

三维交错结构短导体在输电杆塔接地装置中的应用方法

杨 泰¹, 杨 鑫¹, 刘宇彬², 朱子茵¹, 谢 焯¹, 周 秀³

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410114;2.湖南经研电力设计有限公司,湖南长沙 410014;

3.国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏银川 750001)

摘要:降低杆塔的冲击接地电阻是提高输电线路反击耐雷水平的有效措施,而目前的各种降阻方法普遍存在技术经济性及施工难度难以兼顾的问题。在接地体上添加短导体,兼具降阻和施工简便的优势。为此,研究利用三维交错结构短导体降低杆塔冲击接地电阻的方法,并给出短导体的参数优化方法。首先,考虑土壤非线性电离影响在内,采用CDEGS软件对添加短导体接地装置时的冲击接地电阻进行计算,计算结果表明三维交错结构短导体具有更好的降阻效果;然后,以单位长度降阻率和最小冲击接地电阻为指标,对三维交错结构短导体的长度和间隔进行参数优化;最后,以 $1000\Omega\cdot\text{m}$ 土壤电阻率为例,求得短导体的最优长度和最优间隔分别为1.1、2.8 m,添加三维交错结构短导体的接地装置可降低16.52%的冲击接地电阻。研究结果可为输电杆塔接地装置的设计提供方法指导。

关键词:三维交错结构短导体;接地优化设计;杆塔接地装置;降阻;CDEGS软件

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.027 中图分类号: TM862 文章编号: 1673-9140(2023)06-0259-08

Application of three-dimensional interleaved short conductors in transmission tower grounding device

YANG Tai¹, YANG Xin¹, LIU Yubin², ZHU Ziyin¹, XIE Yang¹, ZHOU Xiu³

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Hunan Economic Research Electric Power Design Co.,Ltd., Changsha 410014, China; 3.Electric Power Research

Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co.,Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: Reducing the impulse grounding resistance of transmission towers is an effective measure to improve the lightning surge withstand capability of transmission lines. However, current methods for reducing resistance generally face challenges in balancing technical and economic feasibility, as well as construction difficulty. Adding short conductors to the grounding device combines the advantages of resistance reduction and simplified construction. This paper explores the use of three-dimensional interleaved short conductors to reduce the impulse grounding resistance of transmission towers, and provides the parameter optimization approach for short conductors. Firstly, considering the influence of nonlinear ionization in the soil, the impulse grounding resistance of grounding device with short conductors is calculated by the CDEGS software. Results indicate that the short conductors with three-dimensional interleaved structure exhibit superior resistance reduction effects. Subsequently, taking the resistance reduction rate per unit length and minimum impulse grounding resistance as indicators, the length and spacing arrangements of three-dimensional interleaved short conductors

收稿日期:2022-01-25;修回日期:2022-03-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52177015)

通信作者:杨 鑫(1983—),男,博士,副教授,主要从事电力系统过电压及其防护和低温高压绝缘技术的研究;E-mail:yan_19830713@163.com

are optimized. Finally, taking a soil resistivity of $1000 \Omega \cdot \text{m}$ as an example, the optimal length and spacing of the short conductors are determined to be 1.1 m and 2.8 m, respectively. The addition of the three-dimensional interleaved structure short conductors to the grounding device can reduce the impulse grounding resistance by 16.52%. This paper provides a method guidance for the design of transmission tower grounding device.

Key words: three-dimensional interleaved short conductors; grounding optimization design; tower grounding device; reduce resistance; CDEGS software

输电杆塔接地装置的主要作用是在线路遭受雷击后将雷电流在大地中扩散泄导,提高线路的反击耐雷水平^[1-2]。将输电杆塔接地装置的冲击接地电阻降低对构建安全电力输电系统至关重要^[3-4]。

降低输电杆塔冲击接地电阻的方法一直是国内外关注的焦点,主要包括杆塔基础自然接地^[5-6]、外引接地^[7-8]、石墨接地体加接地布^[9-10]以及新型降阻剂^[11-12]等方法。杆塔基础需要浇筑混凝土以起到加固作用,但混凝土的电阻率较高,因此,塔基础自然接地的可行性还需进一步的研究。外引接地是将部分接地体引至场外土壤电阻率低的地区来降阻,但外敷距离过长易产生接地体间电位差,会引发一系列安全问题。石墨由于材质受限,不能保证高温下稳定工作,需要考虑温升的影响;新型降阻剂是将电解质或固体粉末作为导电材料灌注在接地装置旁,实际使用中受气候的影响。这些方法都存在降阻效果和经济效益难以兼顾的问题。

