

计及邻近线路架设方向和屏蔽影响的 密集输电通道防雷性能仿真分析

谷山强^{1,2,3}, 李健^{1,2,3}, 吴敏^{1,2,3}, 张昊琛⁴, 邓冶强⁴, 王羽⁴, 马志青⁵

(1. 南瑞集团有限公司, 江苏省 南京市 211106;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北省 武汉市 430074;

3. 电网雷击风险预防湖北省重点实验室(国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司),
湖北省 武汉市 430074; 4. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072;

5. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海省 西宁市 810008)

Simulation of Lightning Protection Effects in Dense Transmission Channels Considering Erection Directions and Shielding Effects of Adjacent Lines

GU Shanqiang^{1,2,3}, LI Jian^{1,2,3}, WU Min^{1,2,3}, ZHANG Haochen⁴, DENG Yeqiang⁴, WANG Yu⁴, MA Zhiqing⁵

(1. NARI Group Corporation Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu Province, China;

2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

3. Hubei Key Laboratory of Power Grid Lightning Risk Prevention(Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric
Power Research Institute), Wuhan 430074, Hubei Province, China; 4. School of Electrical and Automation, Wuhan University,
Wuhan 430072, Hubei Province, China; 5. State Grid Qinghai Electric Power Research Institute, Xining 810008, Qinghai Province, China)

ABSTRACT: After investigating the research status of transmission line lightning protection designs, this paper proposes an improved electrical geometric model to calculate the shielding failure tripping rate considering the shielding effects between lines in dense transmission channels and verifies its feasibility, mainly including the optimization of the calculation idea and the modification of the ground dip angle processing method. Based on the proposed calculation method, the calculation and rule analyses are carried out for three transmission lines under the paralleled working conditions. It is found that the adjacent lines play a dominant role in the shielding effect between lines, and the strength of shielding effect does not change linearly with the line spacing, but change with a rapidly changing range. On this basis, the calculation of the line spaces and the heights to the ground considering the actual line trends and sags is proposed. The proposed method is used to calculate in the actual project, which proves the feasibility of the method. This method has a certain guiding role in the lightning protection reconstruction of the transmission lines.

KEY WORDS: dense transmission lines; shielding failure trip-out rate; shielding coefficient; improved EGM method

摘要: 在调研了输电线路防雷设计的研究现状后, 针对考虑密集输电通道中线路间屏蔽作用的绕击跳闸率计算问题提出了改进的电气几何模型法并验证其可行性, 主要包括了计算思路的优化和地面倾角处理方式的修正。基于所提出的计算方法, 针对3条输电线路并行工况进行了计算和规律分析, 发现对线路间屏蔽效果占主导作用的为相邻线路, 且屏蔽作用的强弱并非随线路间距线性变化, 而是存在一个快速变化的区间范围。在此基础上, 提出了考虑实际中线路走向和弧垂的线路间距和对地高度计算方法, 基于所提出的方法对实际工程进行了计算, 证明了方法的可行性, 对输电线路的防雷改造具有一定的指导作用。

关键词: 密集输电线路; 绕击跳闸率; 屏蔽系数; 改进电气几何模型法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1103

0 引言

我国电网的蓬勃发展及人民用电量的提高, 对于区域内输电水平提出了新的挑战。受限于输电量需求及土地资源短缺这一矛盾, 密集输电通道的出现变得无可避免^[1-2]。且这种密集输电通道大都属于500kV电压等级之上的重要超高压输电线路, 需要对其进行安全性考核, 以保证其稳定运行。

根据调研结果, 长期以来雷击是造成输电线路跳闸的首要因素, 国网公司500kV及以上架空线路

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号 51777037)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51777037).

跳闸中, 雷击占比 40%~60%, 严重影响了电网安全稳定运行。而对于 500kV 电压等级以上的输电线路, 由于其反击耐雷水平已经达到较高的数值, 故主要引起跳闸事故的原因在于绕击雷电流^[3-6]。因此, 对于密集输电通道的绕击耐雷性能评估极为重要。

当前针对输电线路绕击跳闸率计算的方法主要有规程法、电气几何模型法和先导发展法 3 种。其中规程法的优点在于计算过程简单快捷, 但相对的其缺点在于计算准确性较差, 且只考虑了最普遍的工况。针对密集输电通道需要考虑线路间屏蔽特性的问题, 该方法显然是不适用的。先导发展法相比另外 2 种方法具有更高的计算精度, 其考虑了雷电接闪的物理过程, 但相应地, 其对于参数的要求也更严苛^[7-13]。对于密集输电通道这种复杂工况, 其对于参数的获取客观上存在一定的难度, 因此先导模型法也不适用。基于上述考虑, 本文决定基于电气几何模型法, 以考虑密集输电线路屏蔽效果的计算为目标, 提出改进的求解方法, 实现效率和精度的平衡。

H. R. Armstrong 与 E. R. Whitehead 通过综合 Wagner 的雷电回击模型和 Watanabe、Paris 等的闪击距离公式的雷电理论^[14], 提出了经典的电气几何模型法(electric geometry model, EGM)。其提出了 3 个基本假设, 一是在雷电发展还没有击中地面物体时, 其不会受到地面物体的影响; 二是定义了击距的概念, 为雷电先导被地面物体吸引至雷击点的距离; 三是假定大地、避雷线与导线有着相同的击距。

李晓岚等^[15]在经典电气几何模型法的基础上, 对击距公式、地形因素带来的影响进行了考虑, 同时引入了绕击率和绕击跳闸率的概念。同经典电气几何模型法相比, 其采取的改进方法考虑了雷击避雷线、导线和大地的差别, 并借助暴露距离计算绕击率, 将雷电放电特性和线路结构尺寸相联系。

司马文霞等^[16]综合了国内外学者对电气几何模型法的研究, 从击距公式、地形影响、弧垂影响、入射角概率、气象环境影响 5 个方面提出了相应的改进方法。其所形成的计算方法针对一般输电线路的计算已经较为完善, 但对于密集输电通道的雷电屏蔽效果计算仍不适用。

王韬等^[17]基于已有的计算方法, 进行了 500kV 交流输电通道邻近线路雷电屏蔽特性仿真计算, 考虑到邻近输电线路的影响, 其构建了整体的电气几何模型, 对于击距圆数量繁多、投影优先级难以确定的困难, 提出了“先投影后优先级”的方法。并基于该方法计算了不同因素带来的屏蔽效果影响。

