

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.001

新型电力系统的节能减碳关键技术

面向环保接地施工的杆塔分支式外延接地网接地特性研究

廖玉琴¹, 屈路², 杨跃光¹, 廖民传², 李文荣¹, 王敦青¹

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院, 广州 510663; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 低碳环保已成为国家的战略和政策导向, 输电杆塔在降阻施工时, 常采用敷设长距离外延接地极方式接地, 造成资源浪费、环境破坏等问题。针对杆塔接地施工环境的复杂性与施工面积的有限性, 文中提出输电线路杆塔分支式外延接地网散流降阻结构, 实现了接地降阻施工的低碳环保。首先, 仿真计算单根外延接地极的有效降阻长度; 然后, 研究了土壤电阻率、入地电流频率对单分支式和多分支式外延接地网降阻特性的影响规律; 最后, 分析了不平衡分支式外延接地网的散流特性。结果表明: 相比于传统方框带射线型接地网, 分支接地极结构比例为1/3的单分支式外延接地网具备更好的降阻特性, 并且三分支式外延接地网的接地施工面积更小, 不平衡分支式外延接地网有助于进一步降低主接地网的散流密度。

关键词: 环保接地; 有限施工面积; 分支式外延接地网; 降阻效率; 散流电流密度

Research on Grounding Characteristics of Tower Branch Epitaxial Grounding Grid for Environmental Protection Grounding Construction

LIAO Yuqin¹, QU Lu², YANG Yueguang¹, LIAO Minchuan², LI Wenrong¹, WANG Xiaoping¹

(1. CSG EHV Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China; 2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Low carbon and environmental protection have become the strategy and policy orientation in China. In case of resistance reduction construction of transmission towers, long-distance epitaxial grounding electrodes are often laid to ground, resulting in such problems as waste of land resources and damage to the environment. In view of the complexity of the tower grounding construction environment and the limited construction area, a distributed current resistance reduction structure of the branch-type epitaxial grounding grid of the transmission line tower is proposed so to achieve low carbon and protection of the ground resistance reduction construction. Firstly, the effective resistance reduction length of a single epitaxial grounding electrode is calculated by simulation. Then, the influence of soil resistivity and ground current frequency on the resistance reduction characteristics of single-branch and multi-branch epitaxial grounding grids is studied. Finally, the current dispersion characteristics of unbalanced branch epitaxial grounding grid are analyzed. The simulation results show that compared with the traditional square frame strip-ray grounding grid, the single-branch epitaxial grounding grid with 1/3 of branch grounding electrode structure ratio has better resistance reduction characteristics, and the grounding construction area of the three-branch epitaxial grounding grid is smaller. The unbalanced branch epitaxial grounding grid helps to reduce the current density of the main grounding grid further.

Key words: environmental protection grounding; limited construction area; branched epitaxial grounding grid; resistance reduction efficiency; dispersed current density

收稿日期: 2024-04-21; 修回日期: 2024-07-20

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(CGYKJXM20220051)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(CGYKJXM20220051).

0 引言

为了统筹推进国家的环保措施,相关部门推出的输电线路环保政策包含多个方面,其旨在降低施工过程对环境的影响并提高能源利用效率。其中一个重要内容是绿色施工,即要求在输电线路建设和改造工程中采取绿色施工技术,以减少对地表生态破坏为目的^[1]。但为应对中国社会对于电力需求的增大,输配电工程也在被大规模地建设,伴随而来的是输电能源走廊占用面积在逐年扩大,输电线路杆塔面临的架设环境也日益复杂。杆塔作为支撑输电线路的重要结构,具有地理位置差异大,架设环境复杂多样的特点,山坡、山脊等复杂地形下线路的雷击跳闸率要高于平地,地闪总次数高的地方引起线路雷击跳闸次数也会上升^[2-3]。实际运行经验表明,降低输电杆塔的接地电阻可提高线路耐雷水平、降低线路雷击跳闸率^[4-5]。当前,输电线路杆塔常采用长距离外延接地极,从而使特殊地区的输电线路杆塔接地电阻符合国家标准,但这在一定程度上会引起资源浪费、环境破坏和施工过程的过于复杂等一些问题。为此提出面向环保接地施工的杆塔接地网分支外延降阻方法,在实现有限施工面积下降低杆塔接地电阻的同时,简化施工过程,达到降低碳排放的目的。

国内外专家对于输电线路杆塔接地网的散流降阻进行了大量研究。邓长征和肖磊石等人^[6-7]采用模拟试验的方法,研究了水平射线接地极的散流分布并提出分支夹角互为 120° 的三段式降阻结构,结果显示三段式分支接地极有效地降低了接地网的冲击接地电阻。罗思敏^[8]在分析垂直接地极的散流特性时发现,敷设垂直接地极有助于改善接地网的跨步电压和接触电势,但存在垂直接地极散流不均匀和多根垂直接地极间受屏蔽作用影响降阻效果不明显的问题。高竹青课题组^[9]通过仿真进一步研究了不同长度垂直接地极的影响范围,提出了敷设多根垂直接地极时其间距应大于其影响范围,从而获得更好降阻效果的结论。Haize Hu^[10]提出构建与主接地网相连的辅助接地网,并将杆塔接地点从主接地网转换到辅助接地网的优化方案,结果表明此方案减少了流经主接地网的电流,主接地网的接地电阻与跨步电压均有所降低;而李腾^[11]等人通过对比分析单边、双边、方框与垂直辅助接地网各自的散流降阻特性,得出同等条件下单边辅助接地网降阻特性更优的结论。当外延接地极达到其有效散流长度之后,继续延伸时接地网降阻效率的提升

将不再明显^[12]。针对上述现象,A. El Mghairbi^[13]提出在水平接地极上方额外安装一个与其多处连接的绝缘平行导体,经仿真和试验表明此方法利用了更长的埋设水平接地极,有助于降低杆塔接地电阻。C.E.F. Caetano^[14]则提出使用架空线将杆塔基础连接到另一组额外接地网的布置方法,在增加有限接地体材料的情况下,使得接地电阻降低的效果较为明显。上述研究均通过增设辅助接地网来扩大接地网的散流面积,从而降低接地电阻,实际输电线路接地外延施工需考虑施工面积、地形条件和征地成本限制。