已有研究结论证明,在接地导体上添加若干短导体可有效降低冲击接地电阻^[13-17]。相较于其他形式的接地装置,添加短导体的接地装置兼具降阻、施工简便的优势。若能够充分利用短导体,则将为杆塔接地装置的施工和成本带来较好的经济效益。

文献[13]通过冲击接地模拟实验,得到短导体位于单根水平接地极中部时,相较于端部冲击散流更均匀、短导体位置不变而其长度增加时使得冲击接地电阻降低等结论;文献[14]对水平和星型接地体进行模拟实验,考虑导体间的屏蔽效应,用短导体改善电场分布,以此来降低冲击接地电阻;文献[15]采用多物理场耦合有限元分析的方法,研究接地体附近土壤火花放电的区域,对短导体的参数进行优化,为接地装置的结构优化提供参考。目前,对短导体的安装大多采用水平安装方式。文献[16]中提及过三维交错结构短导体,但未对短导体的结构参数进行优化,其技术经济效益没有充分发挥。

综上所述,为了更充分地发挥短导体的降阻效

果,本文考虑土壤非线性电离的影响,给出一种利用三维交错结构短导体降低杆塔冲击接地电阻的方法。利用CDEGS接地计算软件对其降低冲击接地电阻的效果进行计算,定义单位长度降阻率来保证短导体的技术经济效益;对短导体的参数进行优化,使之在技术、经济性方面发挥最大作用,为降低输电杆塔冲击接地电阻提供新方法。

1 采用CDEGS软件计算冲击接地电阻的方法

短导体的降阻效果主要体现在降低输电杆塔基地装置的冲击接地电阻方面,因而,计算接地装置的冲击接地电阻是本文展开进一步研究的前提。

1.1 CDEGS计算冲击接地电阻的原理

当雷电流流经接地装置时,其周围的电场呈暂态特性响应。在CDEGS软件仿真计算时,利用FFTSES模块先通过正向Fourier变换,将雷电流的时域响应转换成频域响应:

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

然后利用FFTSES模块通过反向Fourier变换得到时域下的特征量,即

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

式中, $U_0(\omega)$ 为未经调制频域下的标量电势。

工程使用中令冲击接地电阻为

$$R_i = U_m / I_m \quad (3)$$

式中, U_m 为接地装置雷电流注入点处电压峰值; I_m 为雷电流的峰值。

1.2 考虑土壤非线性电离的冲击接地电阻的计算方法

雷电流流经接地装置泄入土壤时会使得接地导体周围土壤形成较大的电场,当导体周围土壤的电场强度大于土壤发生火花放电的临界场强 E_c 时,土壤将发生电离。因电离区域的土壤电阻率较低,故

将其等效为接地导体的半径扩大^[18]。

在 CDEGS 软件中,为了更加准确地计算冲击接地电阻,需要进一步考虑雷电流入地时的土壤非线性电离的影响。首先将导体均匀分段,如图 1 所示,利用 CDEGS 软件计算每段导体的漏电流。每段导体的等效半径^[19]为

$$r_{eq} = \frac{\rho I}{2\pi l E_c} \quad (4)$$

式中, l 为每段导体的长度; ρ 为土壤电阻率; I 为每段导体的漏电流; E_c 取 300 kV/m ^[20]。

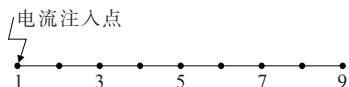


图 1 分段导体

Figure 1 Diagram of sectional conductor

然后计算经过半径等效后导体的漏电流,再次得到每段导体的等效半径,反复迭代计算至前、后等效半径的差值趋于稳定,本文以 0.1 倍的导体半径为阈值。通过对等效半径的计算,考虑了雷电流入地时土壤非线性电离的影响,优化了冲击接地电阻的计算。

