 测量值/ (kV/m) | 计算值/ (kV/m) | 相对 误差/% |
|----|-----------------------------------|----------------|----------------|------------|
| 1 | 220 kV/110 kV 四回路 | 3.5 | 3.3 | 5.7 |
| 2 | 多条 220 kV 单回路、 双回路以及 110 kV 线路 | 1.06 | 1.04 | 1.9 |
| 3 | 220 kV 三回路 | 2.1 | 1.98 | 5.7 |
| 4 | 220 kV 双回路正相序排列 | 1.61 | 1.58 | 1.9 |
| 5 | 220/220 kV 四回路 | 2.05 | 2.0 | 2.4 |

6 采用屏蔽线的架空线线下场强的分析

为降低线下场强, 一般采用逆相序或者加高导线高度的方法, 除此之外, 还可以采用线下悬挂屏蔽线的方法, 在下相导线下方对称架设 2 根屏蔽地线, 假定屏蔽线架设位置为下相导线下方 3 m 处, 如图 11 所示。图中标注尺寸单位为 mm。

根据图 11 所示条件, 对正相序、逆相序架空线线下场强进行了计算, 结果见图 12~13。

由图 12~13 可见: 采用屏蔽线后对架空线线下场强改变还是相当明显的, 正相序、逆相序条件下

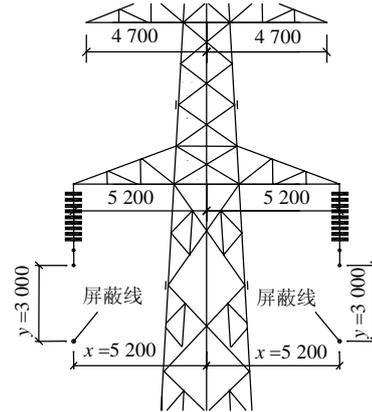


图 11 屏蔽线架设位置
Fig. 11 Position of the shielding line

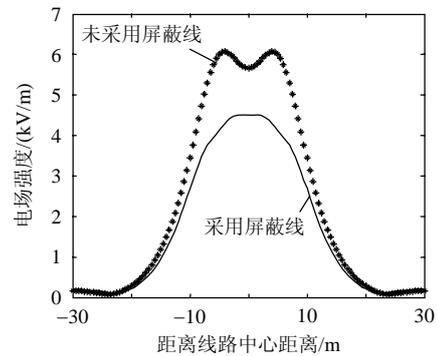


图 12 正相序条件下采用屏蔽线时的线下场强
Fig. 12 Electric field under the positive phase sequence with the shielding line

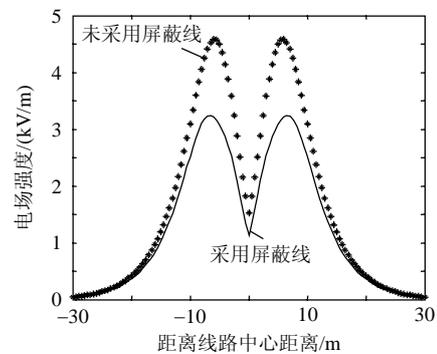


图 13 逆相序条件下采用屏蔽线时的线下场强
Fig. 13 Electric field under the negative phase sequence with the shielding line

线下最大场强降低 25%~30%。

屏蔽线数量、排列方式等对屏蔽线的效果都会产生较明显的影响, 工程中需要根据实际条件进行计算优化确定架设方式^[9]。

在上海某 220 kV 架空线悬挂了 2 根 GJ-50 作为屏蔽线。在屏蔽线悬挂前及悬挂后对线下场强进行了实测, 测量的结果与计算值基本吻合(线下最大场强由 2.3 kV/m 降低至 1.8 kV/m)。在福建某 500 kV 架空线工程中, 也采用了线下架设屏蔽线降低场强的方案, 降低线下场强约 35%^[10]。