针对杆塔接地降阻施工的环保低碳需求,文中提出了分支式外延接地网结构,通过与常见接地方式的接地施工面积进行对比分析,以确定分支式外延接地网结构在接地施工面积上的优势,以此达到减少资源浪费、环境破坏和施工过程中碳排放的目的。为了研究该新型外延结构降阻特性,构建杆塔多分支式外延接地网模型,分析单向外延接地极的降阻规律,研究不同因素下单、多分支式外延接地网的降阻特性,优化分支接地极结构,并分析不平衡分支式外延接地网的散流特性。

1 杆塔分支式外延接地网模型与参数设定

1.1 分支式外延接地极占地面积

不同形状的水平接地极对占地面积有着较大的影响,考虑到敷设水平接地极时会破坏地表植被,影响周围环境,施工过程中杆塔接地极实际占地面积越小越有利于减少地表植被的破坏程度。为了对不同形状的水平接地方式占地面积进行对比分析,现设定主接地网边长为 10 m ,主接地网之外的外延分支接地极总长度设置为 120 m ,主接地网带分支的外延接地网占地面积示意图1。在外延接地极总长度在保持一致的前提下,各个分支长度通过比例可以求出,由于分支之间的夹角为 120° 的固定值,通过三角函数可以求出分支数所在长方形的高和宽,单个分支接地极所占面积为长和宽的乘积,总的占地面积即为各个面积的累加值,分支外延接地网占地面积见表1。在同等外延接地极长度的情况下,带 45° 外延射线的接地网占地面积最大,相较于单分支外延接地,双分支占地面积较少,三分支外延占地面积最少。

并联的接地极向地中散流时电流出现彼此拥挤的现象,这种现象被称之为电流屏蔽效应。屏蔽效应是由于电流通过各接地极时,各接地极周围附近的电场互相重叠而引起的,由于电场重叠,各接

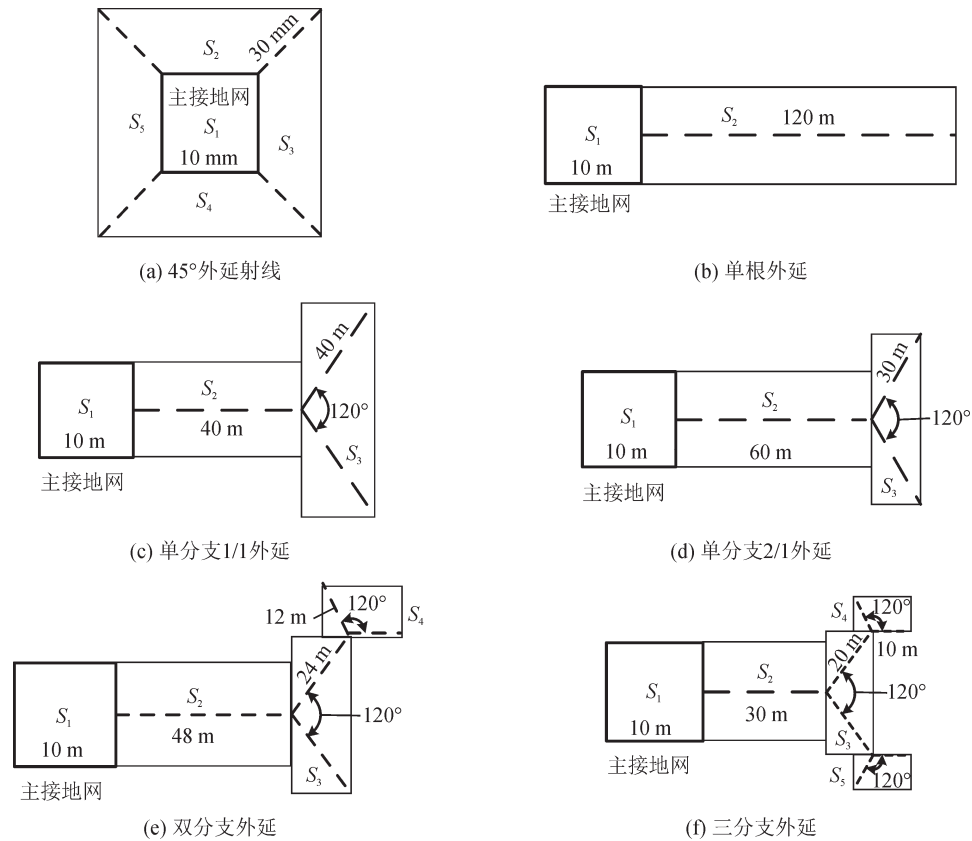


图1 分支外延接地网占地面积

Fig. 1 The occupied area of branch epitaxial grounding grid

表1 不同外延分支接地网占地面积

Table 1 The occupied area of different branch epitaxial grounding grid

类型	45°射线外延	单根外延	单分支 1/1 外延	单分支 2/1 外延	双分支外延	三支外延
面积/m ²	2 748.5	1 300.0	1 885.6	1 479.4	1 203.5	833.0

地极周围的电场发生畸变,电流密度也随之畸变,使得每个接地极散流的阻力增大,接地极之间的并联接地电阻值会有所增大。如表1所示,考虑到实际输电工程的接地装置一般是由不同形状的接地极组合而成,由于不同导体之间存在屏蔽效应,在通入相同的电流时,实际上测得的接地电阻会大于理论计算值。接地导体之间的屏蔽效应与接地极布置方式有关,不同的布置方式产生的接地电阻也会存在差异。直线型接地极的结构比较简单,不存在屏蔽效应,对于长度为 L 的单根水平直线接地极,其接地电阻计算公式可为

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L}{hd} - 0.6 \right) \quad (1)$$

并联的接地极向地中散流时电流出现彼此拥挤的现象,这种现象被称之为电流屏蔽效应。屏蔽效应是由于电流通过各接地极时,各接地极周围附

近的电场互相重叠而引起的,由于电场重叠,各接地极周围的电场发生畸变,电流密度也随之畸变,使得每个接地极散流的阻力增大,接地极之间的并联接地电阻值会有所增大。以单根水平接地极的接地电阻计算公式作为参照,引入屏蔽系数 A_0 ,将各种形状水平接地极的接地电阻计算公式进行修正^[15],可得

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L}{hd} - 0.6 + A_0 \right) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: R 为工频接地电阻, Ω ; ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; L 为水平接地极的长度, m ; h 为水平接地极的埋深, m ; d 为水平接地极的直径, m 。

根据各种水平接地极的 A_0 值可以计算出所对应工频接地电阻,现设定水平接地极总长度 L 为120 m,土壤电阻率 ρ 为500 $\Omega \cdot m$,埋深 h 为0.8 m,接地极直径 d 为16 mm,计算结果见表2。

