

引用格式:陈章磊,杨廷方,卓超,等.爪形杆塔接地装置优化雷电冲击散流效果的研究[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):253-261.

Citation: CHEN Zhanglei, YANG Tingfang, ZHUO Chao, et al. Optimization of lightning impulse grounding performance of claw-shaped tower grounding device[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 253-261.

爪形杆塔接地装置优化雷电冲击散流效果的研究

陈章磊, 杨廷方, 卓超, 李高嘉, 冯明浩, 李雄

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 输电线路杆塔易遭受雷击, 杆塔接地电阻值过高时会增加线路故障率。为了有效降低典型接地装置的雷电冲击接地电阻值, 指导输电线路杆塔的接地设计, 提出了一种由典型杆塔基础联合爪形接地体构成的组合接地装置, 在考虑土壤火花效应作用下利用CDEGS软件建立了爪形接地装置模型, 并对其时域冲击特性响应进行了量化比较, 得到了在不同雷电流幅值、土壤电阻率、爪形接地极接入位置、接地极埋深等情况下的爪形接地装置的冲击接地电阻。结果表明, 爪形接地装置在相同环境、材料长度下的散流效果分别比垂直外延、水平外延接地提升了17.23%、18.35%, 在更大限度地降低接地装置冲击接地电阻值的同时还降低了接地装置的铺设难度。

关键词: 杆塔接地; 冲击接地电阻; 爪形接地体; CDEGS; 冲击量化比较; 装置优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.024 中图分类号: TM862 文章编号: 1673-9140(2026)01-0253-09

Optimization of lightning impulse grounding performance of claw-shaped tower grounding device

CHEN Zhanglei, YANG Tingfang, ZHUO Chao, LI Gaojia, FENG Minghao, LI Xiong

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Transmission line towers are prone to lightning strikes. When the grounding resistance of a tower is too high, the fault rate of the line is increased. To effectively reduce the lightning impulse grounding resistance of typical grounding devices and guide the grounding design of transmission line towers, a composite grounding device consisting of a typical tower foundation combined with a claw-shaped grounding body is proposed. A model of the claw-shaped grounding device is established using CDEGS software, and its time-domain impulse response characteristics are analyzed while considering the soil spark effect. Quantitative comparisons of the impulse grounding resistance of the claw-shaped grounding device are conducted under different lightning current amplitudes, soil resistivities, claw-shaped grounding electrode connection locations, and grounding electrode burial depths. The results show that under the same environmental conditions and material lengths, the claw-shaped grounding device improves the lightning impulse grounding performance by 17.23% and 18.35% compared with vertical extended grounding and horizontal extended grounding, respectively. While further reducing the impulse grounding resistance of the grounding device, the installation difficulty of the grounding device is also reduced.

Key words: tower grounding; impulse grounding resistance; claw-shaped grounding body; CDEGS; impulse quantitative comparison; device optimization

输电线路分布广泛且容易遭受雷击, 选择合适的接地装置对输电线路防雷有着非常重要的意义^[1-2]。有效地降低在雷击情况下输电杆塔接地装

置的冲击接地电阻值^[3], 是保证线路安全稳定运行的关键。

随着输电线路所处的天气和土壤环境越来越

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2025-03-10

基金项目: 湖南省创新型省份建设专项基金

通信作者: 杨廷方(1975—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术等研究; E-mail: 2630544839@qq.com

严峻,采用常规复合接地网并不能满足接地网的设计要求,需要采用一定的降阻措施对接地网进行降阻。工程中常利用扩大接地网面积、局部换土、爆破深井接地、接地降阻剂/离子接地系统等方法来降低接地电阻值^[4-6],让接地网的各项参数满足规程要求,保证系统安全稳定运行。但在土壤电阻率较高的环境,由于地形限制,无法通过扩大接地网面积增设接地极,而采用爆破深井接地、局部换土等方式则需要耗费一定的人力、物力^[7-8]。为避免过多地降低接地电阻值而增加大量的投资,本文提出了一种由典型杆塔基础联合爪形接地体构成的组合接地装置,不仅降低了接地装置的铺设难度,而且有效地减小了冲击接地电阻值,优化了典型接地网的散流效果,为在输电线路杆塔接地网面对不同土壤环境时选择合适的接地体结构提供了理论依据^[8]。

本文基于雷电流参数特征数学模型,利用 CDEGS 软件综合考虑了屏蔽效应、火花效应的影响,计算出在不同雷电流幅值和土壤电阻率等条件下爪形接地装置的散流效果。优化散流结构后的爪形接地极能有效拓展冲击散流路径并扩大均匀电压分布范围,为复杂土壤环境下的防雷接地装置设计提供了新的参考方案,对提升杆塔防雷水平有一定的工程应用价值。