7 结论

1) 对于上海地区的 220kV 同塔双回路及多回路线路来说, 在导线高度离地超过 12m 的条件下, 线下场强不会超过有关的标准限值, 但不同相序排列方式对场强值有较大影响, 应尽可能采用逆相序排列方式。

2) 对 220kV 同塔多回路线来说, 线下场强受铁塔下部的导线影响更大。

3) 对架空线路来说, 相邻走廊的 220~500 kV 架空线会对本线路的线下场强产生影响, 在工程实际中, 应对相邻线路的影响进行计算。

4) 可采用屏蔽线来降低架空线线下场强, 工程实际中应该通过计算来选择屏蔽线的悬挂位置及根数。

在下一步工作中, 我们将探索采用有限元法^[11]或模拟电荷法^[12]对架空线下房屋对电场的影响开展研究, 探讨房屋对架空线电场的屏蔽作用。

参考文献

- [1] 郭雄, 聂定珍, 万保权, 等. 架空送电线路的电磁环境及其污染影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 24-26.
Wu Xiong, Nie Dingzhen, Wan Baoquan, et al. Electromagnetic environment of the overhead transmission lines and electromagnetic pollution[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5): 24-26(in Chinese).
- [2] 劳建明, 吴皓, 吴哲, 等. 220 kV 同塔四回线路电磁环境研究[J], 能源工程, 2009(2): 9-14.
Lao Jianming, Wu Hao, Wu Zhe, et al. Research on the electromagnetic environment of 220 kV four circuits on one tower transmission line[J]. Energy Engineering, 2009(2): 9-14(in Chinese).
- [3] Dawalibi F P, Donoso F. Integrated analysis software for grounding, EMF, and EM [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 19-24.
- [4] Bagimki T A. Hazard of low-frequency electromagnetic coupling of overhead power transmission lines to electroexplosive devices[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 1999, 31(4): 393-395.
- [5] 张启春, 邓嗣陶, 阮江军, 等. 高压架空线附近工频电场的数学模型[J]. 电力环境保护, 2000, 16(4): 14-17.
Zhang Qinchun, Deng Sitao, Ruan Jiangjun, et al. Mathematical model of electric field under high voltage overhead line[J]. Electric Power Environmental Protection, 2000, 16(4): 14-17(in Chinese).
- [6] 杨文翰, 吕英华. 用模拟电荷法求解高压输电线附近电磁场[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 47-50.
Yang Wenhan, Lü Yinghua. Application of emulation charge method in calculation of electromagnetic environment near to HV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 47-50 (in Chinese).
- [7] HJ/T—1998 500kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].
- [8] DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- [9] 孟毓. 采用屏蔽线降低线下场强的研究[J]. 电力建设, 2008, 29(5): 30-33.
Meng Yu. Study of the shield line to decrease the field intensity under the overhead line[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(5): 30-33(in Chinese).
- [10] 蒋虹, 焦景慧, 林志和, 等. 超高压线路工频电场超限值对策的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 56-58.
Jiang Hong, Jiao Jinghui, Lin Zhihe, et al. Research on suppression of power frequency electric field due to EHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 56-58(in Chinese).
- [11] 甘艳, 阮江军, 郭雄. 有限元法分析高压架空线路附近电场分布[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 52-55.
Gan Yan, Ruan Jiangjun, Wu Xiong. Analysis of the electric field intensity nearby high voltage transmission line by FEM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 52-55(in Chinese).
- [12] 谢辉春, 张建功, 张小武, 等. 基于模拟电荷法对 500 kV 输电线路跨越民房时导线高度的计算[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 34-37.
Xie Huichun, Zhang Jianguo, Zhang Xiaowu, et al. Charge simulation method based calculation and research on conductor heights of 500 kV transmission lines passing over residences[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 34-37(in Chinese).



孟毓

收稿日期: 2010-04-06。

作者简介:

孟毓(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为送电线路设计, E-mail: mengy@sepd.com.cn;

张永隆(1953—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为送电线路建设管理;

肖鑫鑫(1982—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为送电线路设计。

(责任编辑 李兰欣)