表2 不同形状水平接地极的屏蔽系数 A_0 与接地电阻计算值Table 2 The shielding coefficient A_0 and the calculated value of grounding resistance of horizontal grounding electrodes with different shapes

参数	数值									
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
水平接地极形状	—	└	┐	○	+	□	✱	✱	✱	✱
屏蔽系数 A_0	0.00	0.42	0.60	1.08	1.49	1.60	2.79	3.63	5.31	6.25
接地电阻/ Ω	8.84	9.12	9.23	9.56	9.83	9.90	10.69	11.25	12.36	12.99

由表2的屏蔽系数与接地电阻可知,随着水平接地极分支数的增加,导体之间的屏蔽作用越来越明显。在同等条件下,分支数越多其接地电阻也越大。上述提到同等水平接地分支数越多其占地面积越小,但是为了保证水平分支接地极的降阻效果,需要将分支数限制在合理范围内,故研究单分支、双分支与三分支的降阻效果。

1.2 杆塔接地网模型

考虑到杆塔接地装置会面临复杂的地形,当杆塔位于山顶、斜坡或临近道路、桥梁、堤坝、管道等时,接地施工面积受限,杆塔接地网并不能完全按照“方框四角射线”的典型设计结构进行施工。如图2所示的典型有限施工面积下的杆塔接地网往往受外延条件的制约,接地网外延方向、外延数量、外延分支及长度等因素均会对入地雷电流的散流产生直接影响,导致其接地电阻值过高。



图2 有限施工面积下的杆塔接地

Fig. 2 Tower grounding under limited construction area

为了改善有限施工面积下输电线路杆塔的接地特性,文中建立杆塔接地网分支式外延降阻结构见图3。利用CDEGS仿真软件搭建杆塔分支式外延接地模型,其中主接地网方框边长为10 m,分支式外延接地极敷设于边框接地极中间位置,埋深0.8 m,接地材料采用镀锌钢。

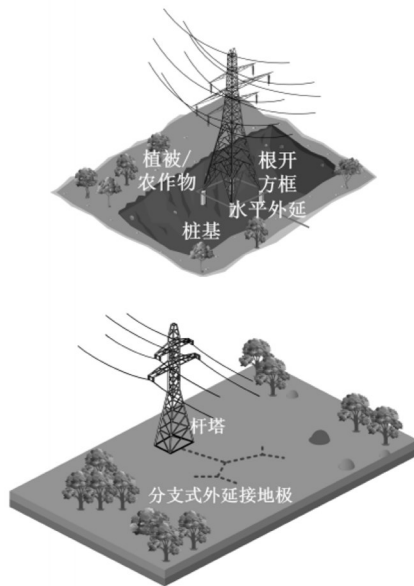


图3 杆塔分支式外延接地网

Fig. 3 Branched epitaxial grounding grid of tower

由于自然界中雷电流幅值在16~40 kA的比例居多^[16],且2.6/50 μ s雷电流频率分量在100 kHz仍有较大的振幅^[17-29],因此对杆塔接地网施加40 kA的入地雷电流,单个塔基引下线的入地电流幅值为10 kA,同时,对不同雷电流频率影响外延接地极散流特性的规律加以分析。

2 单根外延接地极降阻特性计算

杆塔接地网的降阻特性与很多因素有关,如外延接地极长度、土壤电阻率和入地电流频率等。为了表征某一因素对于接地电阻的影响程度,引入降阻效率 η 作为标准,降阻效率 η 定义为

$$\eta = \frac{R_0 - R_i}{R_0} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: R_0 为方框接地网的接地电阻; R_i 为分支式外延接地网的接地电阻。

接地网的接地电阻受单根外延接地极长度的影响,在仿真软件中建立敷设单根外延接地极的杆塔接地网模型,见图4。

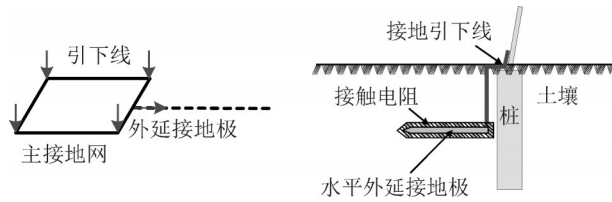


图4 接地网单根外延接地降阻结构

Fig. 4 Grounding grid with single epitaxial electrode

取外延接地极长度 $L=30\sim 150$ m, 计算入地电流频率 $f=50$ Hz 时接地网的降阻效率, 计算结果见图5。

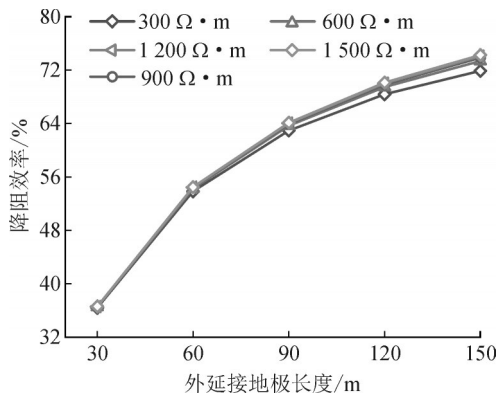


图5 改变外延接地极长度接地网的降阻效率

Fig. 5 The resistance reduction efficiency of the grounding grid by changing the length of the epitaxial grounding electrode

由图5仿真结果可知, 外延接地极长度的增加会增大杆塔接地网的降阻效果。然而, 随着外延接地极长度的进一步增加, 接地网降阻效率的提高幅度逐渐减小, 呈现出饱和趋势。以土壤电阻率为 $\rho=900\ \Omega\cdot\text{m}$ 为例, 相较于外延长度由30 m增加到60 m 接地网降阻效率增加了17.81%的情况下, 外延接地极的长度由120 m增加至150 m时, 接地网的降阻效率仅增加了4%。在相同外延接地极长度下, 接地网周围土壤的电阻率越高, 其降阻效率越高。这是因为在低土壤电阻率环境下, 杆塔主接地网可以泄放大量的入地电流; 而在高土壤电阻率环境下, 入地电流在主接地网附近散流受阻, 更多电流通过外延接地极向接地网远端进行散流。