文习山等^[18]分析了邻近线路对±1100kV 直流输电线路雷电屏蔽效果的影响, 其考虑了包括直流输电线路极性在内的多种计算参数的效果。对于并行架设输电线路的绕击效果计算方法则采用了逐个判别的计算方法。由于其判别式时间复杂度为 $O(n^2)$, n 为电气几何模型中的击距圆个数。针对 2 条输电线路并行的工况其流程尚能接受, 但针对 3 条及以上的工况其计算效率过低, 并不适用。

结合国内外学者的研究现状以及所面临实际工程问题的迫切需求, 本文提出了一种新的求取考虑密集输电通道内多条线路间屏蔽作用的计算方法, 为密集通道线路的雷害风险评估以及防雷措施改造工作提供更精确更有效率的指导。

1 考虑线路间屏蔽效应的计算方法

1.1 计算参数选取

本文为解决密集输电通道中的多条输电线路相互屏蔽时的复杂计算问题, 提出了基于微分-积分思想的优化电气几何模型法。通过在现有各学者研究的基础上对其计算思路和流程进行改进, 使其符合多线路并行时的计算逻辑, 将其计算的复杂程度从原本的 $n(n-1)/2$ 降低为 n , n 为模型中击距圆的个数。其中部分必要计算参数和公式的选取介绍如下所示。

本文所提出优化电气几何模型法的雷电流概率密度函数和导线与地线的击距系数公式等均参照国家电网现行规程^[19], 其中雷电流概率密度函数如式(1)所示:

$$P = \frac{1}{1 + (I/a)^b} \quad (1)$$

式中: P 为幅值大于 I 的雷电流概率; a 为中值电流, kA; b 为雷电流幅值分布的集中程度参数。

导线和地线的击距系数公式^[20]如式(2)所示:

$$\begin{cases} r_s = 10I^{0.65} \\ r_c = 1.63(5.015I^{0.578} - 0.001U_{ph})^{1.125} \\ r_g = \begin{cases} [3.6 + 1.7 \ln(43 - h_{c.av})]I^{0.65}, & h_{c.av} < 40\text{m} \\ 5.5I^{0.65}, & h_{c.av} \neq 40\text{m} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_s 为避雷线击距, m; r_c 为导线击距, m; r_g 为大地击距, m; U_{ph} 为导线上瞬时电压, kV; $h_{c.av}$ 为导线对地平均高度, m。

1.2 改进算法思路实现

电气几何模型法经过长时间的发展和完善, 对于单基杆塔的计算过程已经较为成熟, 但随着电压等级的不断发展和对土地利用率的提高, 出现了本文所需要考虑的多条输电线路通道并行排列的情

况。在密集输电通道多基杆塔线路并架的情况下，导线、地线击距圆的数量迅速增加，对于投影及其优先级的确定变得难以实现，传统的计算方法在计算效率和计算复杂度上均变得不可接受。

针对上述问题，本文提出了优化算法，其仍然采用雷电流幅值和雷电流入射角的双循环嵌套思路，但在求解暴露弧和屏蔽弧时绕过了求取交点的步骤。通过采取对整体建模后扫描遍历的方法，优化了多条线路并行时的计算逻辑。其示意图如图1所示。

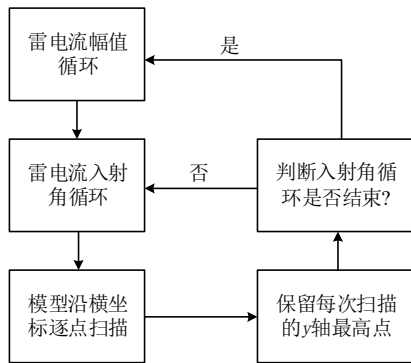


图1 优化算法的计算逻辑

Fig. 1 Computational logic of optimization algorithm

优化后的算法在每次循环过程中会将击距圆与雷电先导直线方程相交的最高点保存下来，即前文所说的扫描遍历。在此基础上，通过比较由一连串交点所形成的圆弧的击距圆编号，即可准确高效判断该段圆弧的成分属于屏蔽段还是暴露段。该计算方法借助了微分和积分的思路进行实现，当扫描的步长取为合适的值时，便可以达到计算效率和计算精度的平衡。如图2中所示，红色交点即扫描点，其中归属于5号击距圆的为屏蔽弧，归属于7号击距圆的为暴露弧。

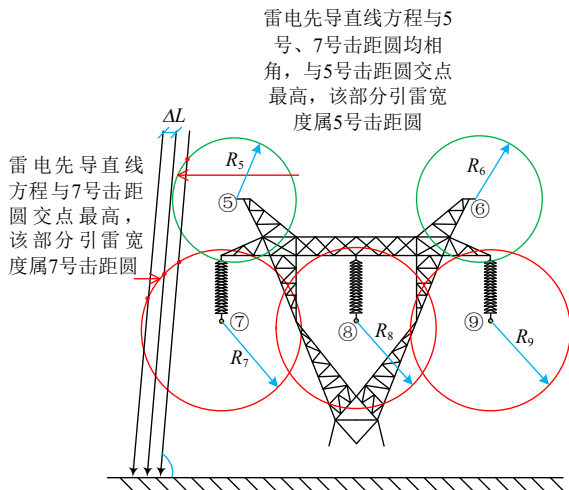


图2 优化算法应用示意图

Fig. 2 Application diagram of optimization algorithm

1.3 多线路并行时地面倾角转化

在之前学者所做的工作中，已经将地面倾角的因素纳入了电气几何模型法的考虑范围，对于计算结果来说，其主要影响的是大地击距对于暴露弧的屏蔽效果。由于本文所做工作是对多条输电线路并行情况进行计算，现有的地面倾角转化方式由于其局限性并不适用，因此需要对其改进，为方便说明，在此引入锚点杆塔的概念，以其作为整体模型的坐标轴原点进行后续转换。如图3所示，左侧杆塔即锚点杆塔。

