

杆塔接地网接地模块降阻效率与影响因素研究

于 洋¹, 安韵竹², 刘兴华¹, 咸日常², 曹 盈³, 杨学杰¹

(1. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000;

2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

3. 河南盛煌电力设备有限公司, 河南 南阳 473000)

摘要:输电线路杆塔接地网在外延、垂直接地降阻措施受限时常采用辅助降阻材料降阻, 实际杆塔接地工程采用接地模块进行接地降阻时缺少统一规范的指导, 在应用时存在一些盲目施工、降阻效率低等问题。本文采用防雷接地领域中通用 CDEGS 软件对输电线路杆塔接地网采用接地模块降阻时的影响因素进行仿真计算。首先, 针对一字型接地网采用接地模块时的敷设位置和密度进行仿真; 其次, 对常见的方框射线型接地网采用接地模块降阻时的降阻效率进行分析; 随后, 分别分析了土壤电阻率与土壤结构对接地模块降阻效率的影响规律; 最后, 针对实际输电线路采用接地模块降阻给出相应施工建议。本文研究结论可为输电线路防雷、杆塔接地网降阻施工提供参考。

关键词:杆塔接地网; 接地模块; 屏蔽效应; 土壤分层

中图分类号: TM753

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)06-0092-05

0 引言

雷击是造成输电线路跳闸故障的主要自然因素之一, 110 kV 以上输电线路绝缘子闪络时发生反击的概率较高, 降低杆塔接地电阻是抑制塔顶过电压的最常用措施^[1-2]。由于输电线路走廊长度较长, 杆塔接地网多处在高山、丘陵地区, 土壤层稀薄, 土质条件贫瘠, 土壤电阻率高。有些输电线路杆塔接地网接地电阻值往往数倍于接地电阻要求限值, 使得雷击风险概率较高^[3]。由于输电线路跨越不同的地形、地貌及地质区域, 杆塔接地网在不同区域无法采用统一的降阻策略进行降阻。实际输电线路杆塔接地网通常在原有接地网的基础上采用外延接地体, 增大接地网的等效散流面积从而达到降阻效果, 少数情况下, 杆塔接地网采用垂直接地进行接地降阻并起到一定的降阻效果^[4-5]。

当杆塔接地网处于地形条件特殊、施工面积有限并且垂直接地施工难度高时, 通常考虑辅助降阻材料如降阻剂、接地模块等^[6-8]。降阻剂存在易随雨水或者地下水流失、降阻效率低、降阻效果易“反弹”等问题。而接地模块作为一种常见的接地降阻措施, 本质上是将降阻剂“固化”, 制备时一般内芯仍采用镀锌钢材, 外敷层将石墨、炭黑、金属粉末等与树脂、水泥等固化剂进行混合凝固, 其电阻率一般为 $10^{-2} \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ ^[9-11]。接地模块通过增大接地网

与土壤的接触面、降低局部介质的电阻率以达到降阻目的。实际工程中, 接地模块降阻方法在包括特高压等多个电压等级的输电线路杆塔接地网中得到应用。但输电线路杆塔接地工程采用接地模块降阻施工缺少统一规范的指导, 存在盲目施工、降阻效率低等问题。另外, 一些接地工程过高估计了接地模块的降阻效率, 使得杆塔接地网后期维护成本过高^[12-14]。

本文针对输电线路杆塔接地网采用接地模块降阻时的降阻效率及影响因素进行仿真计算与理论分析, 相关结论为输电线路杆塔接地网降阻设计与施工提供参考。

1 一字型接地网降阻效率仿真

输电线路杆塔一字型接地网作为输电线路常见的接地类型, 在实际输电线路杆塔接地网改造时应用较多。一字型接地网一般采用单根接地体连接塔腿并外延至低土壤电阻率区域, 省去了单独焊接的引下线, 从而达到降阻的目的。本文针对一字型接地网采用接地模块降阻时的降阻特性与影响因素进行仿真计算。文中接地模块规格是 $100 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 仿真时等效为总厚度为 10 cm 的涂层, 涂层电阻率设置为 $0.5 \Omega \cdot \text{m}$ 。一字型接地网采用镀锌钢接地材料, 直径为 12 mm , 电阻率 ρ 为 $1.92 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$, 相对磁导率 μ_r 为 636, 接地网埋深取 0.8 m , 取均匀土壤电阻率为 $300 \Omega \cdot \text{m}$ 。仿真时, 分别将接地模块敷设在接地体的单侧与双侧, 一字型接地