1 建立接地系统暂态模型

1.1 接地装置冲击暂态有限元分析

本文采用有限元的方法分析爪形接地装置的冲击暂态响应,先对目标系统进行离散化处理,结合电荷守恒、电磁感应定律及全电流定律等基本原,构建离散化后各个单元域内的电磁场方程,表征瞬态散流过程中接地装置的磁场特性:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_c + j\omega_l D \\ \nabla \times E = -j\omega_l B \\ \nabla \cdot J = 0 \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, H 、 E 、 B 分别为导体磁场强度、电场强度、磁感应强度; J_c 为传导电流密度; D 为电位移矢量; ω_l 为雷击角频率; ∇ 为梯度算子。

另外,接地介质本构方程如下:

$$\begin{cases} D = \epsilon E \\ B = \mu H \\ J = (\gamma + j\omega_l \epsilon) E \end{cases} \quad (2)$$

式中, ϵ 、 μ 、 γ 分别为接地土壤介电常数、磁导率和电导率。

结合式(2),接地装置散流的物理过程可用以下的泊松方程表示:

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + (\gamma + j\omega_l \epsilon)(j\omega_l A + \nabla \varphi) = J_s \\ \nabla \cdot [(\gamma + j\omega_l \epsilon)(j\omega_l A + \nabla \varphi) + J_s] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, J_s 为冲击电流入地点处的电流面密度; A 为矢量磁位; φ 为标量电位。

在单元域中分别选取标量基函数和矢量基函数进行数值近似计算^[9-10],用麦克斯韦方程表示如下:

$$\varphi_i^e(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^4 N_j^e(x_i, y_i, z_i) \varphi_j^e \quad (4)$$

式中, $\varphi_i^e(\cdot)$ 为近似计算结果的矢量函数向量; φ_j^e 为单元 e 的矢量基函数向量; N_j^e 为单元 e 的标量基函数向量; x_i 、 y_i 、 z_i 分别为单位向量的三维分量。

应用伽辽金加权余量法对控制方程进行变分,并借助第一格林公式降阶,即可推导出各剖分单元 e 对应的变分方程:

$$\iiint_{V^e} (\gamma + j\omega \epsilon) (N_i^e \nabla \cdot j\omega A^e - \nabla N_i^e \cdot \nabla \varphi^e) + N_i^e \nabla \cdot J_s dV + \iint_{S^e} N_i^e J \cdot n^e dS = 0 \quad (5)$$

式中, J 为全电流密度; V^e 为单元体积; S^e 为单元外表面; N^e 为外表面法向量; A^e 为单位矢量磁位; φ^e 为矢量函数向量; V 为剖分单元体积; S 为剖分单元面积; n^e 为外表面法向量。

设电流注入点的电流为 I ,且其接地引线切面满足电流连续性条件。基于麦克斯韦方程组可得:

$$\begin{cases} \varphi^+ = \varphi^- \\ (\gamma + j\omega) \nabla \varphi \cdot n = I \end{cases} \quad (6)$$

式中, φ^+ 与 φ^- 分别表示同一点左右两侧的标量电位; n 为电流注入点的单位法向量。

图1展示了在 COMSOL 中搭建的爪形接地极三维模型。

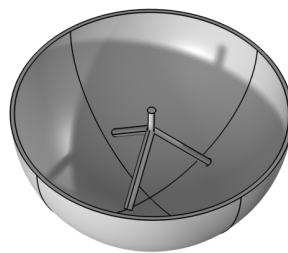


图1 爪形接地极三维模型

Figure 1 Three-dimensional model of claw-shaped grounding electrode

如图 1 所示,首先,土壤介质设置为半球形,用边界层网格化对导体和土壤接触面进行局部细化,提升冲击特性仿真精度;然后,通过无限元映射方法,采用坐标变换算法将无限扩散空间转化为有限计算域;最后,通过建立的数值模型约束雷电流暂态冲击下电磁场分布的计算边界。本文模型选取不同数量的爪形分支,设置每根爪形分支长度相同。接地体材料选择圆钢,导体半径为 0.01 m,电阻率为 $1.92 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$,相对磁导率为 636,接地埋深为 0.8 m。