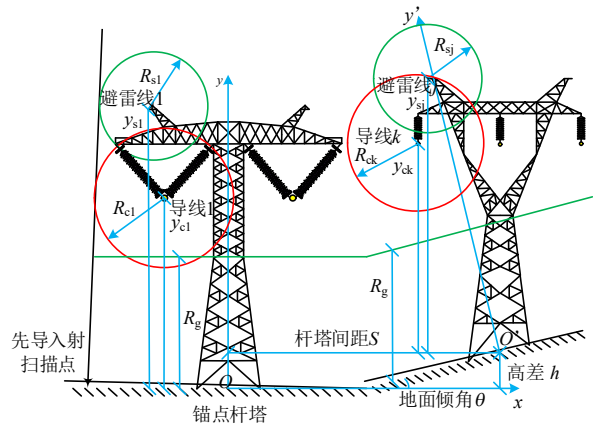


图3 地面倾角转化示意图

Fig. 3 Diagram of conversion of ground inclination

在考虑密集输电线路之间相互屏蔽作用的计算时，由于不同线路杆塔所处的地形条件可能不同，且程序实现时是对整个模型进行统一扫描和计算，以每个杆塔和地面的交点为原点分别进行坐标轴旋转难以实现，且增加了后续计算的复杂程度。通过输入后续杆塔与锚点杆塔之间的距离和高差参数的方式，将每个杆塔相对以锚点杆塔与地面交点作为原点的坐标轴转化为相对于以本杆塔与地面交点为原点的坐标轴下的新坐标，利用该坐标，即可实现与地面击距的大小比较，得到最终的暴露弧投影结果。其具体转化公式如式(3)所示：

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta + S \sin \theta - h \cos \theta \quad (3)$$

式中： x 和 y 分别为原坐标系下的横纵坐标值； S 为当前杆塔相对于锚点杆塔的距离； h 为当前杆塔相对于锚点杆塔的高度差。

1.4 考虑风偏的绕击跳闸率变化

虽然风向风速具有随机性，但其在同一时间有一个确定值，即在同一时刻，风偏对于左侧线路和右侧线路的影响是相当的。因此，在进行输电线路绕击跳闸率计算时，应考虑该因素带来的影响。如图4所示，分别对典型500kV酒杯塔绝缘子串风偏角度从5°~20°的变化情况。

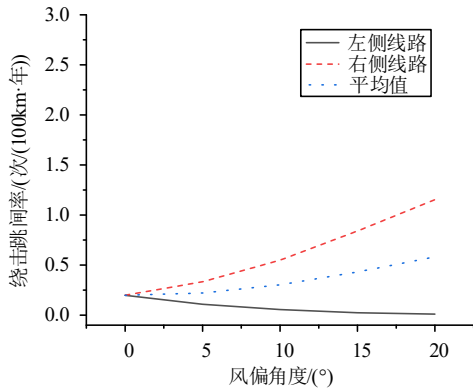


图 4 风偏对绕击跳闸率的影响

Fig. 4 Influence of wind on the trip-out rate

同一时刻，左侧线路和右侧线路一个受到避雷线的保护作用增强，绕击跳闸率减小；一个受到避雷线的保护作用减弱，绕击跳闸率增大。而三相的总绕击跳闸率总体呈上升趋势，但变化幅度不如单相明显。在此基础上，对间距 200m 的双通道 500kV 酒杯塔间受风偏影响进行计算分析，其受风偏后的绝缘子偏移如图 5 所示。

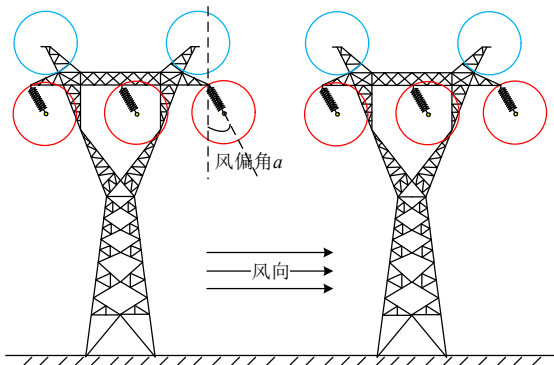


图 5 双通道下绝缘子偏移示意图

Fig. 5 Insulator offset diagram of intensive power transmission channel

分别对图 5 中的左侧杆塔的右侧线路和右侧杆塔的左侧线路进行计算分析，可以得到密集通道间绕击跳闸率所受风偏的影响，如图 6 所示为风偏角度从 0°变化到 20°的结果。

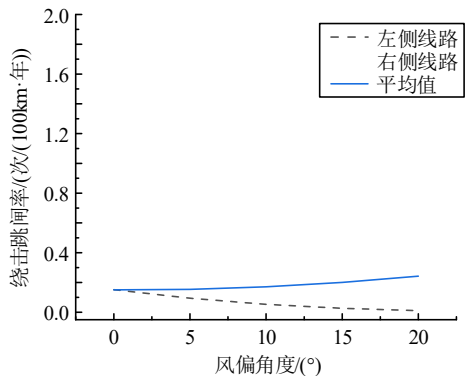


图 6 双通道下风偏影响示意图

Fig. 6 Diagram of the influence of wind deviation under intensive power transmission channel

由图 6 中的计算结果和图 4 相比较，可以分析得到在密集输电通道情况下风偏对绕击跳闸率的影响。可以看出，随着风偏角度的增大，左侧线路和右侧线路的计算结果呈现出一个增大、一个减小的趋势，分别对应避雷线对于外侧线路的保护作用强弱。同时，与非密集通道相比，其绕击跳闸率增速较为缓慢，会受到邻近线路的屏蔽作用，在风偏角不大于 15°的情况下，左右两侧线路的绕击跳闸率之和基本不变。