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-08-22

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2016EEQ20)

网与接地模块的连接方式如图1所示。

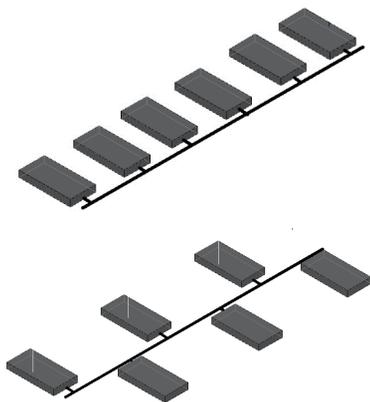


图1 一字型接地网与接地模块的连接

Fig.1 Connection of "—" shaped grounding grid and grounding module

在CDEGS软件中分别建立接地模块单侧排布与双侧排布时的接地网模型,两种接地形式采用相同的接地模块间隔距离,得到不同间隔距离下接地模块降阻效率如表1所示。

表1 单侧与双侧排列时降阻效率对比

Tab.1 Comparison of grounding module reduction efficiency between one side and two sides

模块间隔 d/m	降阻效率 $\eta/\%$	
	单侧排布	双侧排布
10	13.58	13.58
6	16.18	16.18
5	17.34	17.35
2	24.11	24.24

由表1可知,接地模块降阻效率随着间隔距离的减小逐渐升高,但升高幅度逐渐变缓,说明接地模块数量的逐渐增多并不能使接地电阻保持持续减小。原因是随着接地模块数量的增多,各接地体散流过程中因涡流效应产生的感生磁场影响了相邻接地体之间的电流密度分布,接地体之间的互感增大,相互之间的屏蔽效应与邻近效应增强,接地体径向截面上的有效散流面积减小,接地体向远端和深处散流的能力削弱,从而使得参与散流的等效接地面积减小,接地电阻降低幅度有限,降阻效率呈现出饱和趋势。因此在实际输电线路杆塔接地改造中应尽量避免接地模块排布过密。

由表1也可以看出,即使接地模块之间的间隔达到2 m,此时的降阻效率仍然很低,说明实际输电线路杆塔接地改造中依靠接地模块增大与土壤的基础面积,仅能够改善有限区域内的电阻率,降阻效果仍然有限。因此,建议实际工程中应保持模块间距大于2 m,并结合其他降阻方法,才能达到技术

经济性最优。

此外,一字型接地网无论是采用单侧排布还是双侧排布,接地模块降阻效率的区别并不大,实际施工中可根据地形灵活施工。

2 方框射线型接地网降阻效率仿真

方框射线型接地网作为一种常见典型接地网设计方案,一般在杆塔基础根开外边框的4个角上各加一条外延射线,与边框的夹角为 135° 。方框射线型接地网同样采用镀锌钢接地材料,直径为10 mm,电阻率 ρ 为 $1.92 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$,相对磁导率 μ_r 为636,接地网埋深取0.8 m。方框部分接地体长度为12 m,射线部分接地体长15 m,土壤电阻率设置为 $300 \Omega \cdot m$ 。接地模块的敷设方式如图2所示。

