

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.003

模拟电荷法在UHVDC输电线路中的优化及应用

王珍雪, 马 力, 叶会英, 杨明珊, 邱志勇

(郑州大学信息工程学院, 郑州 450052)

摘要: 模拟电荷法是计算特高压直流(UHVDC)输电线路电场最主要的方法之一。文中首次选用导线表面电场强度相对误差作为判断依据,并与传统的电压相对误差方法进行对比,优化分析了模拟电荷法中模拟电荷的位置和个数。分析结果表明模拟电荷均匀分布在子导线半径0.61处的同心圆周上,个数为12时,可以使模拟电荷法最优。同时与自适应模拟电荷法比较,优化后的模拟电荷法计算的电场强度精度较高。因此,文中为模拟电荷法中模拟电荷位置和个数的选取研究,提供了重要的理论依据。

关键词: 模拟电荷法; UHVDC; 计算精度; 优化

Optimization and Application of Charge Simulation Method for UHVDC Transmission Lines

WANG Zhenxue, MA Li, YE Huiying, YANG Mingshan, QIU Zhiyong

(Institute of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The charge simulation method is one of the most important means to calculate and analyze the electric field of UHVDC transmission line. This article takes the relative error of the electric field on wire surface as a criterion to analyze and optimize the location and number of simulation charge, and compared this method with the conventional method in which the relative error of voltage on wire surface is used. The results show that when the simulation charge distributes evenly in the sub-wire concentric circle with a radius of 0.61 times of the sub-wire radius and when the charge number is 12, the proposed charge simulation method becomes optimal. The optimized charge simulation method can get higher accuracy in calculating the electric field, compared with the adaptive charge simulation method.

Key words: charge simulation method; UHVDC; accuracy; optimization

0 引言

作为解决特高压直流输电线路导线电场的主要方法,模拟电荷法具有无界性、降低计算问题维数、方法简单、实用性强等优点,因而被广泛采用^[1-5]。目前,在特高压直流输电线路中,对模拟电荷法的优化主要有两种改进,一种是自适应模拟电荷法^[6],另一种是优化模拟电荷法^[7]。

自适应模拟电荷法在每根子导线内只设置一个模拟电荷,其位置通过自适应方法求得。这种方法只需设置一个模拟电荷,但是自适应的前提是必须在程序开始前设置好计算所能达到的精度,且精

度的设置不能太高,因为单个模拟电荷可以控制的计算精度有限,太高的精度设置会使模拟电荷在自适应过程中出现差错,而无法求解。

优化模拟电荷法利用电极边界上轮廓点的已知电位与计算电位之差的平方和构成目标函数,设法找出使目标函数得极小值的设计变量,用以确定模拟电荷的位置、尺寸和量值。其难点在于当电极结构复杂时,优化变量较多,目标函数过于复杂,初值设置不好会造成不收敛从而导致计算失败。所以该方法不能较好地解决目标函数梯度矢量的计算精确度问题,因而目标函数的设计变量数不容易提高。

自适应模拟电荷法和优化模拟电荷法都是基于模拟电荷法的改进,通过以上分析,这两种方法都有各自的不足。文中仍以模拟电荷法为基础进行

收稿日期:2015-06-19; 修回日期:2015-07-23

基金项目:河南省科技攻关项目(142102210497)。

Project Supported by Science and Technology Project of Henan Province(142102210497).

研究,以模拟电荷的位置和个数的选取为要素进行优化,从而为导线的场强计算和分析提供一种行之有效的有效的手段。这对解决现阶段特高压直流输电线路的精度问题具有重要意义。

1 模拟电荷法

模拟电荷法本质上是广义的镜像法,基于静电场的唯一性定理,将导体电极表面连续分布的自由电荷用位于导体内部的一组离散的电荷来替代,这些离散的电荷即为模拟电荷。然后应用叠加定理,用这些模拟电荷的解析公式计算场域中任意一点的电位或电场强度^[8-12]。