1.5 改进算法的可行性验证及误差原因分析

为验证改进算法的可行性，选取典型 500kV 酒杯塔为例，分别对不同计算步长下的改进算法和传统计算方法进行对比，如图 7 所示。

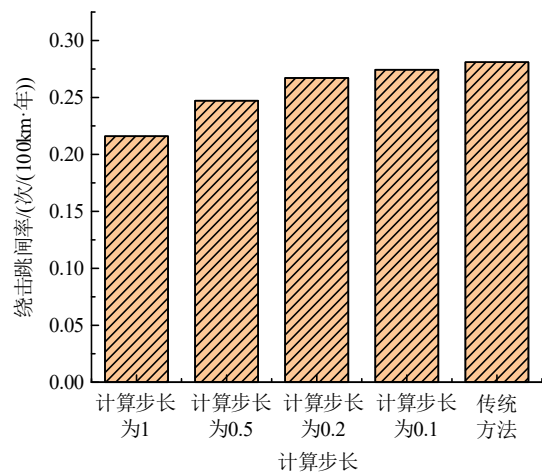


图 7 计算结果对比

Fig. 7 Comparison chart of calculation results

由图 7 可知，随着计算步长的减小，改进计算方法的计算结果越来越接近传统方法的计算结果。造成这一现象的原因是计算中将数学过程中的积分运算用对间距足够小离散量求和来代替实现，当扫描步长取更小值时，这种由离散量代替积分所导致的误差会进一步降低，但同时，计算结果所需的时间也会延长，降低效率。对于扫描步长取 0.1 时的绕击跳闸率，其误差率为 $(0.281-0.274)/0.281 \times 100\% = 2.4\%$ ，认为其在可接受范围之内。经过权衡，该计算步长取值是考虑时间和精度的较优选择。

2 多通道并行架设时的屏蔽系数变化规律

上文已经详细介绍了改进后的计算方法，本节则在上一节所得的结果基础上，对 3 条交、直流输电线路并行架设的工况(包括交流-直流-交流，直流-交流-直流，交流-交流-直流和直流-直流-交流 4 种)进行计算，研究多通道并行架设复杂工况时的屏蔽系数规律。其并行示意图如图 8 所示。

同时为便于分析和表征输电线路间屏蔽效果

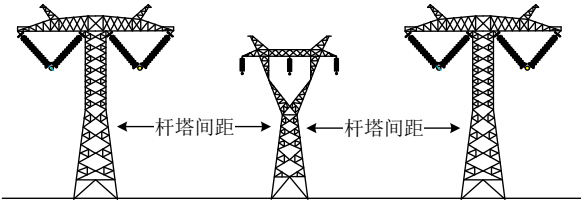


图8 3条输电线路并行示意图

Fig. 8 Diagram paralleled three transmission lines

的强弱, 本文引入了屏蔽系数的概念, 其表达式如式(4)所示, 取值范围为0~1, 结果越接近1说明屏蔽效果越好。

$$\text{屏蔽系数} = 1 - \frac{\text{考虑屏蔽的跳闸率}}{\text{不考虑屏蔽的跳闸率}} \quad (4)$$

以交流-直流-交流工况为例进行说明, 其余工况的计算结果与该工况结果类似。其左侧杆塔左回线路和右侧杆塔的右回线路的绕击跳闸率结果随杆塔间距的变化如图9所示, 杆塔间距由20m变化至100m, 其绕击跳闸率均维持在0.14次/(100km·年)。通过对其屏蔽系数的计算, 发现该值也一直保持在0值附近, 说明位于并行通道最外侧的输电线路基本不受线路间屏蔽作用的影响, 其结果只与本杆塔设计和避雷线相关。

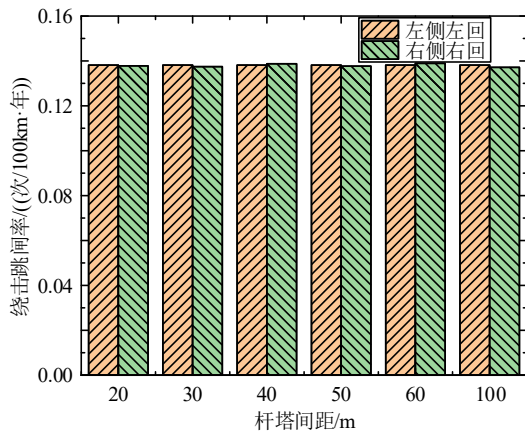
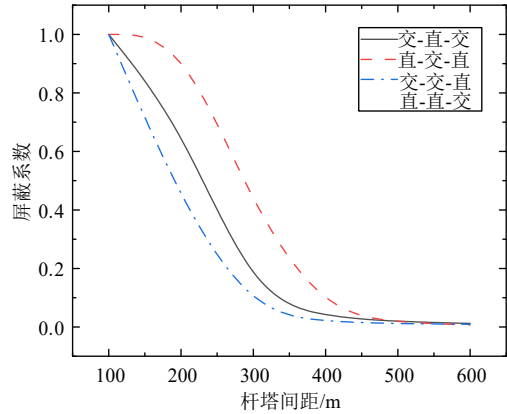


图9 最外侧线路计算结果

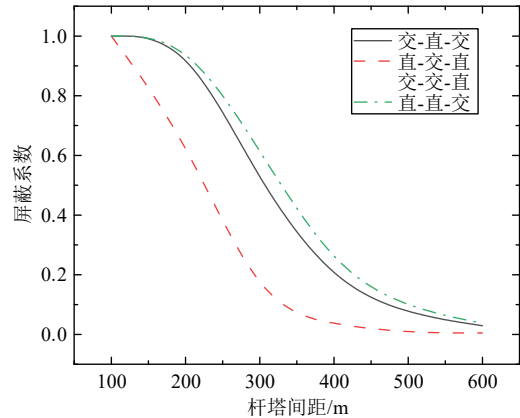
Fig. 9 Calculation result of outermost line

分别对3条输电线路中的左侧杆塔右回线路、中间杆塔两侧线路和右侧杆塔左回线路(即处于内侧的线路)的屏蔽系数进行提取分析, 其随杆塔间距的变化如图10所示。为便于更好的说明, 左侧杆塔右回和中间杆塔左回工况以折线图的形式展示, 中间杆塔右回和右侧杆塔左回工况则以柱状图的形式进行结果展示。

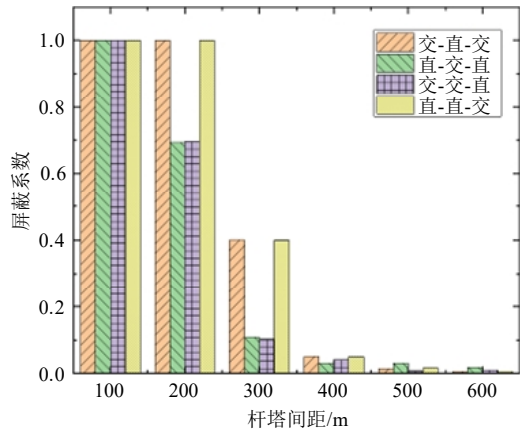
如图10(a)(b)所示, 分别为左侧杆塔右回和中间杆塔左回的屏蔽系数计算结果, 其随着杆塔间距的增大逐渐降低, 且变化速率在150~350m之间最大(快速变化段), 说明在该杆塔间距范围内, 相邻线路对本线路的屏蔽效果发生了显著改变。而当杆