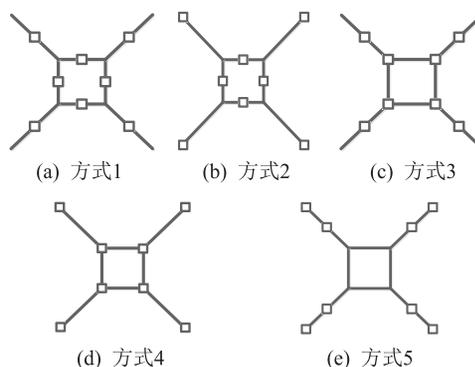


图2 方框射线型接地网不同接地模块敷设方式

Fig.2 Grounding module of square belt-shaped grounding grid

仿真按照图2中方框射线型接地网敷设方式,分别将接地模块敷设在边框与射线处,得到5种施工方式下的降阻效率对比情况如表2所示。

表2 方框带射线接地网不同排布方式降阻效率对比

Tab.2 Comparison of reduction efficiency of different arrangement methods of square belt-shaped grounding grid

排布方式	降阻效率/ $\%$
方式1	6.18
方式2	10.87
方式3	6.13
方式4	10.79
方式5	13.21

由表2可知,方框射线型接地网采用的接地模块数量有限时,将接地模块放置在射线上的降阻效率优于放置在边框上。此外,对比图2中的方式4和方式5可知:当接地模块敷设射线末端时,有益于降低杆塔接地电阻。其原因是当接地网采用方框射线型接地网时,接地网中心方框处的导体数量密集,接地体之间的屏蔽效应较大,接地模块敷设于

方框处时的散流效率较低,因此实际施工时应优先将接地模块敷设在射线末端,从而减少导体之间的屏蔽效应。

3 土壤电阻率对接地模块降阻特性的影响

针对接地网处于不同土壤条件时接地模块的降阻效率进行计算分析,仿真时取典型方框射线型接地网的边框长度为 12 m,射线长度为 15 m,仅在方框射线型接地网的 4 条射线末端各敷设 1 个接地模块,其他仿真参数与前文一致,得到不同土壤电阻率下的仿真计算结果如表 3 所示。

表 3 不同土壤电阻率下接地模块降阻效率
Tab.3 The resistivity reduction efficiency of grounding module under different soil resistivity

土壤电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	接地电阻 R/Ω	降阻效率 $\eta/\%$
50	1.149	4.92
200	4.476	5.15
500	11.12	5.20
1000	22.21	5.22
2000	44.39	5.23

由表 3 可以看出,虽然接地网在不同土壤电阻率条件下的接地电阻差距比较大,但接地模块的降阻效率变化并不高,仅在高土壤电阻率下数值上略高,说明土壤条件是决定杆塔接地电阻的最主要因素。进一步地,增加接地模块使用数量,同时在接地网的每根接地地上敷设接地模块,仿真分别取各接地模块之间的距离为 5 m 和 0.5 m,得到各间距的降阻效率并与表 3 数据进行对比,对比结果如图 3 所示。

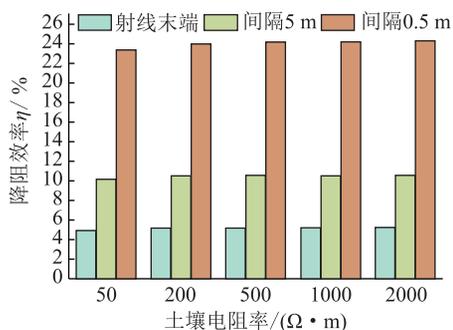


图 3 土壤电阻率对接地模块降阻特性的影响

Fig.3 The effect of soil resistivity on the resistance reduction characteristics of ground modules

由图 3 可知,接地模块排布方式相同时,不同土壤电阻率下接地模块的降阻效率 η 几乎一致,无明显变化。同一土壤电阻率条件下,接地模块使用数量增多能提高接地模块的整体降阻效率,但整体效率值仍然有限,即使接地模块使用量达到理论上的

最大值,接地网的整体降阻效率仍然在 25% 以下,与一字型接地网的仿真结论一致。

4 土壤结构对接地模块降阻特性的影响

实际工程中接地模块长度一般为 0.8~1.5 m,对于长度较长的接地模块宜采用垂直布置方式,本文针对接地模块布置方式与土壤层的相互关系进行仿真计算。在研究土壤分层对接地模块降阻效率 η 的影响时,分两种情况,即接地模块还未接触深层的低电阻率土壤和接地模块已经触及深层的低电阻率土壤。