1.2 考虑土壤非线性电离的方法

当雷电流注入接地装置时,会在接地体周围接触的土壤中感应出瞬变电磁场,其电场强度始终满足:

$$E = \rho J \tag{7}$$

式中, ρ 为接地体所处土壤的真实电阻率。

当雷电流作用于接地极并随之扩散到地下土壤时,高幅值的雷电流会引起土壤内部电流密度和电场强度急剧上升,当场强超过该地表土壤的临界值后,土壤内部将发生击穿放电,出现火花和电弧放电的现象。此时,被击穿的土壤可以近似看作接地导体,其土壤电阻率显著降低^[11-13]。在瞬态冲击电流作用下,接地导体周围的土壤会形成 4 个电离程度不同的区域。

火花放电原理如图 2 所示^[14]。当雷电流作用于接地极时,接地极表面的电流密度和电场强度会迅速上升。此时,将接地导体看作若干小段,当土壤被击穿时,由于流过每段接地导体的电流幅值不同,为简化模型,可近似地认为每段接地导体散流半径有不同程度的增加:

$$r_{eq} = \frac{i_i^L \rho}{2\pi l_i E_c} \tag{8}$$

式中, r_{eq} 为接地导体散流半径; i_i^L 为第 i 段导体的泄漏电流; l_i 为第 i 段导体的长度; E_c 为临界电离场强。

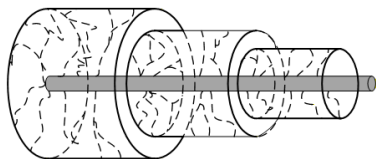


图 2 火花放电原理
Figure 2 Principle of spark discharge

1.3 冲击接地电阻的计算原理

接地体在受到雷电流冲击后,其周围的电场呈暂态特性响应。本文将接地体的冲击接地电阻

$R_e^{[15]}$ 定义为

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \tag{9}$$

式中, U_e 为接地体对地电位峰值; I_e 为接地体流入地中冲击电流峰值。

仿真计算时,先通过 CDEGS 的 FFTSES 模块设置雷电流波形,并通过正向快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)将雷电流 $I(t)$ 转换成频域响应:

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) e^{-i\omega t} dt \tag{10}$$

同时,在建立好的 MALZ 模块中注入相同幅值的雷电流,设置相同电阻率的均匀土壤环境,保证仿真数据统一,再点击运算,得到接地装置导体段的等效半径;在 HIFREQ 中建立接地装置模型,设置相同的雷击侵入点,并选取冲击雷电流所有的频率数值,计算接地体在各频率下的冲击响应。最后,利用傅里叶变换得到时域冲击响应:

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(\omega) I(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{11}$$

式中, $U_0(\omega)$ 为频域响应下的标量电势; ω 为输入电流的角频率。

2 爪形杆塔接地装置

2.1 爪形接地极

随着电网系统规模的逐步扩大,我国架设的防雷接地杆塔在面对不同的土壤环境以及不同的地理环境时,采用传统典型接地网很难满足其降阻标准^[16-17]。在原有杆塔接地体上增加射线的长度,可以扩大水平接地网的面积,但是要求该区域有一定的水平铺设面积,不适用于土地资源紧张的地区;而采用垂直接地体降阻虽然能在一定程度上降低冲击接地电阻,但在面对一些复杂地域环境时,作用却没那么明显。爪形接地体能在水平接地面积有限的同时,通过改变与水平地面的倾斜角来应对不同的接地环境,从而更好地增强接地装置的散流效果。爪形接地体如图 3 所示,其中 λ 表示单根爪形接地极的长度, θ 表示爪形接地极的角度。

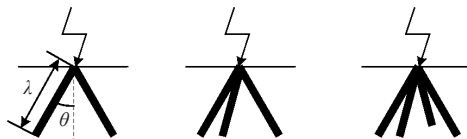


图 3 爪形接地体
Figure 3 Claw-shaped grounding body

本文考虑接地极间的屏蔽效应,以3根对称倾斜接地极构成的爪形接地极为基础进行研究,而对于爪形接地体的实际选择,本文通过仿真及理论分析,分别研究了在不同土壤电阻率、不同倾斜角度、不同接地极位置和埋深下的爪形接地装置的最优结构。