3 单分支式外延接地网降阻分析

文[6]指出三段式水平射线接地极的分支夹角为 120° 时, 接地网的降阻效果更加显著。在此研究的基础上, 建立单分支式外延接地网模型见图6, 设置分支式外延接地极的长度为120 m, 接地极 L_3 与接地极 L_4 的比值分别为 $1/3$ 、 $1/2$ 、 $1/1$ 、 $3/1$ 。

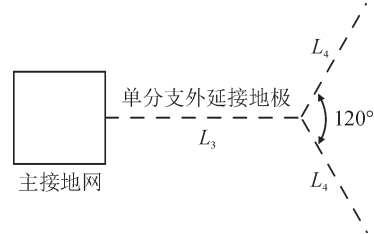


图6 单分支式外延接地网

Fig. 6 Single branched epitaxial grounding grid

3.1 入地电流频率的影响

在均匀土壤下, 研究入地电流频率的变化对单分支式外延接地网的影响, 对比不同单分支式外延接地网的降阻差异。入地雷电流频率 f 取值范围在50~100 kHz之间, 设置土壤电阻率 ρ 为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$, 仿真计算不同分支结构接地网的降阻效率, 计算结果见图7。

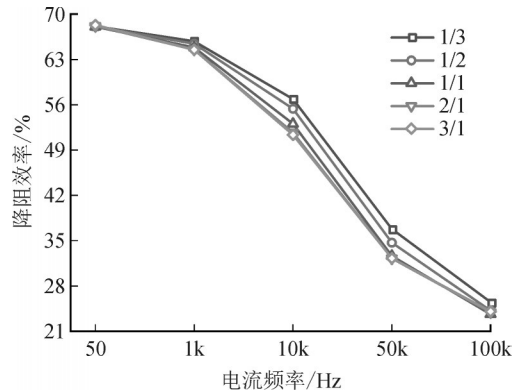
图7 不同 L_3/L_4 比值改变电流频率接地网的降阻效率

Fig. 7 The resistance reduction efficiency of the grounding grid when the current frequency is changed under different L_3/L_4 ratios

由图7计算结果可知, 随着电流频率的增加, 不同分支结构的单分支外延接地网的降阻效率均在大幅度的下降, 且电流频率从50 Hz增加到50 kHz时接地极降阻效率的下降幅度在增加, 其中 $L_3/L_4=1/3$ 的单分支式外延接地网在电流频率从50 Hz增加到50 kHz时, 其降阻效率从68.13%降为36.81%, 仅约为50 Hz的1/2。出现这种现象的原因主要在于高频电流作用下, 金属接地极不可忽略的电感效应阻碍了雷电流在接地极流通, 接地极的散流效果变差。另外, 从图7中也可以看出随着 L_3 与 L_4 比值越大, 分支式外延接地网的降阻效率受入地雷电流频率的影响越大。相比较其他单分支外延接地网降阻措施, $L_3/L_4=1/3$ 的单分支式外延接地网的降阻效率略高。其原因是当分支接地极 $L_3/L_4=1/3$ 时, 单分支式外延接地网的散流区域更大所致。

3.2 土壤电阻率的影响

为了研究土壤电阻率的变化对单分支式外延接地网的影响, 并对比不同单分支式外延接地网的

降阻差异,土壤电阻率 ρ 取值范围在 $500\sim 2\,500\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,取入地电流频率 $f=10\ \text{kHz}$,仿真计算不同结构单分支式外延接地网的降阻效率,计算结果见图8。

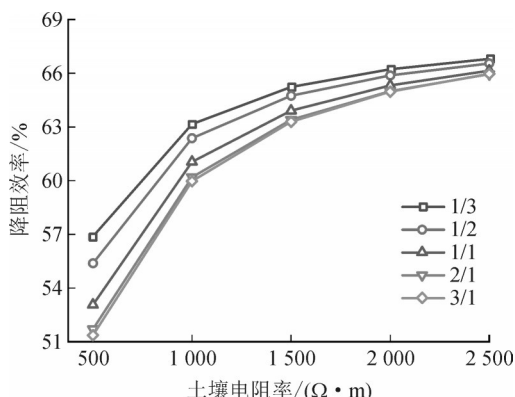


图8 不同 L_3/L_4 比值改变土壤电阻率接地网的降阻效率

Fig. 8 The resistance reduction efficiency of grounding grid when changing soil resistivity under different L_3/L_4 ratios

图8仿真结果表明,土壤电阻率的增加,提高了接地网的降阻效果。在低阻环境下, $L_3/L_4=1/3$ 的单分支式外延接地网的降阻作用更强,其降阻效率高出其他接地网1.51%~5.52%;在高阻环境下,不同 L_3/L_4 比值的单分支式外延接地网的降阻效率相差不大。由此可见,在外延接地极长度相等的情况下,延伸接地极 L_4 的长度能够提高接地网降阻效率。

综合以上分析可知,若计划采用敷设单分支式外延接地极来降阻时,分支接地极比例 $L_3/L_4=1/3$ 的单分支式外延接地网具备更好的降阻特性。

4 多分支式外延接地网降阻分析

若杆塔分支接地极采用1/3的结构,接地网相邻两侧敷设同等长度分支接地极时,会出现接地极末端彼此交叉的情况;若分支接地极的比值为3/1,整个接地网的尺寸就会偏大。因此,本节在研究多分支式外延接地网的降阻特性时,分支接地极选用2/1的比例结构,这样既不会影响在接地网各侧敷设多分支接地极,也不会产生接地网占地面积过大和建设成本过高的问题。

为研究杆塔多分支式外延接地网的接地特性,优化其分支接地极结构,在CDEGS软件中建立多分支式外延接地网模型,见图9。其中外延接地极总长度 $L=120\ \text{m}$,分支接地极之间夹角为 120° 。

4.1 入地电流频率的影响

入地电流频率 f 取值范围在 $50\sim 100\ \text{kHz}$ 之间,土壤电阻率 $\rho=500\ \Omega\cdot\text{m}$,仿真计算不同多分支式外