1.3 CDEGS 计算冲击接地电阻的准确性验证

以文献[21]中的冲击特性试验为例,该试验采用冲击电流发生器以及信号接收装置得到冲击电流波形、电流注入点的电压波形。电压、电流波形峰值的比值即为冲击接地电阻。试验现场如图 2 所示;采用电位降远离法测量冲击接地电阻,试验测量接线如图 3 所示。

接地装置参数:导体半径为 6 mm 的圆钢材料 ($\rho=1.92 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}, \mu=636$),埋深为 0.8 m, a 为 6 m, l 为 35 m,土壤电阻率为 $150 \Omega \cdot \text{m}$ 。采集到的雷电流波形及电流注入点的响应如图 4 所示,雷电流的峰值为 20.3 kA,电流注入点产生的电压响应的峰值为 55.42 kV,得到的冲击接地电阻的阻值为 2.73Ω 。

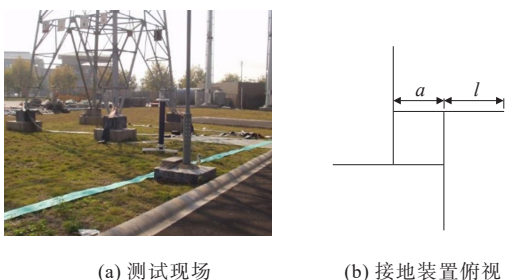


图 2 接地电阻测试试验布置

Figure 2 Grounding resistance testing experiment arrangement

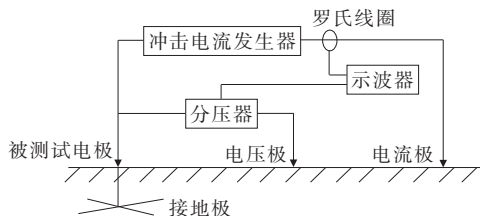


图 3 冲击接地电阻测量试验接线示意

Figure 3 Schematic diagram of wiring for impulse grounding resistance measurement test

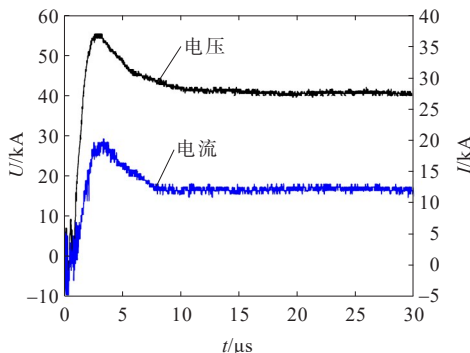


图 4 数据采集结果

Figure 4 Data collection results

在 CDEGS 中搭建试验接地装置仿真模型(图 2(b)),注入幅值为 20 kA 的雷电流,雷电流采用 $(2.6/50) \mu\text{s}$ 的双指数波,仿真得到雷电压的峰值为 55.53 kV,如图 5 所示。因此,考虑火花效应时的冲击接地电阻为 2.78Ω 。

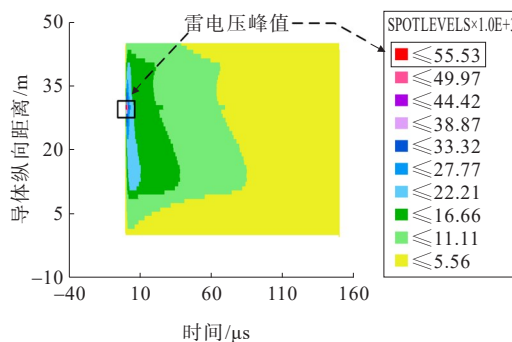


图 5 雷电压分布

Figure 5 Lightning voltage distribution

考虑火花效应后仿真计算与现场测量结果误差仅为 1.8%,CDEGS 软件能够较为准确地反映接地装置的冲击特性,计算结果具有充分的可靠性。

2 短导体接地装置

2.1 短导体的形式和降低冲击接地电阻的原理

短导体相较于水平接地体长度较短,其布置方

式可分为水平、垂直和三维交错布置,如图6所示。

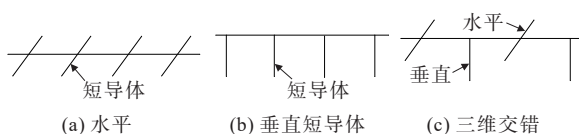


图6 三维交错布置短导体

Figure 6 Horizontal, vertical, and three-dimensional interleaved arrangement of short conductors