2.2 爪形杆塔接地装置

为深入探究爪形接地极的散流效果,本文以钢筋混凝土杆放射型接地装置为基础,为其4条射线增设爪形接地极,组成爪形杆塔接地装置,如图4所示。

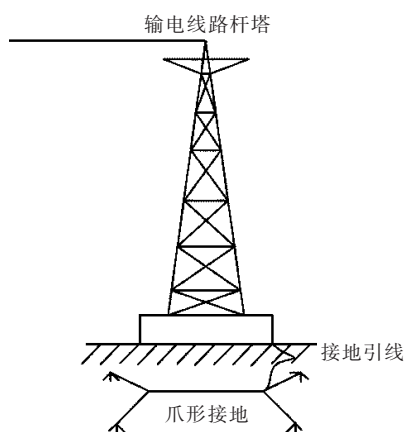


图4 爪形杆塔接地装置

Figure 4 Claw-shaped tower grounding device

2.3 模型验证

在各接地计算软件中,CDEGS软件凭借其频域与时域转换能力,能够在相对较少的频率数值以及频率响应下得到暂态时域解,不仅大幅降低了计算难度,还能有效处理复杂土壤结构下的冲击接地特性。本文通过冲击散流实验,证明了仿真计算数据的准确性。

以文献[18]中的冲击实验为例,本次冲击特性模拟实验包括冲击电流发生器、数字示波器以及相关接线,其中冲击电流发生器可输出8/20 μs冲击雷电流波形,幅值范围为5~30 kA,数字示波器可实时捕获实验注入端电压波形与回路的电流波形,计算注入端电压与回路电流的峰值比,并将其作为衡量实验接地装置的冲击接地特性的依据。冲击模拟实验原理如图5所示。

冲击模拟实验使用长为0.35 m、半径为3 mm、接地材料电阻率为 $1.92 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 、相对磁导率为636的圆钢,埋深0.2 m,实验土壤电阻率为 $310 \Omega \cdot \text{m}$ 。图6展示了冲击电流结果对比。

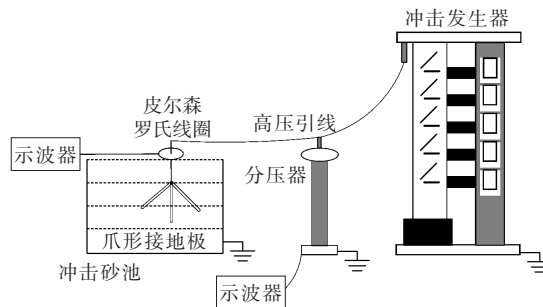


图5 冲击模拟实验原理

Figure 5 Principle of impulse simulation experiment

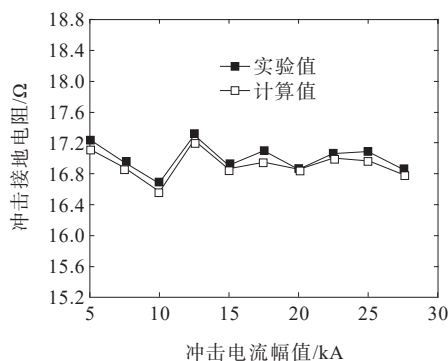


图6 冲击电流结果对比

Figure 6 Comparison of impulse current results

3 爪形接地装置降阻效果的优化研究

接地装置能在电力系统突然发生故障时,十分迅速地故障电流排泄入地。基于接地极间电感效应与屏蔽效应的影响,不同的倾斜角度将直接导致接地极间的距离不同,也会导致接地装置的散流效果有所不同。爪形接地极相较于水平、垂直接地极,其优势在于能在一个接入点上装设多个倾斜对称接地体,既能扩大接地体的有效散流体积,也能同时改善接地装置的冲击特性。当高频雷电流流过接地装置时,接地装置会在一定程度上受到屏蔽效应和电感效应的影响^[19]。本文利用CDEGS软件对爪形接地装置进行模型搭建,通过对比不同的结构和参数,以爪形接地装置的冲击降阻效果为主要参考进行了优化研究^[20-22]。

3.1 不同爪形接地极敷设角度对降阻效果的影响

由图2可知,爪形接地极的倾斜角度 θ 是爪形接地极的变量之一,有必要对其进行深入研究。为探究在不同的敷设角度下爪形接地装置的冲击散流效果,本文以总长度为80 m的水平接地网作为基础,取2.6/50 μs标准雷电流,水平接地网埋深0.8 m,3种爪形接地极埋深都为2 m,接地体材料为圆钢,

在 CDEGS 软件中建立模型,仿真计算出冲击接地电阻,并将其作为主要参考量。根据当前提出的“有效体积”这一概念^[22-23],本文分别选取 30°、45°、60°的爪型接地极进行散流效果的分析。

3.1.1 不同雷电流幅值对爪形接地极降阻效果的影响

中国的土壤电阻率处于 100~2 500 Ω·m 范围,因此本文选择土壤电阻率为 2 000 Ω·m、总长度为 80 m 的水平接地网作为研究基础,取 2.6/50 μs 标准雷电流。不同雷电流幅值下的冲击接地电阻如表 1 所示。