1.1 设置模拟电荷

每根子导线的内部设置 n 个模拟电荷。子导线半径为 r , 模拟电荷均匀分布在半径为 $cr(0 < c < 1)$ 的同心圆周上,以 $n=6$ 个模拟电荷为例,见图 1。全部模拟电荷构成矩阵

$$[q] = [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_N]^T. \quad (1)$$

式(1)中, N 是导线模拟线电荷的总数。

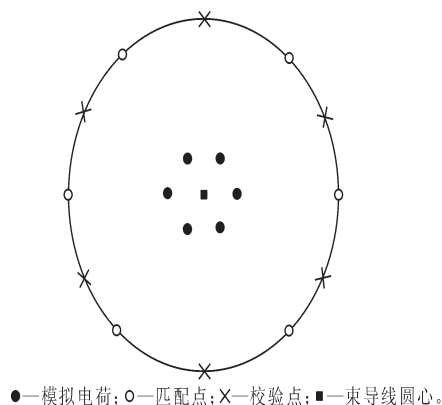


图1 模拟电荷分布示意图

Fig. 1 Distribution of the simulation charge

1.2 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,见图 1。各匹配点的电位分别等于所在导线的对地电压,构成矩阵

$$[u] = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_N]^T. \quad (2)$$

列电位方程,求解电位系数矩阵 $[p]$

$$\begin{cases} u_1 = p_{1,1}q_1 + p_{1,2}q_2 + \cdots + p_{1,N}q_N \\ u_2 = p_{2,1}q_1 + p_{2,2}q_2 + \cdots + p_{2,N}q_N \\ \vdots \\ u_N = p_{N,1}q_1 + p_{N,2}q_2 + \cdots + p_{N,N}q_N \end{cases}. \quad (3)$$

写成矩阵形式为^[13-15]

$$[u] = [p][q]. \quad (4)$$

式(4)中, p_{ij} 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,计算式为

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'_{ij}}{r_{ij}}; \quad p_{j,i} = p_{ij}. \quad (5)$$

式(5)中: ϵ_0 是真空中介电常数; r_{ij} 和 r'_{ij} 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。求解线性方程组式(4),得出模拟电荷 $[q]$ 。

1.3 设置校验点

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,见图 1。第 i 个校验点的电位

$$v_i = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r'_{ij}}{r_{ij}}. \quad (6)$$

式(6)中, r_{ij} 与 r'_{ij} 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 个校验点所的实际电位是导线对地对地电压 u_0 , 则电位相对误差为

$$\delta = \left| \frac{v_i - u_0}{u_0} \right| \times 100\%. \quad (7)$$

1.4 计算电场

当设置的模拟电荷满足精度要求时,可求出导线表面和空间中任意一点的场强^[16-23]

$$E_p = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{\mathbf{r}_{pj}}{r_{pj}} - \frac{\mathbf{r}'_{pj}}{r'_{pj}} \right). \quad (8)$$

式(8)中: r_{pj} 和 r'_{pj} 分别是第 j 个模拟线电荷及其镜像电荷到点 p 的距离; $\mathbf{r}_{pj}$ 和 $\mathbf{r}'_{pj}$ 分别是第 j 个模拟线电荷及其镜像电荷到点 p 的单位距离矢量。

2 优化分析

在采用模拟电荷法进行场域求解时,最主要的问题是如何确定模拟电荷的位置和个数。因此文中研究的重点是:

1) 模拟电荷的位置问题。模拟电荷距离匹配点的远近体现了此模拟电荷对相应匹配点及其他匹配点的“贡献”大小。如果距离较小,则“关心”其他匹配点相对较少;距离远则对相应匹配点“贡献”不足。

2) 模拟电荷的数量问题。在一个具体问题中模拟电荷的数量既不能太少,也不能太多。数量少则影响电场数值计算精度;而数量多将导致系数矩阵病态,同样降低求解精度。

2.1 模拟电荷位置的优化

对于双极性导线来说,以正(负)极束导线圆心所在垂线为对称轴,左右两边子导线内部的模拟电荷对称排列,同时以正负两极中心所在垂线为对称轴,对应的子导线内部的模拟电荷对称排列。以每根子导线内设置 3 个模拟电荷为例,见图 2。