当雷电流通过接地装置泄入土壤时,由于端部效应,其更倾向于通过接地导体两端向大地泄放^[22-24],因此,接地导体端部附近土壤中的电场强度相较于导体中部更易超过火花放电的临界场强。端部效应导致接地导体的中部利用率不高,不利于散流,因此,在接地导体上添加若干短导体,相当于给接地体添加“端部”,提高了接地体中部的利用率并使其散流更均匀,以此来降低冲击接地电阻。

2.2 短导体的冲击接地电阻降阻效果对比

利用接地计算软件CDEGS计算不同布置结构短导体的冲击接地电阻。将短导体视为水平接地极或垂直接地极,当接地装置由较多水平接地极或垂直接地极组成时,垂直接地极的间距不应小于其长度的2倍,水平接地极的间距不宜小于5 m^[25]。

为了对比不同布置结构对冲击接地电阻的影响,在长20 m的水平接地体上,从导体末端添加短导体,水平与垂直布置结构均按5 m的间距均匀布置4根等长度为1.5 m的短导体;三维交错布置结构的水平与垂直短导体之间的间隔为2.5 m,共计8根短导体。水平接地体埋深为0.8 m,水平接地体、接地引下线和短导体均采用直径为14 mm的圆钢材料。

在CDEGS的SESCAD中搭建文2.1中的接地体仿真模型,设置好土壤电阻率后在导体首端注入20 kA的雷电流,雷电流采用(2.6/50) μs的双指数波。将接地导体分段后得到每段导体的等值半径,利用CDEGS求出冲击电压的峰值。

根据文1.2中的计算方法,在不同土壤电阻率下,计算添加短导体后接地装置的冲击接地电阻,如图7所示,可知相较于其他2种短导体安装方式,三维交错结构的短导体安装方式降阻效果最好,其冲击接地电阻最低。当土壤电阻率为1 000 Ω·m时,添加三维交错结构短导体比无短导体接地装置

的冲击接地电阻降低16.52%;当土壤电阻率为3 000 Ω·m时,添加三维交错结构短导体比无短导体水平接地装置的冲击接地电阻降低17.30%。可见,土壤电阻率越高,三维交错结构短导体的冲击接地电阻降阻效果越明显。因此,本文在短导体的形式上选择三维交错结构短导体作为研究对象。

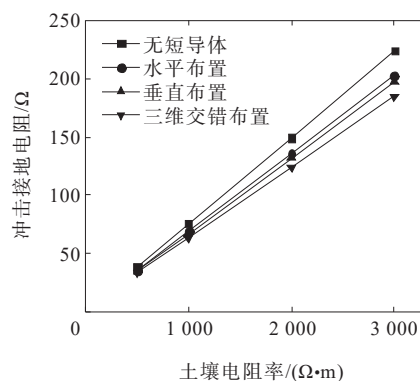


图7 不同布置方式下的冲击接地电阻

Figure 7 Impulse grounding resistances under different short conductors arrangements

3 三维交错结构短导体接地装置的参数优化

本文在优化短导体的设计中采用2个前提:①短导体与水平接地体之间的夹角都呈90°(根据前期仿真结果和相关文献,均表明90°夹角最利于散流,因而该参数就作为确定参数);②短导体按照均匀长度和间隔的方式进行布置。目前,在相关接地设计和文献中^[13-17],短导体的布置都是按照等长度、等间隔的方式,长度、间隔不等的短导体设计因素较多,在实际施工中更加复杂,不便于工程设计和施工。基于这2个前提,对三维交错短导体的长度和间隔进行优化。

为实现短导体与水平接地体的安装匹配,短导体的半径不宜改动,与水平接地体的半径保持一致,因此短导体的半径设为定值。而其长度和间隔在结合经济性和施工难度的基础上可以在一定范围内变动,同时,短导体的长度和间隔与冲击接地电阻之间呈非线性关系。因此,通过优化短导体的长度和间隔,可以使其发挥更好的技术经济效益。