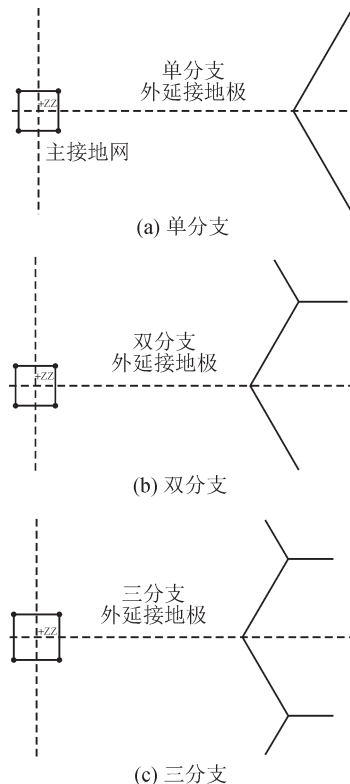


图9 多分支式外延接地网

Fig. 9 Multi-branched epitaxial grounding grid

延接地网的降阻效率,计算结果见图10。不同入地电流的频率对多分支式外延接地网的降阻效率影响较大,单分支、双分支、三分支的降阻效率随入地电流频率的增加,均出现了较大幅度的下降。在低频情况下,单分支外延接地网的散流区域更大,其降阻效率达到68.18%,略高于其他接地网1%左右。在中高频情况下,电感效应的增强导致电流在接地极中的散流能力减弱。在三分支外延接地网中,从入地电流注流点到接地网末端的直线距离更短且具备更多的分支结构,接地网的有效散流区域更大,其降阻效率要略高于其他接地网。

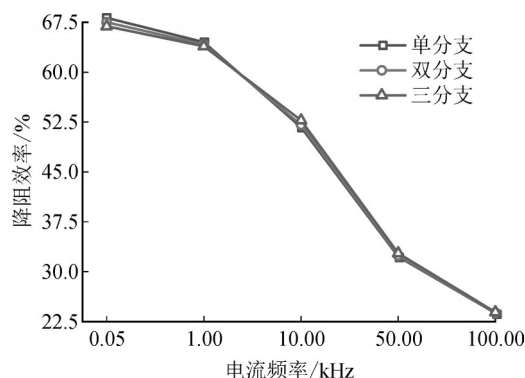


图10 不同电流频率下改变分支结构接地网的降阻效率

Fig. 10 Resistance reduction efficiency by changing branched structure at different current frequencies

4.2 土壤电阻率的影响

土壤电阻率 ρ 取值范围在 $500 \sim 2\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 之间, 入地电流频率 $f=10 \text{ kHz}$, 仿真计算不同结构多分支式外延接地网的降阻效率, 计算结果见图 11。

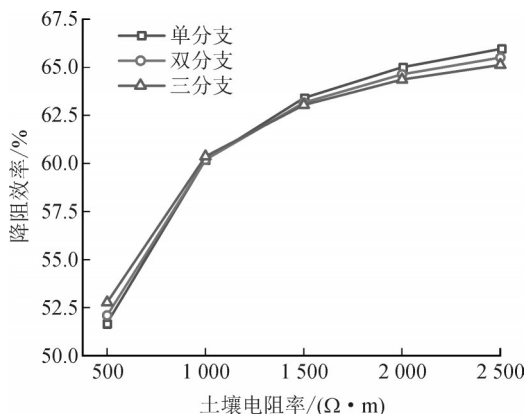


图 11 不同土壤电阻率下改变分支结构接地网降阻效率

Fig. 11 Resistance reduction efficiency by changing branched structure under different soil resistivities

如图 11 所示, 土壤电阻率的增加, 使得多分支式外延接地网的降阻效率成上升趋势, 但上升趋势逐渐变缓。当土壤电阻率较低时, 入地电流更倾向在主接地网周围散流。当土壤电阻率较高, $\rho \geq 1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 时, 一方面高土壤电阻率抑制入地电流在主接地网周围散流, 另一方面高频电流抑制入地电流向接地网远端扩散, 在双重因素影响下单分支式外延接地网的降阻效率表现略高。然而, 纵观不同土壤环境, 3 种分支式外延接地网的降阻效率近乎相等。

在实际工程中, 若计划敷设多分支式外延接地极来改善接地网的散流降阻特性, 三分支式外延接地网因具备较好的降阻效果以及更小的占地面积, 可以作为备选方案之一。

5 不平衡分支式外延接地网散流分析

输电线路杆塔接地网在施工过程中, 受杆塔周围环境中一些存在物的影响, 敷设分支式外延接地极时不可避免地会出现无法敷设平衡对称分支接地极的情况, 此时不平衡分支式外延接地极结构可以更好的适应接地网的施工状况。将三分支式外延接地网的结构优化调整, 见图 12 不平衡分支式外延接地网。

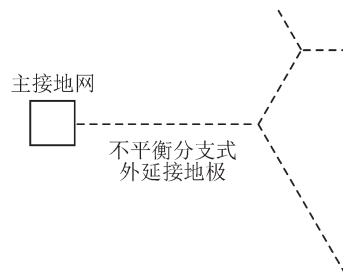


图 12 不平衡分支式外延接地网

Fig. 12 Unbalanced branched epitaxial grounding grid

在 CDEGS 中建立图 12 所示的接地网模型, 接地网周围土壤的电阻率 ρ 取值范围在 $500 \sim 2\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 之间, 入地电流频率 f 取值范围在 $50 \sim 100 \text{ kHz}$ 之间, 仿真不平衡分支式外延接地网的降阻效率, 计算结果见表 3。

表 3 不平衡分支式外延接地网的降阻效率

Table 3 Resistance reduction efficiency of unbalanced branched epitaxial grounding grid

入地电流频率/ kHz	降阻效率/%				
	500	1 000	1 500	2 000	2 500
	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{m}$
0.05	67.50	68.00	68.16	68.25	68.29
1.00	64.39	66.49	67.18	67.51	67.71
10.00	52.92	60.71	63.49	64.85	65.65
50.00	32.72	45.39	52.30	56.40	59.01
100.00	23.69	34.82	42.48	47.86	51.71

根据表 3 计算数据可知: 在土壤电阻率 ρ 从 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 增加到 $2\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 的过程中, 在入地电流频率相同时, 随着土壤电阻率的增加, 不平衡分支式外延接地网的降阻效率呈现逐渐上升的趋势。当工频电流作用时, 接地网降阻效率的增长幅度低于 4%, 而随着电流频率的提高, 降阻效率的增长幅度也在逐渐增大。当入地电流频率 f 达到 100 kHz 时, 接地网降阻效率增长超过 28%。究其原因是土壤电阻率的增大迫使雷电流沿着分支接地极向接地网远端扩散, 杆塔接地网的散流区域得到扩大, 进而使其降阻效率逐渐上升。在施加低频电流时, 不同土壤环境下入地电流都能够在接地网中得到充分扩散, 接地网利用程度高, 其降阻效率变化幅度较小。在施加高频电流时, 增大了接地极的电感效应, 低土壤电阻率环境下入地电流更倾向在主接地网附近散流, 而高土壤电阻率条件下部分电流通过分支接地极在接地网远端散流, 两种情况下接地网的有效散流区域不同, 造成其降阻效率存在较大差距。