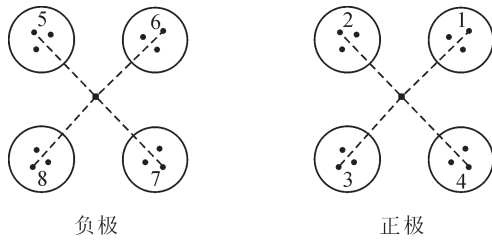
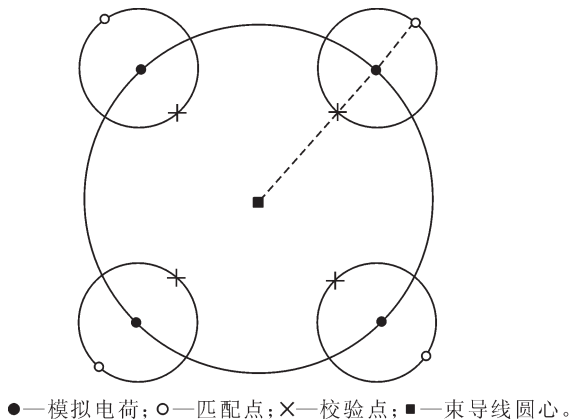


图2 双极中模拟电荷位置示意图

Fig. 2 Simulation of charge position in bipolar

由图2可以看出, 正极中1号子导线和2号子导线的模拟电荷位置关于束导线圆心所在垂线对称, 3号子导线和4号子导线的模拟电荷位置关于束导线圆心所在垂线对称。同理负极亦如此。同时, 正极中1号子导线和负极中5号子导线的模拟电荷位置关于正负两极中心所在垂线对称, 其余导线依次类推。按照如上规则排列的模拟电荷, 可以保证各内部模拟电荷的对称性, 方便之后的计算。

当子导线内部设置一个模拟电荷时, 令该模拟电荷在子导线的中心位置。导线束圆心与子导线圆心的连线与子导线表面的交点, 设为校验点, 连线的延长线与子导线表面的交点, 设为匹配点, 以四分裂导线为例, 见图3。



●—模拟电荷; ○—匹配点; ×—校验点; ■—束导线圆心。

图3 模拟电荷个数为1时位置示意图

Fig. 3 Location of the simulation charge when the number is 1

当子导线内部设置 $n(n \geq 2)$ 个模拟电荷时, 模拟电荷应均匀分布在子导线半径为在 $cr(0 < c < 1)$ 的同心圆周上。文[24]中给出了在一般的场域求解计算中, 模拟电荷的放置原则。即匹配点与模拟电荷点的垂直距离 a 与该处左右相邻两个匹配点间的距离 b 的比例 f 应满足

$$f = a/b = 0.2 \sim 1.5. \quad (9)$$

一般 f 取 0.75。 f 太大或太小都会造成合成电位的等位面与电极表面形状的不符合。

参考式(9), 文中将其应用到特高压直流输电线路

路的场域计算中, 并针对模拟电荷个数不同时, 对 f 的取值范围进行了详细的讨论, 从而更加准确地求得模拟电荷所在导线的半径位置范围。

基于 f 的取值原则, 当子导线内部设置 $n(n \geq 2)$ 个模拟电荷时, 相应选取 n 个匹配点。由于导线的圆周长度可以求出相邻匹配点之间的距离 b

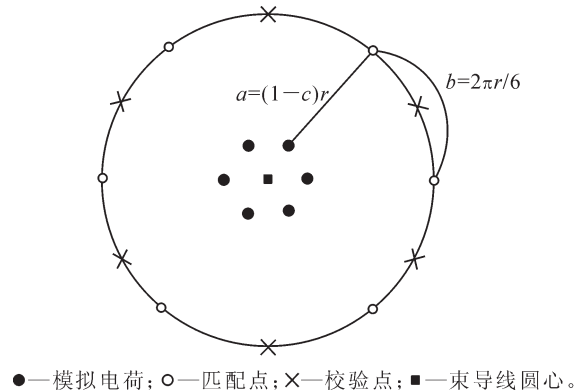
$$b = \frac{2\pi r}{n}. \quad (10)$$

再代入 f 值和 b 值, 可以求出 a

$$a = \frac{f}{b} = \frac{0.75}{2\pi r/n} = (1-c)r. \quad (11)$$

由式(11)可以求出模拟电荷所在半径位置 c 。

以每根子导线内部设置 6 个模拟电荷为例, 见图4。此时 c 为 c_6 。如无特殊说明, 下文中 c_2 即指每根子导线内部设置 2 个模拟电荷时的模拟电荷所在的半径位置, 以此类推。