3.1 三维交错结构短导体长度的优化方法

3.1.1 优化方法

随着接地体上短导体长度的增加,接地装置的冲击接地电阻降低。但短导体作为辅助降阻元件,其长度不宜过长,过长的长度使得雷电流主要从短导体泄入到土壤中,降低了水平接地体的利用率。因此,本文提出以单位长度降阻率为指标,优化短导体的长度。基于 CDEGS 的短导体长度的计算方法如下。

1) 在给定土壤电阻率下,通过仿真计算得到短导体的长度与冲击接地电阻的关系曲线图。

2) 为使添加短导体的接地装置具有最优化的技术经济效益,本文采用单位长度的降阻率作为选取短导体长度的依据。定义单位长度降阻率为

$$\eta = \frac{R_1 - R_x}{R_1 \cdot \sum_{i=1}^n L} \times 100\% \quad (5)$$

式中, R_1 为未添加短导体的水平接地体的冲击接地电阻; R_x 为添加短导体后接地装置的冲击接地电阻; L 为单根短导体的长度; n 为短导体的总根数。

3) 在给定土壤电阻率下,由式(5)计算得到短导体单位长度降阻率随短导体长度的变化规律,分析数据后得到现场土壤电阻率条件下的短导体最佳长度。

3.1.2 计算实例

在 CDEGS 的 SESCAD 中搭建接地体仿真模型,如图 8 所示。考虑土壤电阻率为 $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ 的情况,从导体末端添加短导体,水平与垂直短导体之间的间隔为 $2.5\ \text{m}$,共计 8 根短导体。短导体的长度从 $0.5\ \text{m}$ 开始增加,增加至 $2.5\ \text{m}$ (满足文献 [25])。水平接地体埋深为 $0.8\ \text{m}$,水平接地体、接地引下线和短导体均采用直径为 $14\ \text{mm}$ 的圆钢材料,在导体首端注入 $20\ \text{kA}$ 的雷电流,雷电流采用 $(2.6/50)\ \mu\text{s}$ 的双指数波。

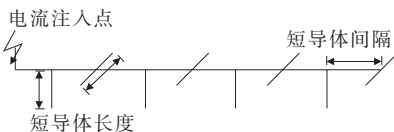


图 8 三维交错结构短导体接地装置示意

Figure 8 Diagram of grounding device with three-dimensional interleaved short conductors

改变每根短导体的长度,得到冲击电压峰值,计算不同短导体长度下接地装置的冲击接地电阻,如图 9 所示,可知随着短导体长度的增加,接地体的冲击接地电阻降低。另一方面,短导体越长屏蔽效应越明显,冲击接地电阻的下降越缓慢。但增加短导体长度时还要考虑综合技术经济的因素。

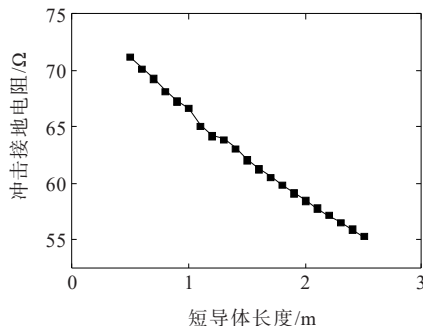


图 9 不同长度下的短导体接地体的冲击接地电阻

Figure 9 Impulse grounding resistances of grounding device with different short conductors lengths

由于图 9 没有明显的特征量来选取短导体长度,故引入短导体单位长度的降阻率作为选取短导体长度的依据,将图 9 中的计算结果代入式(5),得到单位长度降阻率随短导体长度变化的关系,如图 10 所示。

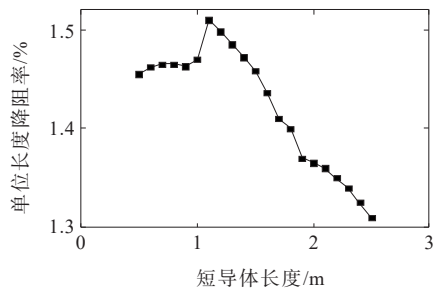


图 10 不同短导体长度下的单位长度降阻率

Figure 10 Resistance reduction rates per unit length with different short conductor lengths