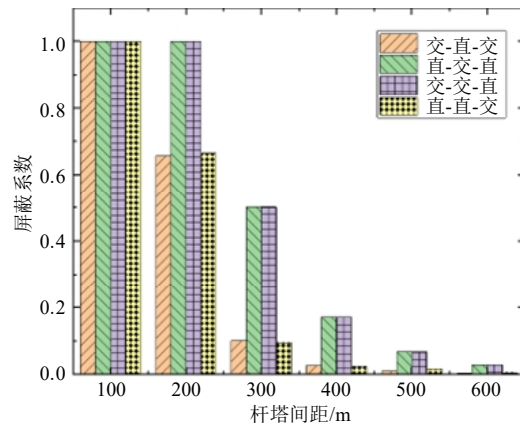
(a) 左侧杆塔右回屏蔽系数



(b) 中间杆塔左回屏蔽系数



(c) 中间杆塔右回屏蔽系数



(d) 右侧杆塔左回屏蔽系数

图10 屏蔽系数计算结果

Fig. 10 Shielding factor calculation results

塔间距超过 600m 之后，可以得出结论，屏蔽系数维持在 0 值附近，说明此时相邻线路带来的屏蔽效果已经可以基本忽略不计。鲍捷等^[21]在文献中也提及了密集输电通道的定义为由 3 回以上输电线路组成且相邻线路中心距离不超过 600m，该取值与本文计算的结果一致。由图 10(c)(d)所示，分别为中间杆塔右回和右侧杆塔左回的计算结果，与图(a)(b)的变化规律类似，相邻线路带来的影响主要在间距 150~350m 之间快速变化，而在该范围之外变化速率较为平缓，在间距 100m 之内近似完全受到邻侧线路的保护，在 600m 范围之外则可以视为独立的输电线路进行对待。此外，交-直-交和直-直-交 2 种线路组合以及直-交-直和交-交-直 2 种线路组合得到的计算结果基本一致，可以得出结论输电线路基本只受到相邻线路带来的屏蔽效果影响，而非相邻线路对其计算结果影响很小，一定程度上可以忽略不计。为进一步验证该结论，绘制不同雷电流幅值下的典型双通道并行击距示意图如图 11 所示。

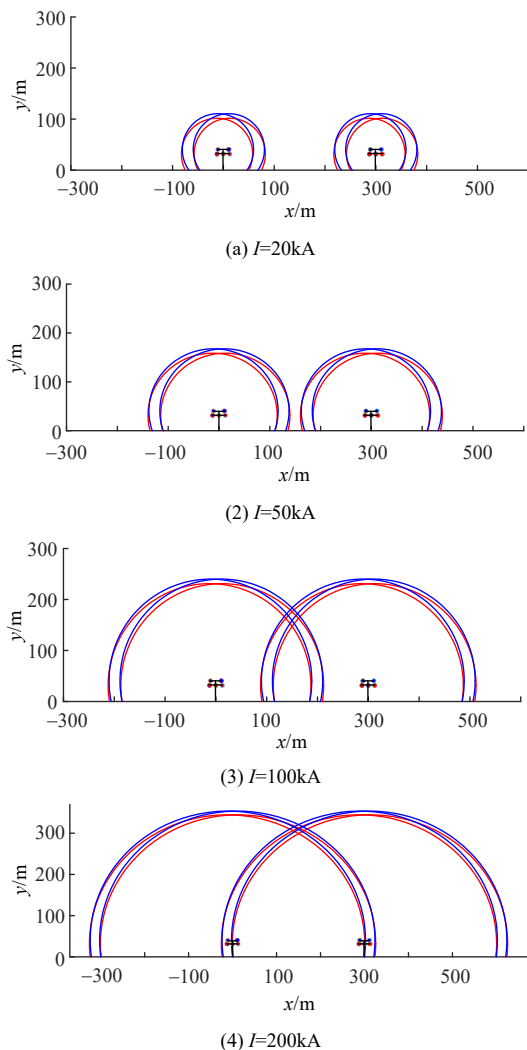


图 11 不同雷电流下的击距示意图
Fig. 11 Schematic diagram of strike distance under different lightning currents

可以看出，当雷电流小于 50kA 时，两通道的屏蔽弧并不会相交，当雷电流为 100kA 和 200kA 时，击距圆相交位置也主要集中在内侧，对于最外侧线路基本无屏蔽作用，而自然界中，发生幅值超过 200kA 的雷击概率极小，故可以认为并行通道最外侧线路基本不受其余通道的屏蔽影响。后续的研究分析应将重点放在杆塔间距处于快速变化段的不同输电线路杆塔组合上。

3 考虑线路走向的参数处理及结果分析

3.1 考虑输电线路走向的参数处理

本文在第 2 节中基于 4 种典型工况讨论了屏蔽效果随杆塔间距的变化。但其是建立在理想条件的基础上的，所有输电线路均保持着平行排列，杆塔也维持着一一对应的关系，如图 12 所示。

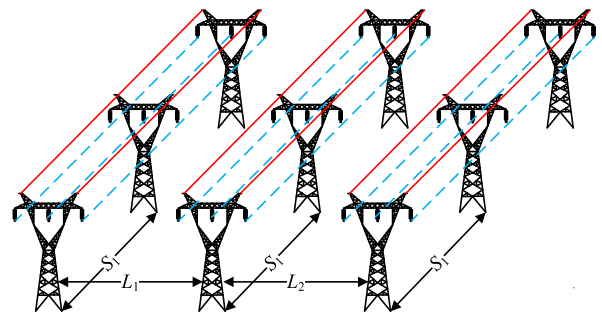


图 12 理想情况输电线路排列方式
Fig. 12 Ideal transmission line arrangement

然而在实际工程中，极少会出现如图 12 所示的理想条件，更多的是线路走向复杂多变，杆塔线路间的关系错综复杂，如图 13 所示的情况一致。可以看出，区别于本文第 2 节的计算，线路的走向是不确定，线路沿线所架设的杆塔不是一一对应