●—模拟电荷; ○—匹配点; ×—校验点; ■—束导线圆心。

图4 模拟电荷个数为6时位置示意图

Fig. 4 Location of the simulation charge when the number is 6

由式(11)得

$$\frac{0.75}{2\pi r/6} = (1-c_6)r.$$

计算可得

$$c_6 = 0.215r.$$

即当子导线内部设置 6 个模拟电荷时, 模拟电荷分布在半径为 $0.215r$ 处适宜。同理, 可求出模拟电荷数 $n=2 \sim 36$ 时, 模拟电荷分布的位置。

值得特别注意的是, 当模拟电荷个数 $n=2 \sim 5$ 时, $f=a/b$ 的值取 0.75 并不合适。因为当模拟电荷个数为 2 时

$$f = \frac{a}{b} = \frac{(1-c_2)r}{2\pi r/2} = 0.75.$$

计算可得

$$c_2 = 1.355r.$$

而 c 的取值范围为 $0 < c < 1$, 故 f 取 0.75 并不合适。同样, 当模拟电荷数为 5 时

$$f = \frac{a}{b} = \frac{(1-c_3)r}{2\pi r/5} = 0.75。$$

计算可得

$$c_3 = 0.058r。$$

c 的取值太小, 因而各个模拟电荷紧紧围绕在圆心周围。模拟电荷彼此之间间隔太小, 使得式(4)中矩阵产生病态, 影响计算精度。

综上, 当模拟电荷数目在 2~5 之间, f 的取值不可取 0.75。为了后续计算的一致性, 故文中舍去对模拟电荷个数 2~5 的讨论, 只讨论模拟电荷个数为 1 和 6~36 时的计算情况。

2.2 模拟电荷个数的优化

在特高压直流输电线路中, 模拟电荷的设置, 并不是越多越好。因为在数值计算中, 数值解的误差不仅和离散化误差相关, 还和系数矩阵的条件数有关。当匹配点数增多时, 虽然离散化误差似有减小, 但它同时导致系数矩阵中相邻两行或相邻两列间元素数值相近, 因而使系数矩阵的条件数增大, 即导致所谓“病态”方程。这将引起计算时的舍入误差和数字有效位相消, 误差增加, 影响计算精度。

文中对模拟电荷个数取 1 或 6~36 两种情况, 分别用 MATLAB 程序实现不同模拟电荷个数下电压相对误差, 由式(7)计算后, 表 1 显示了四分裂、五分裂以及六分裂导线时的结果。

表 1 导线电压相对误差与模拟电荷数的关系

Table 1 Relationship between voltage relative error and simulation charge number

分裂导线数	电压相对误差	子导线内模拟点数
四分裂	$\delta > 10^{-2}$	1
	$10^{-6} < \delta < 10^{-4}$	6~36
五分裂	$\delta > 10^{-2}$	1
	$10^{-6} < \delta < 10^{-4}$	6~36
六分裂	$\delta > 10^{-2}$	1
	$10^{-6} < \delta < 10^{-5}$	6~36

由表 1 可知, 当模拟电荷数为 1 时, 计算的误差为百分之一以上, 即由模拟电荷给该子导线的表面电压带来了 0.8 kV 以上的误差, 达不到工程要求。当模拟电荷数在 6~36 之间时, 计算结果的精度不小于万分之一, 可以满足工程要求。并且随着子导线内部模拟电荷数的增加, 由式(7)计算的精度保持了相对稳定的状态。