由图 10 可知,在水平与垂直短导体之间的间隔为 $2.5\ \text{m}$ 的情况下,短导体长度取 $1.1\ \text{m}$ 时其单位长度的降阻率最高,相较于长度为 $2.5\ \text{m}$ 的短导体,单位长度降阻率提高了 15.3% 。这是因为短导体长度较短时降阻效果不明显,而其长度较长时会使得雷电流主要从短导体泄入到土壤中,降低了水平接地体的利用率。实际情况中应确定好现场土壤电阻率以及各种参数,再根据文 3.1.1 中方法得到短导体的最优长度。

3.2 三维交错结构短导体间隔的确定方法

3.2.1 优化方法

1) 利用接地计算软件CDEGS进行仿真计算,在文3.1结论的基础上改变水平短导体与垂直短导体之间的间隔(随着短导体之间的间隔增加,安装在水平接地极上的短导体根数相应减少);

2) 得到短导体之间的间隔与冲击接地电阻的关系变化曲线;

3) 根据关系变化曲线以最小冲击接地电阻为指标选取最优间隔。

3.2.2 计算实例

文3.1.2已得出结论,即短导体长度取1.1 m。因此,在图8所示模型的基础上通过改变水平与垂直短导体之间的间隔计算冲击接地电阻。

为满足规范要求,水平与垂直短导体之间的间隔从2.5 m开始增加,水平接地体的长度为20 m,此时短导体数量为8根,土壤电阻率仍选取 $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。水平接地体埋深为0.8 m,水平接地体、接地引下线和短导体均采用直径为14 mm的圆钢材料,在导体首端注入20 kA的雷电流,雷电流采用 $(2.6/50)\ \mu\text{s}$ 的双指数波,仿真结果如图11所示。

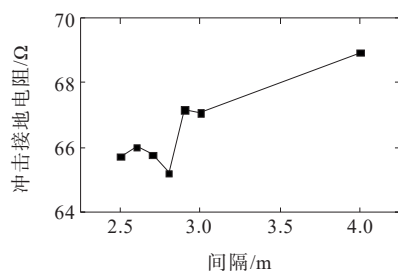


图11 不同间隔下的接地装置的冲击接地电阻

Figure 11 Impulse grounding resistances of grounding device with different short conductor spacing

由图11得知,当短导体间隔较小时,随着相邻短导体之间的间隔增加,冲击接地电阻呈下降趋势。但随着间隔增加使得添加在接地极上的短导体数量低于8根时,冲击接地电阻的数值明显提高(短导体间隔为2.9 m时其数量少于8根)。在给定的参数下,短导体长度为1.1 m、间隔为2.8 m时降阻效果最好。

4 输电杆塔接地装置的降阻实例

输电杆塔接地装置的性能应考虑其冲击散流

特性,但现场测试时以计算工频接地电阻为考核指标。输电线路杆塔工频接地电阻(不宜超过)的规定^[26]如表1所示。

表1 输电线路杆塔工频接地电阻

Table 1 Power frequency grounding resistance of transmission line tower

土壤电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	接地 电阻/ Ω	土壤电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	接地 电阻/ Ω
$P\leq 100$	10	$500<\rho\leq 1\,000$	20
$100<\rho\leq 500$	15	$1\,000<\rho\leq 2\,000$	25

本文计算实例中土壤电阻率取 $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$,工频接地电阻的目标值为 $20\ \Omega$ 。按文2.2中优化得到的三维交错结构短导体的敷设方法,在杆塔接地装置的典型四角放射水平接地装置上添加三维交错结构短导体,搭建立体式接地装置,如图12所示,水平接地体埋深为0.8 m,水平接地体、接地引下线和短导体均采用直径为14 mm的圆钢材料;水平接地体方框边长 a 为10 m,在每根放射线上添加间距为2.8 m、长度为1.1 m的短导体;通过改变水平射线 l 的长度,使接地装置工频接地电阻的目标值降到 $20\ \Omega$ 以下。经计算,当每根放射线长度 l 达到19.8 m时,工频接地电阻降至 $19.96\ \Omega$,此时接地装置的冲击接地电阻为 $15.62\ \Omega$ 。