表 1 不同雷电流幅值下的冲击接地电阻

Table 1 Impulse grounding resistance under different lightning current amplitudes

雷电流幅值/ kA	接地电阻 /Ω		
	倾斜角 30°	倾斜角 45°	倾斜角 60°
5	44.40	42.54	39.06
10	44.39	42.48	39.03
20	44.51	42.56	39.10
30	44.49	42.54	39.06
50	44.42	42.38	39.02
80	44.38	42.33	38.95

由表 1 可知,在不同雷电流幅值冲击下,各个倾斜角度下的爪形接地极冲击接地电阻变化在 3% 以内。因此,可以得出不同雷电流幅值对不同倾斜角的爪形接地极冲击特性的影响基本可以忽略不计,且在倾斜角为 60°时爪形接地装置的散流效果最好。

3.1.2 不同土壤电阻率下 3 种爪形接地极降阻的效果对比

上述分析表明,雷电流幅值的变化对同一爪型接地装置的散流效果影响甚微。鉴于此,为评估不同接地装置的性能,本文对比了在相同雷电流幅值下,3 种爪型接地装置在不同土壤电阻率下的冲击接地电阻,如表 2 所示。对表 2 的仿真数据进行插值拟合,可以得到在各个土壤电阻率下的冲击接地电阻变化曲线,如图 7 所示。

由表 2 和图 7 可知,在土壤电阻率小于 100 Ω·m 时,装置倾斜角为 45°的散流效果最好,即冲击接地电阻最小;当土壤电阻率为 100~200 Ω·m 时,装置倾斜角为 30°的散流效果最好;当土壤电阻率超过 300 Ω·m 时,装置倾斜角为 60°的散流效果最好,说明爪形接地极降阻效果受敷设角度的影响较大。

表 2 不同土壤电阻率下的冲击接地电阻

Table 2 Impulse grounding resistance under different soil resistivities

土壤电阻率/ (Ω·m)	接地电阻/Ω		
	倾斜角 30°	倾斜角 45°	倾斜角 60°
10	1.72	1.71	1.97
50	3.07	3.06	3.99
100	4.35	4.42	5.03
200	6.27	6.42	6.53
400	9.91	9.84	9.42
500	11.91	11.58	10.91
1 000	22.46	21.30	19.88
2 000	44.39	42.38	39.06

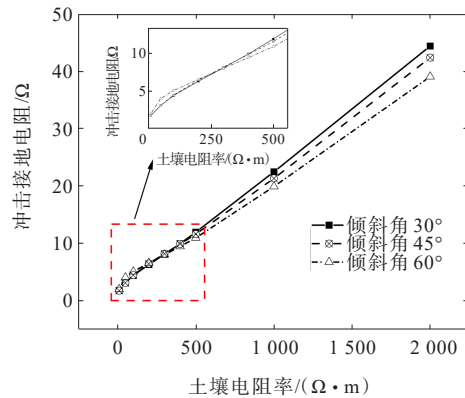


图 7 冲击接地电阻变化曲线

Figure 7 Variation curves of impulse grounding resistance

3.2 不同爪形接地极的接入位置对降阻效果的影响

使用多个爪形接地极时,各爪形接地极和水平接地极之间相互影响,往往会产生一定的屏蔽效应,因此可探究最佳接地极位置,以有效利用爪形接地极。不同位置布置的爪形接地极如图 8 所示。

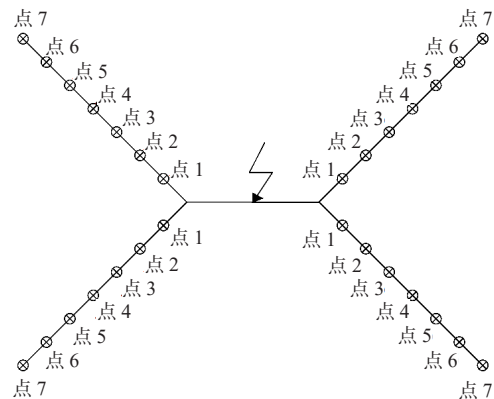


图 8 不同位置布置的爪形接地极

Figure 8 Arrangement of claw-shaped grounding electrodes at different positions

由图8可知,4个爪形接地极的位置通过等距向外布设,单根射线全长17.5 m,相邻连接点的间距为2.5 m,不同位置的爪形接地极的接地电阻比较如表3所示。

表3 不同位置的爪形接地极的接地电阻比较

Table 3 Comparison of grounding resistance of claw-shaped grounding electrodes at different positions