2.3 导线表面最大电场的相对误差判断法

为了进一步确定模拟电荷个数的最优化数目, 文中提出一种新的方法来分析。

电场的计算与模拟电荷的个数及位置、导线分

裂数、导线中心位置、导线运行电压等多个参数有关, 所以对场强大小的误差分析, 是结合了多方面因素考虑的综合结果。因此文中提出利用导线表面最大电场相对误差的方法来对模拟电荷的计算精度进行判读。首先依次求出模拟电荷个数在 6~36 时的导线表面最大电场, 再用相邻模拟电荷个数下求出的表面最大电场进行相对误差运算

$$|E_i - E_{i-1}|/E_{i-1} = \varepsilon。 \quad (12)$$

式(12)中, $i \geq 7$ 。 E_i 为由不同模拟电荷个数下计算出的导线表面最大电场的大小。同时计算出模拟电荷个数为 1 时的表面最大电场, 和模拟电荷个数为 6 时的表面最大电场做相对误差计算。表 2 显示了四分裂、五分裂以及六分裂导线时的计算结果。

表 2 电场相对误差与模拟电荷数的关系

Table 2 Relationship between electric field relative error and simulation charge number

分裂导线数	电场相对误差	子导线内模拟点数
四分裂	$\delta > 10^{-1}$	1
	$10^{-5} < \delta < 10^{-4}$	6~36
五分裂	$\delta > 10^{-2}$	1
	$10^{-5} < \delta < 10^{-4}$	6~36
六分裂	$\delta > 10^{-2}$	1
	$10^{-6} < \delta < 10^{-4}$	6~36

由表 2 可以看出, 当模拟电荷个数为 1 和 6 时, 前后计算出的电场相对误差超过了百分之十。当模拟电荷个数由 6 继续增加, 基于模拟电荷法计算出来的导线表面电场的相对误差保持平稳状态。该结论与 2.2 节中运用导线表面电压相对误差的方法得出的结果相符。图 5 给出了四分裂导线时模拟电荷数在 6~36 下导线表面最大电场强度的变化规律。

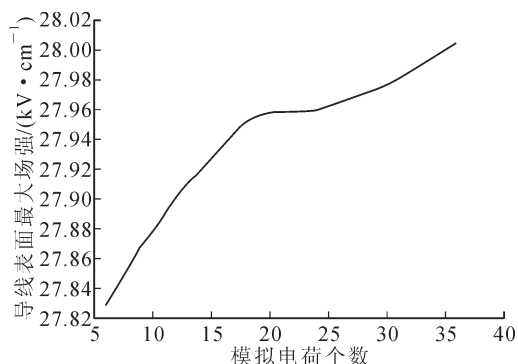


图 5 模拟电荷个数与导线表面最大场强的关系

Fig. 5 Relationship between simulation charge number and the maximum surface electric field

由图 5 可以更加看出, 当模拟电荷在 6~36 之间时, 计算得出的表面电场的大小变化量不超过 0.5 kV/cm, 继续增加模拟电荷个数, 只会增加计算

时间,降低计算效率,对于计算精度的提高无益,因而已没有继续增加模拟电荷的个数的必要。进一步验证了文中提出的运用导线表面电场相对误差方法分析模拟电荷个数优化的正确性。

综上,通过 2.2 节和 2.3 节的分析结果,当模拟电荷个数为 6~36 时,模拟电荷法的精度较高。再结合 2.1 节中模拟电荷位置的优化分析结果,可进一步确定出当模拟电荷个数在 12 时

$$f = \frac{a}{b} = \frac{(1-c_{12})r}{2\pi r/12} = 0.75。$$

计算可得

$$c_{12} = 0.61r。$$

此时,模拟电荷所在的半径正好处于子导线半径的黄金分割点处。且由图 5 可以看出,当模拟电荷个数为 12 时,计算精度不仅能达到工程要求,而且计算出的导线表面最大场强值也处于各个表面最大场强值范围的中间,更加确定了模拟电荷个数为 12 时的可行性和合理性。基于以上分析,文中在下一节实例验证的计算过程中均采用在子导线内部设置 12 个模拟电荷,且 12 个模拟电荷均匀分布在子导线半径 0.61r 处的同心圆周上。