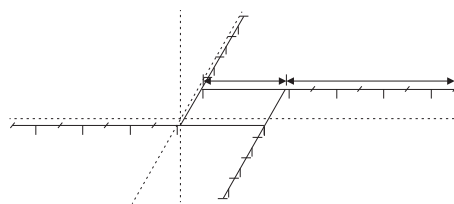


图12 加装三维交错短导体的接地装置

Figure 12 Grounding device with three-dimensional interleaved short conductors

为了进行对比,搭建典型杆塔接地装置(四角放射形水平接地装置)模型(图2(b)),方框边长 a 也设为10 m,其他计算参数均与上述相同,经计算,当每根放射线长度 l 达到22.4 m时,工频接地电阻降至 $19.98\ \Omega$ 。此时接地装置的冲击接地电阻为 $18.71\ \Omega$ 。

在添加三维交错结构短导体前、后,使杆塔接地装置满足降阻目标,数据对比如表2所示,可见添加三维交错结构短导体的接地装置可降低16.52%的冲击接地电阻。当三维交错结构短导体作为辅助降阻元件安装在接地装置上以后,更有利于冲击

电流的散流,使冲击接地电阻进一步降低;减少水平接地体的长度,有利于减少开挖的距离,便于满足现场的施工条件。

表2 数据对比

Table 2 Data comparison

接地装置	工频接地 电阻/ Ω	冲击接地 电阻/ Ω	水平接地体的 总长度/m
典型	19.98	18.71	89.6
添加三维交错 结构短导体	19.96	15.62	79.2
降低率/%	—	16.52	11.6

5 结语

1) 通过对比计算水平、垂直和三维交错布置短导体的冲击接地电阻的降阻效果,可知三维交错布置结构的短导体安装方式的降阻效果最好,并且土壤电阻率越高降阻效果越明显。

2) 对三维交错结构短导体的结构参数进行优化,给出了短导体长度和间隔的优化方法。在土壤电阻率为 $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ 时,短导体的最优长度及最优间隔分别为1.1、2.8 m,添加三维交错结构短导体的接地装置可降低16.52%的冲击接地电阻。实际情况中应确定好现场土壤电阻率以及各种参数,以选取短导体的最优参数。

3) 当短导体作为辅助降阻元件安装在接地装置上时,相较常规接地装置在降低冲击接地电阻方面更具优势,且土壤电阻率越高降阻效果越明显。

参考文献:

- [1] 匡福志,李霞,钟湘平,等.山区配电线路塔位地形雷击风险分类[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):66-72.
KUANG Fuzhi, LI Xia, ZHONG Xiangping, et al. Classification of lightning strike risk for distribution line tower terrain in mountainous area[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 66-72.
- [2] 李臻奇,蔡翔,易浩,等.考虑接地电阻特性影响的差异性杆塔接地设计[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):168-174.
LI Zhenqi, CAI Xiang, YI Hao, et al. Study on difference tower grounding considering the characteristics of the grounding resistance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 168-174.
- [3] 王振羽,宋明钰,薄岩,等.35 kV线路避雷器与避雷线防雷效果量化比较分析[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):165-171.
WANG Zhenyu, SONG Mingyu, BO Yan, et al. Quantitative comparative of lightning protection effect between 35 kV line arrester and lightning line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 165-171.
- [4] 栗渊恺,刘盛祥,范力权,等.高土壤电阻率地区500 kV变电站过电压防护复合接地研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(3):75-80.
SU Yuankai, LIU Shengxiang, FAN Liqun, et al. Study on the over-voltage protection compound grounding in 500 kV substation with high soil resistivity[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 75-80.
- [5] 高晓晶,胡元潮,姜志鹏,等.输电杆塔混凝土桩基接地散流与结构优化研究[J].电瓷避雷器,2021(5):115-122.
GAO Xiaojing, HU Yuanchao, JIANG Zhipeng, et al. Grounding dispersion and structure optimization of transmission tower concrete foundation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5): 115-122.
- [6] 刘宇彬,徐志强,熊移贝,等.杆塔钢筒基础桩冲击散流特性研究[J].电瓷避雷器,2021(4):10-15.
LIU Yubin, XU Zhiqiang, XIONG Yibei, et al. Impact dispersion characteristics of steel tube foundation pile of the tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4): 10-15.
- [7] 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.
- [8] 方潇,安韵竹,胡元潮,等.水源区杆塔外敷电极条件下的基础接地特性[J].科学技术与工程,2020,20(34):14095-14100.
FANG Xiao, AN Yunzhu, HU Yuanchao, et al. Tower foundation grounding characteristics with external electrode in water source area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(34): 14095-14100.
- [9] 茆美琴,程德健,袁敏,等.基于暂态能量流的模块化多电平高压直流电网接地优化配置[J].电工技术学报,2022,37(3):739-749.
MAO Meiqin, CHENG Dejian, YUAN Min, et al. Optimal allocation of grounding system in high voltage direct current grid with modular multi-level converters based on transient energy flow[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 739-749.