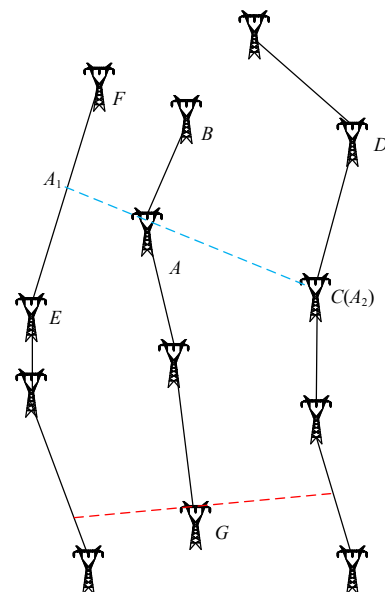


图 13 实际情况输电线路排列方式
Fig. 13 Actual situation transmission line arrangement

的,此时要评估邻近线路对本线路的屏蔽效果,就需要考虑到实际的弧垂分布、线路间距随输电通道的变化趋势。现以图 13 中点 A 为例说明对参数的处理方法。下述处理方法是基于杆塔经纬度进行计算的,其精确值应采用球面计算方法,但考虑到计算复杂程度以及任意两基杆塔间的距离远小于地球半径,后续处理中均按照平面进行分析。

要计算分析点 A 处输电线路的雷击跳闸率和邻近线路对其的屏蔽效果,需要求取邻近线路的间距以及对应点的线路对地高度。本文第 2 节中对该二者参数进行了理想化处理,假定输电线路及杆塔一一对应,且邻近线路均平行分布,线路间距即平行线路间的距离,线路对地高度则根据杆塔几何参数获得。在实际工况中,则需要求得垂直于线路走向 AB 的点 A_1 、 A_2 , 线段 A_1A 和 A_2A 长度即线路间距,对应 A_1 、 A_2 处的线路对地高度即计算所需的几何参数。

已知图 13 中各杆塔的经纬度坐标,借助解析几何的方法对其进行分析。已知点 A 坐标(x_1, y_1), 点 B 坐标(x_2, y_2), A_1A_2 垂直于线路走线 AB , 且经过点 A 。有 A_1A_2 解析式如式(5)所示。

$$y = -\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}x + \frac{(x_2 - x_1)x_1}{y_2 - y_1} + y_1 \quad (5)$$

同理,已知点 E 坐标(x_3, y_3), 点 F 坐标(x_4, y_4), 有 EF 解析式如式(6)所示

$$\frac{x - x_3}{x_4 - x_3} = \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} \quad (6)$$

联立式(5)(6),可以求得点 A_1 的经纬度纵坐标,同理可得点 A_2 的经纬度坐标,借助两点间距离公式,如式(7)所示,即可求得线路间距 A_1A 和 A_2A 的距离。

$$\begin{cases} \theta = \sin(P_{MLatA})\sin(P_{MLatB})\cos(P_{MLonA} - P_{MLonB}) + \\ \cos(P_{MLatA})\cos(P_{MLatB}) \\ D = \pi R \arccos(\theta) / 180 \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{LonA} 、 P_{LatA} 、 P_{LonB} 、 P_{LatB} 分别为两点的经纬度坐标。东经取经度的正值,西经取经度负值,北纬取 90 -纬度值,南纬取 90 +纬度值,经过上述处理过后的经纬度分别计为 P_{MLonA} 、 P_{MLatA} 、 P_{MLonB} 、 P_{MLatB} 。 R 为地球半径,其单位与 D 单位一致。

通过式(5)—(7)可以求出邻近线路同本线路的线路间距。还需要对输电线路对地高度进行计算。吴广宁等^[22]提出了考虑输电线路三维变化的跳闸率计算方法,其中就包括了对输电线路弧垂部分的处理。对于平原地区的输电线路,可用最大弧垂来表征各点弧垂,其公式为

$$h_{cx} = H_c - \frac{4f_c x(l-x)}{l^2} \quad (8)$$

式中: h_{cx} 为任意点线路高度; H_c 为线路挂点高度; f_c 为线路最大弧垂; l 为档距长度; x 为任意点距杆塔距离。如图 14 所示。

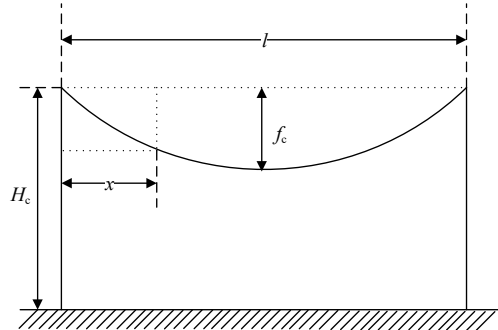


图 14 平原地区线路弧垂示意图
Fig. 14 Diagram of line sag in plain area

3.2 实际工程中的结果分析

采取本文提出的考虑输电线路走向的参数获取方法和考虑邻近线路屏蔽效果的跳闸率计算方法,选取现实输电线路工程中复奉线的实际参数进行计算,其线路走向和类型划分如图 15、16 所示。由于实际中输电线路跨度大,沿线风速风向并非为一固定值,因此选取 0° 风偏角对全线进行雷害风险评估。

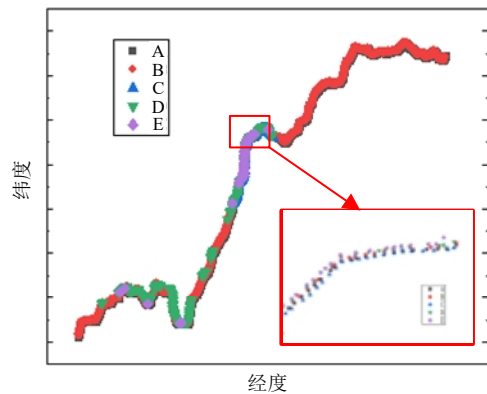


图 15 输电线路走向示意图
Fig. 15 Transmission line trend diagram

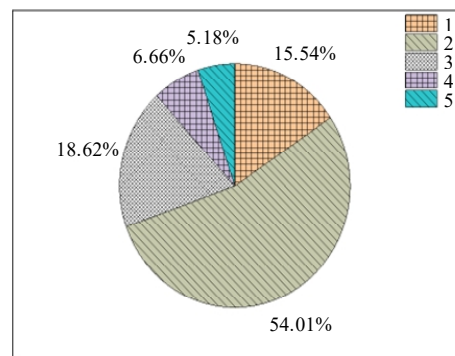


图 16 并行线路杆塔回路数划分
Fig. 16 Paralleled line tower circuit number division

由图 16 中的数据分布所展示，所计算复奉线中杆塔共 811 基，其中并行线路回数少于 3 回的共有 564 基，按照前文中对于密集输电通道的定义，其不属于本文的研究重点。并行回数为 3 条的共 151 基，并行回数为 4 条的共 54 基，并行回数为 5 条的共 42 基。