爪形接地极位置	接地电阻/ Ω		
	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率
	$500 \Omega \cdot m$	$1\ 000 \Omega \cdot m$	$2\ 000 \Omega \cdot m$
点1	12.67	24.49	48.53
点2	12.34	23.84	47.22
点3	12.03	23.13	45.79
点4	11.79	22.47	44.46
点5	11.56	21.79	43.07
点6	11.38	21.23	41.90
点7	10.91	19.88	39.06

由图8和表3可知,随着爪形接地极位置从点1移动到点7,冲击接地电阻会随着爪形接地极的外移而逐渐减小,即当爪形接地极布置在最外端时,

表4 不同接地极埋深下3种爪形接地极的接地电阻比较

Table 4 Comparison of grounding resistance of three types of claw-shaped grounding electrodes under different burial depths

接地极埋深/m	接地电阻/ Ω								
	倾斜角 30°			倾斜角 45°			倾斜角 60°		
	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率	土壤电阻率
	$500 \Omega \cdot m$	$1\ 000 \Omega \cdot m$	$2\ 000 \Omega \cdot m$	$500 \Omega \cdot m$	$1\ 000 \Omega \cdot m$	$2\ 000 \Omega \cdot m$	$500 \Omega \cdot m$	$1\ 000 \Omega \cdot m$	$2\ 000 \Omega \cdot m$
1	12.74	24.41	48.35	12.45	23.70	46.89	12.06	22.81	45.10
2	11.91	22.46	44.39	11.54	21.56	42.54	10.91	19.88	39.06
3	11.23	20.83	41.05	10.39	19.47	38.25	10.36	17.81	34.68
4	10.67	19.20	37.69	10.39	18.04	35.21	10.05	16.36	31.40
5	10.32	18.29	34.16	9.95	17.13	29.21	9.87	15.35	28.59

接地极埋深和接地极总长度的关系为

$$L_D = \frac{12h}{\cos \theta} \tag{12}$$

式中, L_D 为加入爪形接地极的总长度; h 为接地极埋深; θ 为爪形接地极的倾斜角度。

爪形接地极单位长度降阻率定义为

$$\eta = \frac{R_{yh1} - R_{yh2}}{L_D} \tag{13}$$

式中, η 为单位长度降阻率; R_{yh1} 为未加入爪形接地极的冲击接地电阻; R_{yh2} 为加入爪形接地极后的冲

击接地电阻。在土壤电阻率固定为 $2\ 000 \Omega \cdot m$ 时,不同埋深情况下3种爪形接地极的单位长度降阻率如表6所示。

3.3 不同埋深位置对爪形接地极降阻效果的影响

在不同雷电流幅值、不同土壤电阻率和不同接入位置下,倾斜角为 60° 的爪形接地极最外侧接入位置的降阻效果最好。为了进一步研究爪形接地装置在不同埋深下的最佳散流效果,本文保持爪形接地极角度为定值,分别研究了在爪形接地极倾斜角度为 30° 、 45° 、 60° 时,改变爪形接地装置的埋深,即接入爪形接地极长度变化时的冲击接地电阻,结果如表4所示。

倾斜角为 60° 的爪形接地极在不同接地极埋深下的接地电阻如表5所示。由表5可知,在土壤电阻率低于 $200 \Omega \cdot m$ 时,由于受接地极间的屏蔽效应影响,接地极埋深的增加没有降低冲击接地电阻,反而降低了接地装置的降阻效果,而当土壤电阻率高于 $200 \Omega \cdot m$ 时,增加接地极的埋地深度,冲击接地电阻也随之减小,说明高土壤电阻率下的降阻效果更好。

图9展示了3种爪形接地极单位长度降阻率。由图9可知,随着接地极埋深(即接地极长度)增加,3种爪形接地极的单位长度降阻率都呈现下降趋势,因此在保证冲击响应各数值都达标的前提下,布设倾斜角度更小的爪形接地极更具经济性。

表 5 倾斜角为 60°的爪形接地极在不同接地极埋深下的接地电阻

Table 5 Grounding resistance of 60° claw-shaped grounding electrode at different burial depths

土壤电阻率/($\Omega \cdot m$)	接地电阻/ Ω				
	接地极埋深 1 m	接地极埋深 2 m	接地极埋深 3 m	接地极埋深 4 m	接地极埋深 5 m
10	1.72	1.97	1.97	1.96	1.96
50	3.31	3.34	4.01	4.01	4.01
100	4.35	5.03	5.06	5.08	5.12
200	6.60	6.53	6.45	6.41	6.36
300	8.12	7.99	7.83	7.71	7.56
400	10.02	9.42	9.12	8.90	8.65
500	12.06	10.91	10.36	10.06	9.67
1 000	22.81	19.88	17.81	16.36	15.35
2 000	45.09	39.06	34.68	31.39	28.59