- [10] 冯建源,安韵竹,姜志鹏,等.柔性石墨复合接地体电感效应与火花放电效应研究[J].电瓷避雷器,2021(3):112-118.
FENG Jianyuan, AN Yunzhu, JIANG Zhipeng, et al. Study on inductance effect and spark discharge effect of flexible graphite composite grounding conductors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3): 112-118.
- [11] 杨超.输电线路杆塔接地网降阻剂接地特性及优化研究[D].济南:山东大学,2019.
YANG Chao. Resistance reducing agent grounding characteristics of transmission line tower grounding network and optimization studies[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [12] 谭波,董晓辉,刘鸣亚,等.考虑土壤电阻率分布各向异性的高压直流接地极均流电阻配置方法及试验验证[J].高压电器,2021,57(5):144-150.
TAN Bo, DONG Xiaohui, LIU Mingya, et al. Configuration method and test verification for equalizing resistance of HVDC earth electrode considering anisotropy of soil resistivity distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 144-150.
- [13] 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.
- [14] 司马文霞,雷超平,袁涛,等.改善冲击散流时地中电场分布的接地降阻试验[J].高电压技术,2011,37(9):2294-2301.
SIMA Wenxia, LEI Chaoping, YUAN Tao, et al. Experimental study on grounding resistance reduction based on improved grounding electric field distribution induced by the diffuser of impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2294-2301.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李景丽,蒋建东,李丽丽.针刺式接地装置降阻机制的仿真和试验研究[J].电网技术,2013,37(1):211-217.
LI Jingli, JIANG Jiandong, LI Lili. Simulation and experiment study on resistance-reducing mechanism of grounding device with spicules[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 211-217.
- [18] 鲁铁成.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,2009:68-76.
LU Tiecheng. Power system overvoltage[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 2009: 68-76.
- [19] 时文峰.变电站接地网冲击特性分析及其影响因素研究[D].宜昌:三峡大学,2020.
SHI Wenfeng. Study on impulse characteristics and its influencing factors of grounding grid in substations[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.
- [20] MOUSA A M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1669-1677.
- [21] 时维经.实际杆塔接地极冲击特性的大电流试验研究与仿真分析[D].武汉:华中科技大学,2017.
SHI Weijing. Study on heavy current experiments and simulation on the impulse characteristics of actual tower grounding electrodes[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [22] 黄佳瑞,谭波,杨帅,等.杆塔接地体冲击散流分布试验研究[J].南方电网技术,2015,9(7):34-39.
HUANG Jiarui, TAN Bo, YANG Shuai, et al. Simulation test of impulse current distribution of tower grounding devices [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 34-39.
- [23] 刘振兴,张敏,耿蒲龙,等.井下垂直接地极散流特性的影响因素研究[J].煤炭技术,2021,40(6):164-167.
LIU Zhenxing, ZHANG Min, GENG Pulong, et al. Research on influencing factors of dispersion characteristics of vertical grounding electrodes in underground [J]. Coal Technology, 2021, 40(6): 164-167.
- [24] 李嘉思,刘曳君,潘卓洪,等.复杂土壤结构下直流接地极选址及直流偏磁风险评估[J].电测与仪表,2021,58(2):13-18.
LI Jiasi, LIU Yejun, PAN Zhuohong, et al. Site selection of DC grounding electrodes in complex soil and risk assessment of DC bias [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 13-18.
- [25] GB/T 50065—2011.交流电气装置的接地设计规范[S]. GB/T 50065—2011. Code for design of ac electrical installation earthing[S].