3 实例验证

文中以哈密—郑州的特高压直流输电线路郑州跨越黄河段的实测参数为例,导线分裂数 $n=4$,导线对地高度 $H=25$ m,子导线横截面积 $S=1\ 000$ mm²,子导线间距 $S_c=45$ cm,极导线间距 $L=29$ m,将输电线路理想化为无限的长直导线,以导线的横截切面为研究对象。

文中对自适应模拟电荷法和文中提出的算法在计算效率和计算精度方面进行了比较分析。

3.1 计算效率分析

首先对两种不同模拟电荷法中模拟电荷的效率进行分析比较。在自适应模拟电荷法中,电荷的位置是由精度范围选择的,即矩阵(4)需要多次求解,因此在 MATLAB 程序中最主要的是循环的控制。而在文中优化后的模拟电荷法中,对矩阵(4)的求解只需要一次。比较结果见表 3。

表 3 计算效率的比较

Table 3 Computational of efficiency

方法	自适应模拟电荷法	文中算法
矩阵求解次数	8	1

由 MATLAB 程序可以看出,自适应模拟电荷法总共循环了 8 次,模拟电荷才找到合适的“位置”。也就是说式(4)~(7)的循环计算共进行了 8 次。这无

疑会增加运行时间。而且程序循环的开始必须要设定好精度大小,如果精度值选取不当,容易使模拟电荷的位置落在导线外部,甚至陷入死循环。在实验中,若精度控制在 10^{-4} 内,则模拟电荷移动了 4 356 次,可以发现此时模拟电荷已移动到导线外部,这与模拟电荷的位置设置原则相悖。因而自适应模拟电荷法在计算过程中存在许多不确定的因素。相反,文中算法中完全不存在以上问题,模拟电荷位置的确定极大的方便了算法的使用,使得初学者也更容易掌握。

3.2 计算精度分析

自适应模拟电荷算法和优化后的模拟电荷算法的计算精度的比较结果见表 4。

表 4 电压相对误差的比较

Table 4 Comparison of voltage relative error

方法	电压相对误差
自适应模拟电荷法	$3.106\ 4 \times 10^{-4} \sim 5.931\ 3 \times 10^{-4}$
文中算法	$1.586\ 8 \times 10^{-5} \sim 3.075\ 6 \times 10^{-5}$

由表 4 可知,自适用模拟电荷法中校验点的电压和导线电压的相对误差的范围为 $3.106\ 4 \times 10^{-4} \sim 5.931\ 3 \times 10^{-4}$,若乘以 800 kV 的电压等级,可算得数值相差了 249~475 V,而文中采取的模拟电荷法,计算精度提高了一个数量级,误差范围只有 12.7~24.7 V 之间,能很好地满足工程计算的要求。

4 结论

1)文中对模拟电荷法中模拟电荷的个数和位置进行了优化分析,并采用了一种新的判断依据,即用最大电场的相对误差来判断模拟电荷法的精度,其判断效果与电压的相对误差法结果一致。最后综合分析得出,当子导线内部设置 12 个模拟电荷且均匀分布在半径 0.61 倍处时,计算结果最优化。

2)通过对比自适应模拟电荷法,进一步验证了文中方法的可行性。该方法不仅可以达到较高精度,也避免了过多的设置模拟电荷,减少矩阵维数。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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].1998.
- [3] 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.
ZENG Nanchao. Role of HVDC transmission in the power system development in China[J]. High Voltage Engineering,2004,30(11):11-12.