土壤电阻率恒定的情况下,不平衡分支式外延接地网的降阻效率随入地电流频率的增加逐渐下降。随着土壤电阻率增大,接地网降阻效率的下降幅度逐渐减小,当土壤电阻率 ρ 为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,接地网降阻效率下降了36.31%~43.81%;当土壤电阻率 ρ 为 $2\ 500\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,接地网的降阻效率下降了9.43%~16.58%。这是因为入地电流频率的增大使得接地极的电感效应增强,越来越多的电流难以通过分支接地极在接地网远端散流,接地网的有效散流区域缩小,降阻效率随之下降。当土壤电阻率较低时,

入地电流易于在主接地网附近散流,低频情况下部分入地电流可以在接地网远端散流,而高频情况下大多数入地电流只能在主接地网周围散流,两种情况下接地网的散流区域相差明显,其降阻效率会有较大差距。当土壤电阻率较高时,不同入地电流的频率对电流散流区域的影响程度在减少,因此其降阻效率下降程度减小。为了更加直观地观察不平衡分支式外延接地网的地面标量电势变化,仿真计算不同入地电流频率和土壤电阻率下接地网的标量电势分布情况见图13。

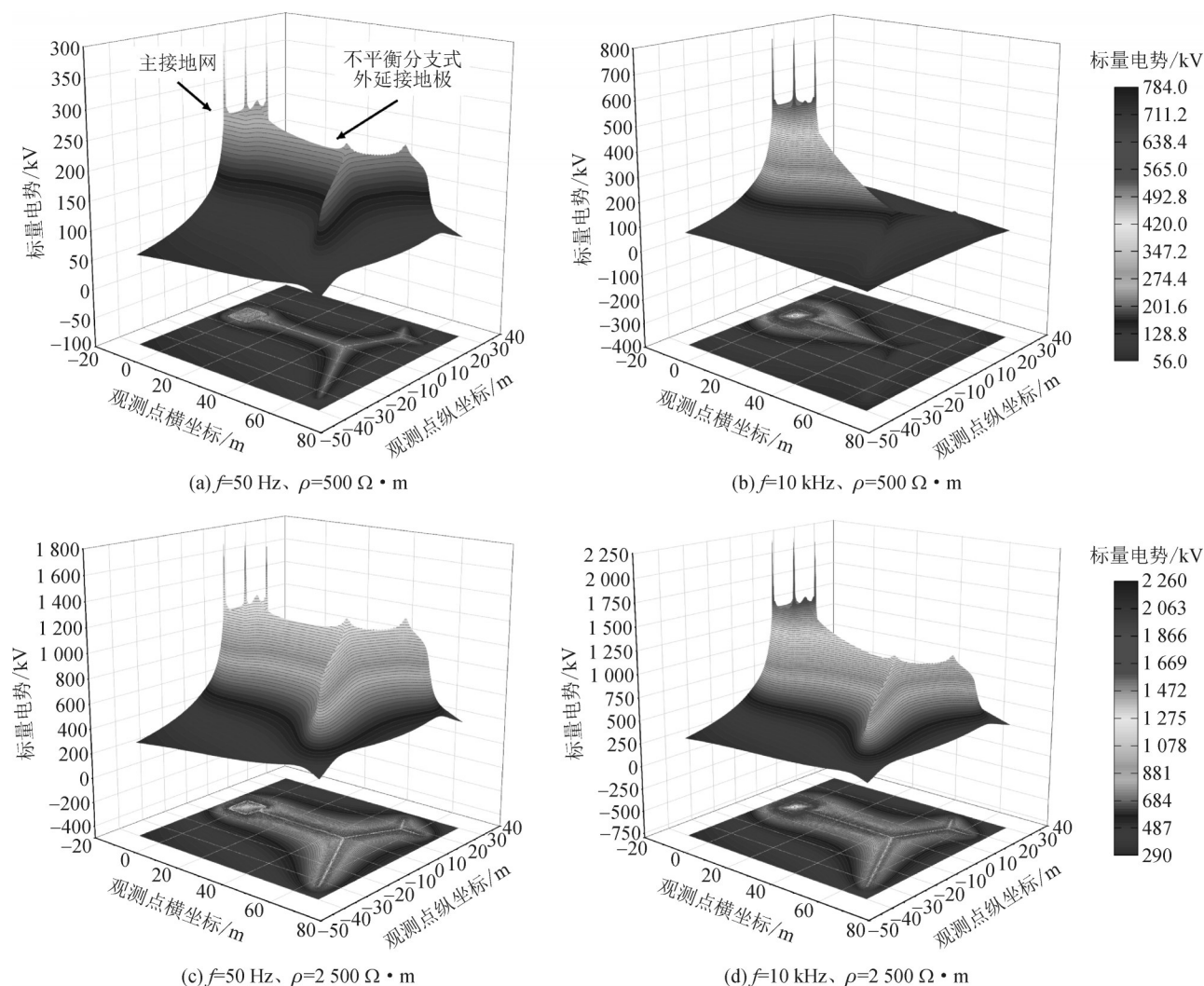


图13 不平衡分支式外延接地网的地面标量电势分布

Fig. 13 Grounding scalar potential of unbalanced branched epitaxial grounding grid

如图13所示,随着入地电流沿分支式外延接地极向接地网远端散流,其标量电势也在逐渐下降,整体呈现出远离主接地网标量电势迅速下降的现象。当土壤电阻率 $\rho=500\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,工频情况下,71.65%的入地电流通过分支式外延接地极散流,此时主接地网的标量电势峰值为384 kV;10 kHz的入

地电流作用时,接地极的电感效应使得只有46.39%的入地电流流入分支式外延接地极中,大量电流在主接地网散流导致主接地网的标量电势峰值提高104.17%,达到784 kV。入地电流一定时,高电阻率土壤造成接地网的地面标量电势极大上升。工频条件下,74.84%的入地电流流入分支式外延接地极

散流,主接地网的标量电势峰值为1 740 kV;10 kHz的入地电流作用时,70.12%的入地电流在分支式外延接地极中散流,此时,主接地网的标量电势峰值上升为2 260 kV,提高了29.88%。