本文在仿真时首先计算均匀土壤条件下,土壤电阻率为 1000 $\Omega \cdot m$;然后将土壤设置为两层,上层电阻率为 1000 $\Omega \cdot m$,厚度为 2 m,接地模块底端长度为 1.8 m (包含接地沟埋深 0.8 m),下层土壤设置为 500 $\Omega \cdot m$ 和 300 $\Omega \cdot m$ 。接地模块设置方式仍然为射线末端、间隔 5 m 和间隔 0.5 m,比较 3 种情况下的降阻效率 η ,如图 4 所示。

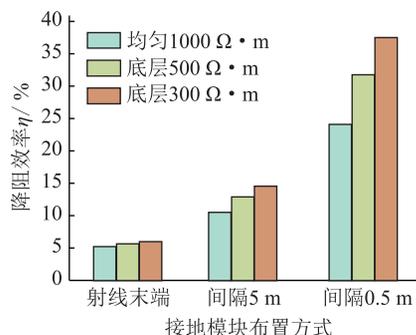


图 4 未触及底层土壤时降阻效率对比

Fig.4 Comparison of resistance reduction efficiency without touching bottom soil

由图 4 可知,以同样的排布方式使用接地模块时,在土壤分层且下层土壤电阻率较低时,接地模块的降阻效率 η 会提高,且下层土壤电阻率越低,降阻效率 η 就越高。进一步研究接地模块触及深层低电阻率土壤时接地模块的降阻效率 η 。设置接地模块埋深为 2.2 m,此时接地模块底层末端触及底层低电阻率土壤层,计算结果如表 4 所示。

表 4 接地模块触及底层土壤时降阻效率对比

Tab.4 Comparison of resistance reduction efficiency touching with bottom soil

土壤电阻率/ $(\Omega \cdot m)$		射线末端		间隔 5 m		间隔 0.5 m	
上层	下层	R/Ω	$\eta/\%$	R/Ω	$\eta/\%$	R/Ω	$\eta/\%$
1000	1000	22.21	5.22	20.96	10.55	17.77	24.18
1000	500	14.66	7.80	12.98	18.40	9.72	38.89
1000	300	11.29	10.27	9.22	26.70	6.17	50.96

由表 4 可知,接地模块触及底层较低电阻率的

土壤层时,接地电阻降低明显,降阻效率相比未触及底层土壤层时降低明显,二者具体对比情况如图5所示。

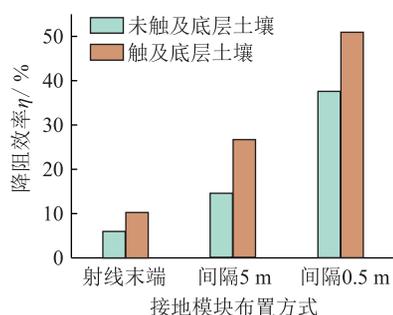


图5 土壤结构对接地模块降阻特性的影响

Fig.5 The influence of soil structure on the drag reduction characteristics of grounding modules

由图5可知,接地模块触及底层土壤时,接地模块起到垂直接地作用,有利于杆塔接地网降阻。但实际接地施工时,考虑到垂直接地施工相对成本较高,在接地改造施工时应尽可能精确勘探土壤电阻率与土质分层结构,按照地质条件设置接地模块敷设方式。