选取该线路中某基杆塔为例进行说明，该杆塔对应断面示意图如图 17 所示，为四杆塔并列，从左至右分别为 500kV 双回鼓型塔、±800kV 直流杆塔、±800kV 直流杆塔、±800kV 直流杆塔 4 种。

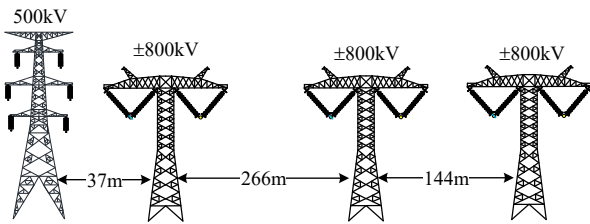


图 17 杆塔排列示意图

Fig. 17 Schematic diagram of tower arrangement

其计算结果如图 18 所示，可以看出，在考虑屏蔽的情况下，除了最左侧杆塔的左侧线路不受邻近线路的影响之外，其余线路均被邻近避雷线保护，其绕击跳闸率的仿真结果保持在一个很低的值。可以认为并行线路是安全的。

图 19(a)、(b)的数据分布主要展示了是否考虑邻近线路屏蔽下的跳闸率计算结果，复奉线为 ±800kV 线路，根据规程规定^[19]，其基本雷击跳闸率设计要求的 0.1 次/(100km·年)，对应输电风险等级为 3 和 4 的要求分别为 0.15 和 0.3，按照上述分类，不考虑屏蔽下的计算结果 3 种分类杆塔数分别为 210、381、220 基，考虑邻近线路屏蔽后的计算结果 3 种分类杆塔数分别为 34、77、700 基。可以看出，在考虑邻近线路的屏蔽效应后，输电线路的绕击跳闸率水平有一定程度的下降，说明屏蔽效果对于密集输电线路的防雷设计水平是不可忽略的。

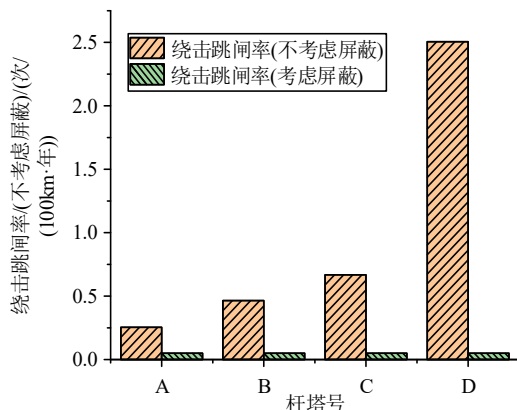
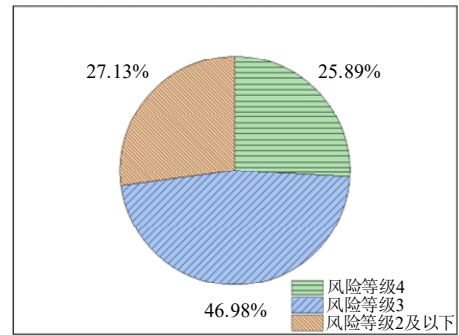
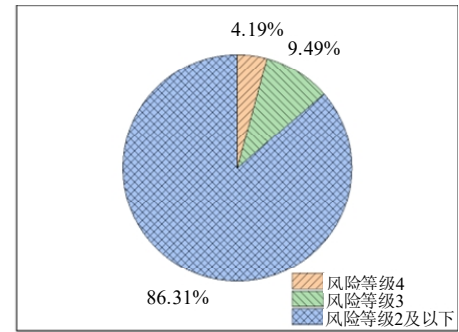


图 18 绕击跳闸率结果

Fig. 18 Result diagram of bypass trip rate



(a) 不考虑屏蔽结果



(b) 考虑屏蔽结果

图 19 线路雷害风险评估示意图

Fig. 19 Line lightning risk assessment diagram

综合上述结合实际工程的结果分析，本文所提出的计算方法可以应用于实际工程中的输电线路跳闸率计算，为输电线路的防雷水平研究提供参考。

4 结论

为解决密集输电通道的防雷性能评估问题，本文提出了改进的电气几何模型法，在此基础上，借助该方法对不同工况进行了分析计算，得到了多输电通道并行架设时的屏蔽效果变化规律。并以实际工程为例，在考虑了输电线路走向和邻近线路屏蔽的前提下，对该线路进行了雷害风险评估。所得主要结论如下：

1) 本文提出的一种改进的电气几何模型法，可以处理多回密集输电通道并行的计算场景，实现了计算精度相当的情况下，计算效率的大幅提高。

2) 本文对 3 条输电线路并行架设的工况进行了计算，并分析其屏蔽系数的变化规律，发现并行通道最外侧线路基本不受其余通道的屏蔽影响，且对线路间屏蔽作用起主导作用的为相邻线路。此外，邻近线路对本线路的屏蔽效果存在一个跃变阶段，参数不同对应的范围也不同，但大部分均处在 150m 到 350m 的输电线路间距区间。对于线路间距处于这个范围的情况需要重点关注。

3) 本文在考虑了输电线路走向和邻近线路屏蔽效果的基础上，基于所提出的方法对复奉线进行

了相关的计算分析。其中,在不考虑邻近线路屏蔽时的雷害风险等级小于2的占总杆塔数目的25%左右,考虑屏蔽后则占到了总数的85%以上。可以看出,是否考虑该因素对计算结果造成的影响不可忽视。