- [4] 迟兴和,林清海,熊万州. 特高压直流输电线路对电信线路电磁影响调研分析[J]. 电网技术,2014,38(6):1549-1553.
CHI Xinghe, LIN Qinghai, XIONG Wanzhou. Investigation and analysis on electromagnetic impact of UHVDC power transmission lines on telecommunication lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1549-1553.
- [5] 柏晓路,李健,陈媛,等. ± 1100 kV 特高压直流输电线路电磁环境研究[J]. 中国电力,2014,47(10):24-29.
BAI Xiaolu, LI Jian, CHEN Yuan, et al. Research on electromagnetic environment of ± 1100 kV UHVDC transmission lines[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 24-29.
- [6] 孙才华,宗伟,李世琼,等. 一种较准确的分裂导线表面场强计算方法[J]. 电网技术,2006,30(4):92-96.
SUN Caihua, ZONG Wei, LI Shiqiong, et al. A more accurate calculation method of surface electric field intensity of bundled conductors[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 92-96.
- [7] HU Qin, SHU Lichun. 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.
- [8] 陈习文. 特高压直流输电线路电场环境研究[D]. 北京: 北京交通大学,2012.
CHEN Xiwen. Research on electromagnetic environment effect of UHVDC transmission lines[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [9] 王小凤,周浩. ± 800 kV 特高压直流输电线路的电磁环境研究[J]. 高压电器,2007,43(2):109-112.
WANG Xiaofeng, ZHOU Hao. Electromagnetic environmental effect of ± 800 kV UHVDC transmission lines [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 109-112.
- [10] 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.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.
- [11] 邹澎,侯均衡,周晓萍. 高压输电线路附近电磁环境的预测模型和软件[J]. 电力建设,1999,20(1):6-9.
ZOU Peng, HOU Junheng, ZHOU Xiaoping. Prediction model and software for electromagnetic environment near to HV transmission lines[J]. Electric Power Construction, 1999, 20(1): 6-9.
- [12] 黎小林,张波,王琦,等. 特高压直流线路的场分布影响因素分析[J]. 高压电器,2006,42(6):407-409.
LI Xiaolin, ZHANG Bo, WANG Qi, et al. Influence factor analysis of the field distribution around the ultra-HVDC line[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 407-409.
- [13] 黄宏佩,李永明,徐禄文,等. 特高压输电线分裂导线表面电场及起晕分析[J]. 高压电器,2012,48(12):1-5.
HUANG Hongpei, LI Yongming, XU Luwen, et al. Analysis on electric field intensity and onset corona zone on the split conductor surface of UHV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 1-5.
- [14] 林秀丽,徐新华,汪大暄. 单极高压直流输电线路电场强度计算[J]. 浙江大学学报(工学版),2007,41(11):1870-1874.
LIN Xiuli, XU Xinhua, WANG Dahui. Electric field intensity calculation of unipolar high voltage direct current transmission lines[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2007, 41(11): 1870-1874.
- [15] 王廷华,王亚伟,段基梅,等. 高压输电线路参数对计及电晕放电的电场强度的影响[J]. 高压电器,2011,47(6):77-82.
WANG Tinghua, WANG Yawei, DUAN Jimei, et al. Effect of high-voltage transmission line parameters on the electric field intensity considering the corona discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 77-82.
- [16] 袁海燕,庄燕飞,姚金霞,等. 导线表面最大场强对直流输电线路电磁环境的影响分析[J]. 高压电器,2013,49(10):7-12.
YUAN Haiyan, ZHUANG Yanfei, YAO Jinxia, et al. Influence analysis of conductor surface maximum electric field strength transmission line electromagnetic environment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 7-12.
- [17] 李先志,梁明,李澄宇,等. ± 1100 kV 特高压直流输电线路按电磁环境条件的导线设计[J]. 高电压技术,2012,38(12):3284-3291.
LI Xianzhi, LIANG Ming, LI Chengyu, et al. Conductor design of ± 1100 kV UHVDC transmission lines based on electromagnetic environment conditions[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3284-3291.
- [18] 欧阳科文,崔翔,焦重庆,等. 一种分裂导线直流电晕起晕电压的计算方法[J]. 电工技术学报,2013,28(3):177-182.
OUYANG Kewen, CUI Xiang, JIAO Chongqing, et al. A novel calculation method for DC corona onset voltage of bundle conductors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 177-182.
- [19] 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):69-73.
PENG Ying, RUAN Jiangjun. Calculation of three-dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 69-73.
- [20] 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, LYU 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.