由以上分析可知,杆塔接地网采用接地模块时的降阻效率与其敷设位置、排布间隔距离、接地网面积等因素有直接关系,接地施工应该充分考虑接地导体屏蔽作用,实际工程中盲目依靠增加接地模块敷设密度降低接地电阻并不可取。一般情况下,接地模块宜遵循以下原则:如果表层1 m深度内的土壤湿润,蓄水能力强,可按照接地规程敷设在0.6~0.8 m深度;若在1~2 m深度内有明显的地下水,敷设时宜将接地模块触及到湿润土壤区域。此外,施工时,宜将接地模块敷设在接地体的端部,尤其是接地体的尾端,同时,建议相邻接地体使用模块的最小间隔大于2 m,从而减小接地模块之间的屏蔽效应,避免材料与施工费用的浪费。此外,还应根据接地网实际施工及地质条件,采用综合降阻策略,从而达到理想防雷降阻效果。

5 结语

本文采用CDEGS软件对输电线路杆塔接地网采用接地模块降阻时的降阻效率与影响因素进行仿真计算,得到规律性的结论如下:

(1) 一字型接地网采用接地模块降阻时,接地电阻随着使用量的增多逐渐减小,但降阻效率逐渐变缓,呈现出饱和趋势。接地模块数量的逐渐增多并不能使得接地电阻保持持续减小。

(2) 方框射线型接地网将接地模块放置在射线

上的降阻效率优于放置在边框上,并且射线在连接接地网时,优先将模块放置在射线末端,从而减少导体之间的屏蔽效应。

(3) 接地模块在不同土壤电阻率条件下的降阻效率差别不大。

(4) 当土壤分层结构且底层电阻率较低时,接地模块触及底层土壤可以起到垂直接地作用,有利于杆塔接地网降阻。

本文相关研究结论可为实际输电线路杆塔接地网接地设计、材料选型及降阻改造提供参考。

参考文献:

- [1] 张波,何金良,曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术,2015,41(8):2569-2582.
ZHANG Bo, HE Jinliang, ZENG Rong. State of art and prospect of grounding technology in power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8):2569-2582.
- [2] 徐伟,路永玲,唐梦颖,等. 江苏电网近年雷电活动及输电线路雷击跳闸分析[J]. 电力工程技术,2017,36(6):106-110.
XU Wei, LU Yongling, TANG Mengying, et al. Analysis of lightning activities and transmission line lightning strike tripping in Jiangsu power grid in recent years[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(6):106-110.
- [3] 胡元潮,阮江军,龚若涵,等. 柔性石墨复合接地材料及其在输电线路杆塔接地网中的应用[J]. 电网技术,2014,38(10):2851-2857.
HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, GONG Ruohan, et al. Flexible graphite composite electrical grounding material and its application in tower grounding grid of power transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2851-2857.
- [4] 肖微,胡元潮,阮江军,等. 柔性石墨复合接地材料及其接地特性[J]. 电工技术学报,2017,32(2):85-94.
XIAO Wei, HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, et al. Flexible graphite composite electrical grounding material and its grounding application features[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2):85-94.
- [5] 杨建明,徐斌,王杨正,等. 一次特殊的高压直流输电线路故障分析及线路保护优化[J]. 电力工程技术,2017,36(5):136-142.
YANG Jianming, XU Bin, WANG Yangzheng, et al. Analysis of an HVDC transmission line fault and line protection optimization[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(5):136-142.
- [6] 吴昊,陈名铭,张敏,等. 接地模块冲击特性的试验研究[J]. 电瓷避雷器,2013(3):110-115.
WU Hao, CHEN Mingming, ZHANG Min, et al. Experimental study on impact characteristics of grounding module[J]. Insulators & Surge Arresters, 2013(3):110-115.
- [7] 曾嵘,周佩朋,王森,等. 接地模块降阻特性的现场实验与仿真建模[J]. 高电压技术,2010,36(9):2112-2119.