为进一步研究入地电流在不平衡分支式外延接地网中的散流情况,分析雷电流作用下镀锌钢接地网的散流分布,见图14。不平衡分支式外延接地网的散流电流在分支接地极末端表现出明显的“端部效应”。

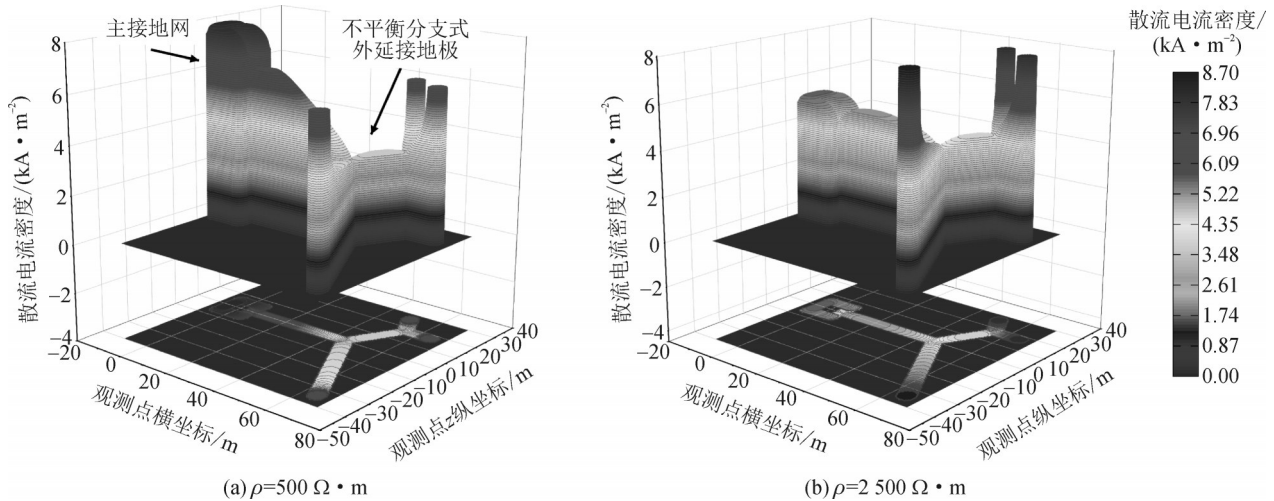


图14 不平衡分支式外延接地网的散流电流密度

Fig. 14 Dispersed current density of unbalanced branched epitaxial grounding grid

当土壤电阻率 $\rho=500 \Omega \cdot \text{m}$ 时,主接地网和分支接地极末端的散流电流密度分别为 8.12 kA/m^2 和 6.28 kA/m^2 。当土壤电阻率 $\rho=2\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 时,分支接地极末端的散流电流密度为 8.03 kA/m^2 ,高于主接地网30.39%。

综上所述,杆塔接地网所处土壤的电阻率越高,分支式外延接地网越有助于降低主接地网的散流密度,缓解主接地网的散流压力,有利于实现有限施工面积下的接地散流,对于降低接地降阻施工难度和成本具有实际应用价值。

6 结论

文中搭建了杆塔分支式外延接地网接地散流降阻模型,仿真计算不同入地电流频率和土壤电阻率下单分支式和多分支式外延接地网的接地特性,优化了其分支接地极的结构,并分析了不平衡分支式外延接地网的散流特性,实现了杆塔降阻施工低碳环保。主要结论如下:

1)在同等长度外延接地极条件下,相较于 45° 外延射线,分支式外延接地网结构的占地面积有了较大幅度的降低,并且当接地结构为三支外延时,占地面积仅是 45° 外延射线接地结构占地面积的三分之一,这将有助于降低施工成本,保护环境,并可因简化施工过程而降低碳排放。

2)在同等长度外延接地极的条件下,分支接地极比例为1/3的单分支式外延接地网的降阻效率优于其他单分支结构;三分支式外延结构的占地面积相对更小,有助于接地网敷设与降低施工成本。

3)对于不平衡分支式外延接地网,接地网同样具备良好的散流降阻效果,当土壤电阻率 $\rho=2\,500 \Omega \cdot \text{m}$ 时,接地网的降阻效率超过65.5%,主接地网的散流电流密度降低了66.5%。

文中相关仿真计算结果可为输电线路杆塔接地设计、施工与降阻改造等提供参照。

参考文献:

- [1] 郭创新,刘祝平,冯 斌,等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术,2022,48(9):3394-3404.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new - type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.
- [2] 陆国俊,罗健斌,刘瀚波,等. 广州地区线路雷击跳闸特性统计与仿真[J]. 高电压技术,2018,44(5):1542-1548.
LU Guojun, LUO Jianbin, LIU Hanbo, et al. Statistics and simulation of lightning trip out of transmission lines in Guangzhou area[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1542-1548.
- [3] 何金良,曾 嵘,高延庆. 电力系统接地技术研究进展[J]. 电力建设,2004,25(6):1-3.
HE Jinliang, ZENG Rong, GAO Yanqing. Progress of study on grounding technology of modern power system[J].