(下转第26页)

- [11] 舒印彪,胡毅. 特高压交流输电线路的运行维护与带电作业[J]. 高电压技术,2007,33(6):1-5.
SHU Yinbiao,HU Yi. Maintenance and live working technology for ultra high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering,2007,33(6):1-5.
- [12] 蔡焕青,邵魂玮,文志科,等. 导电悬浮体对管母—管母相间作业间隙操作冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(12):3918-3925.
CAI Huanqing,SHAO Hunwei,WEN Zhike,et al. Influence of floating conducting objects on switching impulse discharge characteristics of phase-to-phase gap between tabular buses[J]. High Voltage Engineering,2014,40(12):3918-3925.
- [13] 金阳,刘海峰,郑晓泉,等. 110 kV 变电站高压裸线扩径增强绝缘护套研究[J]. 西安交通大学学报,2014,48(12):34-40.
JIN Yang,LIU Haifeng,ZHENG Xiaoquan,et al. 110 kV high voltage substation expanding reinforced insulation sheath of bare wire[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2014,48(12):34-40.
- [14] 李飞,崔文杰,黄欣. 500 kV 变电站等电位连接铜缆方式研究[J]. 高压电器,2009,45(4):52-54.
LI Fei,CUI Wenjie,HUANG Xin. Research on equipotential bonding of copper cable in 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering,2009,45(4):52-54.
- [15] 安军,王永强. 带电处理 110 kV 隔离开关设备线夹发热问题[J]. 电网技术,2006,30(s1):228-229.
AN Jun,WANG Yongqiang. Dealing with the problem of wire clip overheating in 110 kV isolating switch with power[J]. Power System Technology,2006,30(s1):228-229.
- [16] 李健,鲁守银,王振利,等. 220 kV 变电站带电作业机器人的研制[J]. 制造业自动化,2013,35(17):76-79.
LI Jian,LU Shouyin,WANG Zhenli,et al. Development of 220 kV transformer substation hot-line work robot[J]. Manufacturing Automation,2013,35(17):76-79.
- [17] 孙阳盛,华月申. 高分子带电清洗技术在 220 kV 变电站中的应用[J]. 华东电力,2013,41(1):238-240.
SUN Yangsheng,HUA Yueshen. Application of polymer live cleaning technology in 220 kV substation[J]. East China Electric Power,2013,41(1):238-240.
- [18] 丁一正,谈克雄. 带电作业技术基础[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
DING Yizheng,TAN Kexiong. Foundmental of live working technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,1998.
- [19] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计(1 000 kV 变电站分册)[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
LIU Zhenya. Power transmission and transformation project general design of State grid corporation (1 000 kV substation booklet)[M]. Beijing: China power press,2014.
- [20] GB 50697—2011 1 000 kV 变电站设计规范[S]. 2011.
GB 50697—2011 Specification for design of 1 000 kV substation[S].2011.

肖宾(1979—),男,工学硕士,工程师,主要从事输电线路带电作业与运行维护技术研究。

(上接第 20 页)

- [21] 许勇,牛永会,郭宁明,等. 新型输电线路故障测距系统的研制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):119-125.
XU Yong,NIU Yonghui,GUO Ningming,et al. Development of the new fault location system based on qnet[J]. Power System Protection and Control,2014,42(12):119-125.
- [22] 周尚礼,周全,郭乾晋. 同塔双回高压直流输电线路故障行波特特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(23):69-75.
ZHOU Shangli,ZHOU Quan,WU Qianjin. Study on fault travelling wave characteristics in double-circuit HVDC[J]. Power System Protection and Control,2014,42(23):69-75.
- [23] 于洋,孙学锋,高鹏,等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(2):148-154.
YU Yang,SUN Xuefeng,GAO Peng,et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control,2015,43(2):148-154.
- [24] 马向国,顾文琪. 基于 MATLAB 语言的静电场模拟电荷法分析[J]. 电瓷避雷器,2005(3):41-46.
MA Xiangguo,GU Wenqi. Charge simulation method analysis of static field based on MATLAB language[J]. Insulators and Surge Arresters,2005(3):41-46.

王珍雪(1990—),女,硕士研究生,研究方向为电磁场与电磁波理论、电磁环境。