表 6 3种爪形接地极的单位长度降阻率

Table 6 Resistance reduction per unit length of three types of claw-shaped grounding electrodes

接地极埋深/m	单位长度降阻率/($\Omega \cdot m^{-1}$)		
	倾斜角 30°	倾斜角 45°	倾斜角 60°
1	0.41	0.42	0.38
2	0.35	0.34	0.31
3	0.31	0.31	0.27
4	0.29	0.28	0.24
5	0.27	0.26	0.21

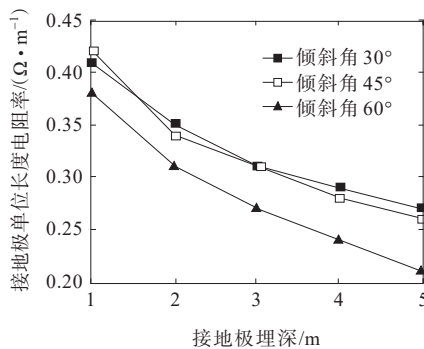


图 9 3种爪形接地极单位长度降阻率

Figure 9 Resistance reduction per unit length of three types of claw-shaped grounding electrodes

3.4 爪形接地与水平接地、垂直接地的降阻效果比较

本文基于典型杆塔接地装置,在点 7 位置分别外接相同材料、用量的 3 种接地措施——水平外延、垂直外延和爪形接地外延,其降阻效果比较如图 10 所示。

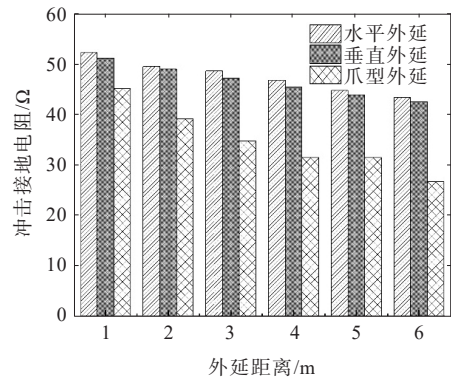


图 10 爪形接地与水平、垂直接地的降阻效果比较

Figure 10 Comparison of resistance reduction effect between claw-shaped grounding and horizontal and vertical grounding

由图 10 可知,以总长为 80 m 的接地装置为基础,3 种爪形接地极在相同外接位置和相同外延距离下,爪形接地极得到的冲击接地电阻最小,散流效果最好,并且随着外延距离的增加,其散流效果也随之加强。在外延距离为 0~6 m 时,爪形外延分别比垂直外延和水平外延最高提升了 17.23%、18.35% 的降阻效果。

4 结语

本文提出了一种由典型杆塔基础和联合爪形接地体构成的组合接地装置,可以在复杂的环境下达到不错的散流效果,并减小了接地体的敷设难度,极大程度地利用了现有的土壤空间。

在相同雷电流幅值下,由于受接地极间屏蔽效应的影响,不同角度下的爪形接地装置的散流效果会发生变化。本文通过研究不同倾斜角度的爪形接地极发现,倾斜角为 60°的爪形接地装置的散流效果最好;外接爪形接地极时,将其设置在接地装置外引射线的末端时,整个装置的降阻效果最优。

随着爪形接地极埋深的增加,其单位长度降阻率呈现下降趋势,且在相同接地环境下,爪形接地极降阻效果明显优于垂直、水平接地极,并随着外延距离的增加,散流效果差距增大。在外延距离为 0~6 m 时,爪形外延分别比垂直外延和水平外延平均提升了 17.23%、18.35% 的散流效果。

参考文献:

[1] 杨帅,邹建明,喻剑辉,等.输电线路与引雷塔雷电监测与雷电流波形分析[J].高电压技术,2013,39(6):1536-1540.
YANG Shuai, ZOU Jianming, YU Jianhui, et al.