- Electric Power Construction, 2004, 25(6): 1-3.
- [4] 肖安南, 张蔚翔, 焦玉平, 等. 基于 ATP-EMTP 仿真软件的输电线路雷击跳闸率多因素对比分析研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 146-150.
XIAO Annan, ZHANG Weixiang, JIAO Yuping, et al. Multi-factor comparative analysis of lightning trip out rate in transmission line based on ATP-EMTP simulation software[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 146-150.
 - [5] 刘晓倩, 董新伟, 杨瑞静. 输电线路防雷措施的仿真与分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(4): 64-68.
LIU Xiaoqian, DONG Xinwei, YANG Ruijing. Simulation and analysis on lightning protection measures of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4): 64-68.
 - [6] 邓长征, 赵习武, 邱立, 等. 冲击电流作用下杆塔接地体的散流分布及降阻措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(5): 128-133.
DENG Changzheng, ZHAO Xiwu, QIU Li, et al. Research on distribution of diffusing current and reducing resistance measures of tower grounding electrodes in impulse current condition[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(5): 128-133.
 - [7] 肖磊石, 黄佳瑞, 李谦, 等. 水平分支对方框带射线型接地体冲击特性的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 187-192.
XIAO Leishi, HUANG Jiarui, LI Qian, et al. Influence of horizontal branch on impulse characteristics of box grounding device with radiation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 187-192.
 - [8] 罗思敏. 垂直型直流接地极散流特性试验研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 28-33.
LUO Simin. Experimental study on current distribution of vertical DC grounding electrode[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 28-33.
 - [9] 高竹青, 曹晓斌, 杜俊乐, 等. 垂直接地极对杆塔冲击接地电阻的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 182-187.
GAO Zhuqing, CAO Xiaobin, DU Junle, et al. Study on the effect of vertical rod on reducing tower's impulse grounding resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 182-187.
 - [10] HU Haize, LUO Richeng, FANG Mengge, et al. A new optimization design for grounding grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019(108): 61-71.
 - [11] 李腾, 胡元潮, 高晓晶, 等. 输电线路杆塔辅助接地网降阻效率及影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 165-169.
LI Teng, HU Yuanchao, GAO Xiaojing, et al. Research on resistance reduction efficiency and influencing factors of transmission lines auxiliary grounding grid[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 165-169.
 - [12] 曹晓斌, 高竹青, 马御棠, 等. 雷击下 500 kV 杆塔接地装置的散流有效性[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1596-1601.
CAO Xiaobin, GAO Zhuqing, MA Yutang, et al. Current divergence validity of 500 kV tower grounding device under lightning stroke[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1596-1601.
 - [13] EL MGHAIRBI A, AHMED M, HARID N, et al. Technique to increase the effective length of practical earth electrodes: Simulation and field test results[J]. Electric Power Systems Research, 2013(94): 99-105.
 - [14] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018(159): 31-39.
 - [15] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
HE Jinliang, ZENG Rong. Power system grounding technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
 - [16] 据泽立, 蒲路, 赵学风, 等. 陕西地区雷电参数统计与配网雷电过电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 161-166.
JU Zeli, PU Lu, ZHAO Xuefeng, et al. The analysis of lightning parameter and lightning induced voltage of distribution line in Shaanxi province[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 161-166.
 - [17] 程锐, 李梅, 张新燕. 雷电电流的频谱和能量分析[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 4-7.
CHENG Rui, LI Mei, ZHANG Xinyan. Spectrum and energy analysis of lightning current[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2012, 35(3): 4-7.
 - [18] 刘志祥, 姜志鹏, 袁驰, 等. 有限面积下并行线路杆塔接地网级联降阻及电位分布特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 38-45.
LIU Zhixiang, JIANG Zhipeng, YUAN Chi, et al. Characteristics of resistance reduction and potential distribution of parallel line tower grounding grid cascaded in limited area[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 38-45.
 - [19] 周利军, 梅诚, 古维富, 等. 杆塔接地装置冲击散流的测试技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 192-199.
ZHOU Lijun, MEI Cheng, GU Weifu, et al. Study on measurement technology of impulse dispersing current in tower grounding device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 192-199.
 - [20] 李景丽, 时永凯, 朱子卓, 等. 考虑土壤火花击穿特性的针刺式接地装置降阻研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(1): 11-20.
LI Jingli, SHI Yongkai, ZHU Zizhuo, et al. Resistance reduction of needle-punched grounding device considering soil spark breakdown characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 11-20.
 - [21] 黄欢, 郭洁, 魏琪, 等. 杆塔冲击接地阻抗的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 217-222.
HUANG Huan, GUO Jie, WEI Qi, et al. Analysis of tower grounding impedance under lightning impulse by finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 217-222.

- [22] 董贯雷, 高 鹏, 李宋林, 等. 接地网形式对近水源区杆塔接地网外延降阻影响[J]. 电瓷避雷器, 2023(1):106-115.
DONG Guanlei, GAO Peng, LI Songlin, et al. Influence of grounding grid on extension resistance reduction of tower grounding grid near water source area[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1):106-115.
- [23] 何智强, 李 欣, 俞 乾, 等. 考虑故障短路电流分布的纳米碳纤维材料接地特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11):2759-2765.
HE Zhiqiang, LI Xin, YU Qian, et al. Grounding characteristics of nano - carbon fiber grounding material considering short circuit current distribution[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(11):2759-2765.
- [24] 汤亮亮, 陈辉荣, 李 健, 等. 石墨烯复合接地装置在杆塔接地中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2023(1):124-132.
TANG Liangliang, CHEN Huirong, LI Jian, et al. Graphene composite grounding device and its application in tower grounding grid of power transmission system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1):124-132.
- [25] 康 鹏, 张兆华, 李志忠, 等. 人工冲击下输电线路杆塔暂态特性测试方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8):3291-3297.
KANG Peng, ZHANG Zhaozhua, LI Zhizhong, et al. Transient characteristics measurement of transmission line towers under artificial impacts[J]. Power System Technology, 2021, 45(8):3291-3297.
- [26] 王旭明, 姜建勇, 李 伟, 等. 应用CDEGS进行杆塔接地体降阻方案设计的研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(6):117-122.
WANG Xuming, LOU Jianyong, LI Wei, et al. Resistance reduction scheme design of tower grounding body by CDEGS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6):117-122.
- [27] 郭 蕾, 古维富, 刘 彬, 等. 杆塔接地装置的冲击阻抗建模及应用[J]. 电工技术学报, 2020, 35(10):2239-2247.
GUO Lei, GU Weifu, LIU Bin, et al. Impulse impedance modeling and application of tower grounding device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10):2239-2247.
- [28] 马 超, 刘渝根, 梁 科, 等. 基于CDEGS降阻材料对接地电阻影响的仿真[J]. 电瓷避雷器, 2019(6):13-19.
MA Chao, LIU Yugen, LIANG Ke, et al. Simulation of the effect of resistance - reducing material on grounding resistance based on CDEGS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6):13-19.
- [29] 郭 蕾, 刘 聪, 陈 伟, 等. 基于暂态接地电阻建模的输电线路雷击响应研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7):3001-3010.
GUO Lei, LIU Cong, CHEN Wei, et al. Lightning strike response of transmission lines based on transient earth resistance modelling[J]. Power System Technology, 2023, 47(7):3001-3010.
- 廖玉琴(1996—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事超特高压输电线路防灾减灾工作(E-mail: 291673198@qq.com)。
- 屈 路(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网雷电防护与过电压防护。
- 杨跃光(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路防雷及风险评估。
- 廖民传(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事输电线路雷击防护分析。
- 李文荣(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事输电线路技术监督工作。
- 王敦青(1983—), 男, 硕士, 主要从事输变电设备外绝缘技术、输电设备运维技术研究。