- ZENG Rong, ZHOU Peipeng, WANG Sen, et al. Field test on the reducing resistance natural of grounding module and building of its simulation model[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9):2112-2119.
- [8] 谭琪明,沈冬,胡徐铭,等. 地下金属管道对变电站接地网地表电位的影响[J]. 广东电力,2017,30(10):99-103.
TAN Qiming, SHEN Dong, HU Xuming, et al. Influence of underground metal pipelines on earth surface potential of substation grounding grid[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10):99-103.
- [9] 王培军,付学文,魏智娟. 新型高效降阻接地模块的研究与应用[J]. 电瓷避雷器,2012(1):70-76,81.
WANG Peijun, FU Xuewen, WEI Zhijuan. Research and application of the grounding module of new high-efficiency reducing resistance[J]. Insulators & Surge Arresters, 2012(1):70-76,81.
- [10] 李俊峰,陶留海,陈方东. 1000 kV 特高压线路接地模块的选型原则与施工关键研究[J]. 电网技术,2008,32(23):1-6.
LI Junfeng, TAO Lihai, CHEN Fangdong. Principle of grounding module selection for 1000 kV transmission line and key problems in its construction [J]. Power System Technology, 2008,32(23):1-6.
- [11] 周炜明,吴广宁,曹晓斌,等. 接地模块对地网接地电阻的影响[J]. 电瓷避雷器,2008(2):25-27,31.
ZHOU Weiming, WU Guangning, CAO Xiaobin, et al. Study on effect of grounding module on grounding resistance[J]. Insulators & Surge Arresters, 2008(2):25-27,31.
- [12] 帅海燕. 新型接地模块对雷电能量吸收效果试验分析[J]. 电瓷避雷器,2016(6):88-92.
SHUAI Haiyan. The experimental analysis on the lightning energy absorption effect of new type grounding module[J]. Insulators & Surge Arresters, 2016(6):88-92.
- [13] 胡元潮,阮江军,肖微,等. 柔性石墨复合接地材料及其相关性能试验研究[J]. 高电压技术,2016,42(6):1879-1889.
HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, XIAO Wei, et al. Study on flexible graphite composite material for electrical grounding and its correlation experimentations [J]. High Voltage Engineering, 2016,42(6):1879-1889.
- [14] 侯明春,陈伟,廖建平,等. 高土壤电阻率地区换流站复合接地网设计优化[J]. 广东电力,2017,30(3):34-41.
HOU Mingchun, CHEN Wei, LIAO Jianping, et al. Design and optimization on converter station compound grounding grid in high soil resistivity area [J]. Guangdong Electric Power, 2017,30(3):34-41.

作者简介:



于洋

于洋(1986—),男,硕士,高级工程师,从事输变电设备在线检测与故障检修工作;

安韵竹(1988—),女,博士,讲师,研究方向为电力系统过电压及防护、气体介质放电等(E-mail: anyunzhu2006@163.com);

刘兴华(1981—),男,博士,高级工程师,从事气体介质放电,变压器故障识别与状态评价等研究工作。

Resistance Reduction Efficiency and Influencing Factors of Grounding Module of the Tower Grounding Grid

YU Yang¹, AN Yunzhu², LIU Xinghua¹, XIAN Richang², CAO Ying³, YANG Xuejie¹

(1. State Grid Zibo Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Zibo 255000;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000;

3. Henan Shenghuang Power Equipment Limited Company, Nanyang 473000)

Abstract: The auxiliary material is often used to reduce the resistance of transmission line tower grounding grid for the limitation of the extension and vertical grounding resistance reduction measures. For the lack of unified standard guidance when grounding modules are used in the actual tower grounding project, some problems occurred in application such as blind construction and low reduction efficiency. In this paper, the common lightning protection software CDEGS is used to simulate and calculate the influencing factors when grounding module is used to reduce the resistance of transmission line tower grounding grid. First of all, simulation is carried out for the laying position and density of the grounding module in the "-" shaped grounding grid. Secondly, the efficiency of grounding module in the grounding grid is analyzed through the simulation. Then, the influence rule of soil resistivity and soil structure on the grounding module reduction efficiency is analyzed. Finally, the corresponding construction suggestions are given for the actual transmission line using grounding module to reduce the resistance. The conclusions of this paper can provide references for the lightning protection of transmission lines and the construction of the grounding grid of towers.

Key words: grid of towers; grounding module; shielding effect; soil layer

(编辑 方晶)