参考文献

- [1] 彭谦,李军,卞鹏,等.改进电气几何模型法在1000kV输电线路雷电绕击跳闸率计算中的应用[J].电网技术,2010,34(9):155-159. PENG Qian, LI Jun, BIAN Peng, et al. Application of improved electrical geometry model in calculation of lightning shielding failure-caused trip-out rate of 1 000 kV power transmission line[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 155-159 (in Chinese).
- [2] 莫付江,陈允平,阮江军.输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J].电网技术,2004,28(21):80-84. MO Fujiang, CHEN Yunping, RUAN Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 80-84(in Chinese).
- [3] WATANABE Y. Switching surge flashover characteristics of extremely long air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(8): 933-936.
- [4] PARIS L. Influence of air gap characteristics on line-to-ground switching surge strength[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(8): 936-947.
- [5] RIZK F A M. Critical switching impulse strength of long Air gaps: Modelling of Air density effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1507-1515.
- [6] ERIKSSON A J, MOUSA A M. Discussion of "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. II. Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs" by L. Dellera and E. Garbagnati (and replies)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 456-460.
- [7] 李景丽,郭丽莹.输电线路绕击耐雷性能计算方法综述[J].电瓷避雷器,2016(6):61-67. LI Jingli, GUO Liying. Calculation methods of transmission lines' shielding failure lightning withstand performance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(6): 61-67 (in Chinese).
- [8] 王鹏宇,元乙贺,李博,等.计及雷电入射角输电线路绕击跳闸率的计算[J].电瓷避雷器,2020(3):92-97. WANG Pengyu, YUAN Yihe, LI Bo, et al. Calculation of shielding failure trip rate of transmission lines considering lightning incidence angle[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 92-97 (in Chinese).
- [9] 唐波,刘子怡,彭友仙,等.考虑多参数影响的输电线路绕击跳闸率求解算法[J].电瓷避雷器,2020(6):151-158. TANG Bo, LIU Ziyi, PENG Youxian, et al. Algorithm for solving transmission line shielding failure trip-out rate considering multi-parameter influence[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 151-158 (in Chinese).
- [10] 吴广宁,熊万亮,曹晓斌,等.输电线路绕击特性的三维分析方法[J].高电压技术,2013,39(2):374-382. WU Guangning, XIONG Wanliang, CAO Xiaobin, et al. Three-dimensional analysis method of shielding failure characteristics of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 374-382(in Chinese).
- [11] 王羽,邓冶强,文习山,等.基于长间隙放电试验适用于大尺寸输电线路的改进电气几何模型[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3654-3661. WANG Yu, DENG Yeqiang, WEN Xishan, et al. An improved electric geometry model based on breakdown test of long air gaps and suited for large-sized transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3654-3661 (in Chinese).
- [12] 赵江涛,戴敏,陈伟,等.山地地形对±1100 kV输电线路雷电屏蔽性能影响模型试验[J].高电压技术,2020,46(9):3318-3324. ZHAO Jiangtao, DAI Min, CHEN Wei, et al. Model test of the effect of mountain terrain on lightning shielding performance of ±1100 kV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3318-3324 (in Chinese).
- [13] 蓝磊,张韬,文习山,等.±1100kV输电线路雷电屏蔽特性的模型试验及观测[J].电网技术,2020,44(1):105-113. LAN Lei, ZHANG Tao, WEN Xishan, et al. Model test study and observation on lightning shielding performance of ±1100kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 105-113 (in Chinese).
- [14] ARMSTRONG H R, WHITEHEAD E R. Field and analytical studies of transmission line shielding[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, PAS-87(1): 270-281.
- [15] 李晓岚,尹小根,余仁山,等.基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J].高电压技术,2006,32(3):42-44. LI Xiaolan, YIN Xiaogen, YU Renshan, et al. Calculation of shielding failure flashover rate for transmission line based on revised EGM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 42-44 (in Chinese).
- [16] 司马文霞,杨庆,李永福,等.输电线路雷电绕击评估方法分析及展望[J].高电压技术,2015,41(8):2500-2513. SIMA Wenxia, YANG Qing, LI Yongfu, et al. Analysis and prospect of lightning shielding failure evaluation methods of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2500-2513 (in Chinese).
- [17] 王韬,赵乐冰,吴敏,等.500 kV交流输电通道邻近线路雷电屏蔽特性仿真计算[J].电瓷避雷器,2020(5):7-14. WANG Tao, ZHAO Lebing, WU Ming, et al. Simulation study on lightning shielding characteristics of adjacent lines in 500 kV AC transmission channel[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(5): 7-14 (in Chinese).
- [18] 文习山,邓冶强,王磊,等.邻近线路对±1100kV直流线路雷电屏蔽效果影响计算研究[J].电网技术,2017,41(11):3420-3426. WEN Xishan, DENG Yeqiang, WANG Lei, et al. Calculation research on influence of adjacent lines on lightning shielding failure of ±1100 kV DC transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3420-3426 (in Chinese).
- [19] 中国南方电网有限责任公司.架空输电线路防雷技术导则:Q/CSG 1107002—2018[S].2018.
- [20] 国家能源局.架空输电线路雷电防护导则:DL/T 2209—2021[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [21] 鲍捷,王昕,张峰,等.基于雷电定位数据驱动的紧密输电通道连续雷击跳闸预警方法[J].电网技术,2022,46(3):1194-1205. BAO Jie, WANG Xi, ZHANG Feng, et al. Data-driven early warning for continuous lightning trip-out of compact power corridors based on lightning location data[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1194-1205 (in Chinese).
- [22] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等.输电线路雷电绕击率的三维计算方法[J].电工技术学报,2009,24(10):134-138. LI Ruifang, WU Guangning, CAO Xiaobin, et al. Three-dimensional calculation method on shielding failure rate of transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 134-138 (in Chinese).



谷山强

在线出版日期:2023-08-31。

收稿日期:2023-06-25。

作者简介:

谷山强(1980),男,博士,教授级高级工程师,长期从事雷击灾害防治和智能输电领域科技创新、技术和装备研发、工程应用、标准制修订等工作, E-mail: gushanqiang@sgepri.sgcc.com.cn;

邓冶强(1991),男,通信作者,博士,研究方向为雷电大数据及电力系统防雷, E-mail: dengyeqiang@whu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)