- Monitoring and analysis of lightning current waveform observed on transmission line and lightning tower[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1536-1540.
- [2] 李瑞芳, 陶鑫, 杨雪, 等. 山区典型地形雷击地闪密度分布差异研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 107-113.
LI Ruifang, TAO Xin, YANG Xue, et al. Study on distribution difference of lightning ground flash density in typical mountainous terrain[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 107-113.
- [3] 袁涛, 雷超平, 司马文霞, 等. 提高接地极散流效率的冲击接地降阻分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 278-284.
YUAN Tao, LEI Chaoping, SIMA Wenxia, et al. Analysis of grounding resistance reduction effect based on enhancing impulse current leakage efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 278-284.
- [4] 魏光. 牵引变电所主接地网设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 181-187.
WEI Guang. Study on the design of a main grounding grid in a traction substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 181-187.
- [5] 胡元潮, 李腾, 安韵竹, 等. 输电线路杆塔分布式辅助接地网散流与结构优化研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 88-94.
HU Yuanchao, LI Teng, AN Yunzhu, et al. Study on distributed auxiliary grounding grid for transmission lines tower and its structure optimization[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(5): 88-94.
- [6] 马成廉, 姚新岳, 宋萌清, 等. 计及高频雷电流下变电站接地网对周边燃气管网系统及新建地网系统阻性耦合影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 166-175.
MA Chenglian, YAO Xinyue, SONG Mengqing, et al. Analysis of the impact of substation grounding network on the resistive coupling of the surrounding gas pipeline system and the newly built grounding system under high frequency lightning currents[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 166-175.
- [7] 聂沛, 王生富, 蒋玲, 等. 高土壤电阻率条件下输电线路杆塔组合接地装置性能及优化研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(9): 1443-1452.
NIE Pei, WANG Shengfu, JIANG Ling, et al. Study on the performance and optimization of combined grounding devices for transmission line towers under high soil resistivity conditions[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2025, 58(9): 1443-1452.
- [8] 邢鹏翔, 鲁海亮, 童雪芳, 等. 土壤特性对变电站地网冲击接地电阻的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 223-228+235.
XING Pengxiang, LU Hailiang, TONG Xuefang, et al. Research on influence of soil characteristics on impulse grounding resistance of substation grounding grid[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 223-228+235.
- [9] 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.
- [10] 务孔永, 惠康, 张国锋, 等. 基于模拟实验与有限元仿真的针刺式接地体接地特性研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(5): 105-111.
WU Kongyong, HUI Kang, ZHANG Guofeng, et al. Research on grounding characteristics of needle-shaped earthing electrode based on simulation experiment and finite element simulation[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(5): 105-111.
- [11] 张牧桑, 冯子阳, 汤昕, 等. 连续雷电冲击下杆塔导电混凝土基础的热效应分析[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 249-254.
ZHANG Musang, FENG Ziyang, TANG Xin, et al. Thermal effect analysis of tower conductive concrete foundation under continuous lightning strike[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 249-254.
- [12] 朱彬, 司马文霞, 袁涛, 等. 基于地中电场分布的针刺式接地装置结构参数优化[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2907-2914.
ZHU Bin, SIMA Wenxia, YUAN Tao, et al. Structure parameter optimization of grounding device with needle-shaped conductors based on electric field distribution in soil[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2907-2914.
- [13] 吴泳聪, 阮江军, 夏军, 等. 考虑火花效应的接地装置冲击散流特性有限元计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 104-110.
WU Yongcong, RUAN Jiangjun, XIA Jun, et al. Finite element analysis on impulse current dispersing characteristics of grounding devices considering spark effect[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 104-110.
- [14] CAO X B, WEI M, WANG M X, et al. Evaluation principle and method of horizontal grounding electrode based on time-varying impedance[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2021, 15(2): 174-183.
- [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. Grounding technology for power systems[M]. Beijing: Science Press, 2007.

- [16] SENGAR K P, CHANDRASEKARAN K. Transient behaviour of grounding systems in multilayer soil under lightning strikes[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 104(3): 1205-1218.
- [17] SOLDO A, ŠESNIĆ S. Analytical solution for the transient current induced along the vertical grounding electrode[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022: 8501420.
- [18] 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.
- [19] 齐飞, 陈俊武, 刘承胜, 等. 考虑端头效应与屏蔽效应的集中接地装置冲击降阻方法[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1995-2001.
QI Fei, CHEN Junwu, LIU Chengsheng, et al. Impulse resistance reduction method of concentration grounding devices considering end effect and shield effect[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1995-2001.
- [20] 高峰, 刘阳, 郭洁, 等. 单根伸长接地体的冲击特性与仿真模型的研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(4): 148-152+158.
GAO Feng, LIU Yang, GUO Jie, et al. Research on impulse characteristics and simulation model of single extended grounding electrode[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(4): 148-152+158.
- [21] 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 Zhaohua, LI Zhizhong, et al. Transient characteristics measurement of transmission line towers under artificial impacts[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(8): 3291-3297.
- [22] 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.
- [23] GRCEV L D, MARKOVSKI B, TODOROVSKI M. Lightning performance of multiple horizontal, vertical and inclined grounding electrodes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37: 3782-3791.