

文章编号:1671-251X(2020)11-0087-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019120067

矿区变电站进线段杆塔辅助接地网散流特性研究



扫码移动阅读

谢洪平¹, 连学森², 黄涛¹, 杜长青¹, 陈勇¹, 刘亮¹

(1. 国网江苏省电力工程咨询有限公司, 江苏 南京 210024;
2. 山东理工大学 电气与工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:针对矿区变电站进线段杆塔接地网外延降阻存在地形受限、有效散流长度短、降阻效率低等问题,提出对进线段杆塔采用长距离外延引线辅助接地的降阻方法,并通过防雷接地计算软件 CDEGS 建立“T”型、“Γ”型、方框型、垂直型单向辅助接地网仿真模型,研究钢管塔单向辅助接地网的散流特性及其影响因素。研究结果表明:外延引线长度越大,降阻效率越高;在高频电流作用下,外延引线长度超过 60 m 时,降阻效率稳定在 80%左右;“Γ”型单向辅助接地网散流特性稳定,分流能力强,降阻效果最好;在不同土壤条件下,单向辅助接地网降阻效率在 70%以上。在实际工程应用中,建议根据实际土壤条件确定辅助接地网的外延引线长度与终端结构,将辅助接地网铺设至土壤电阻率较小区域或对土壤电阻率较大区域采取局部换土措施,以提高进线段杆塔单向辅助接地网的降阻效率。

关键词:矿区变电站;单向辅助接地网;散流特性;外延引线;降阻效率;土壤电阻率
中图分类号:TD611 文献标志码:A

Research on stray current characteristics of auxiliary grounding grid of incoming line tower of mine substation

XIE Hongping¹, LIAN Xuesen², HUANG Tao¹, DU Changqing¹, CHEN Yong¹, LIU Liang¹

(1.State Grid Jiangsu Power Engineering Consulting Limited Company, Nanjing 210024, China;
2.College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology,
Zibo 255000, China)

Abstract:In view of problems of limited terrain, short effective dispersion length, and low resistance reduction efficiency in the extensional resistance reduction of the grounding grid of incoming line section of mine substation, a resistance reduction method using long-distance extension lead for auxiliary grounding of incoming line tower was proposed. The grounding calculation software CDEGS is used to establish simulation model of "T" type, "Γ" type, box type, vertical type unidirectional auxiliary grounding network, and study stray current characteristics of unidirectional auxiliary grounding grid of steel tube tower and corresponding influencing factors. The research results show that the longer the extension lead, the higher the resistance reduction efficiency; when the extension lead length exceeds 60 m, the resistance reduction efficiency is stable at about 80% under the action of high-frequency current; the "Γ" type unidirectional auxiliary grounding grid has stable stray current characteristics, strong shunting ability, and its resistance reduction effect is the best; resistance reduction efficiency of the unidirectional auxiliary grounding grid is more than 70% under different soil conditions. In practical engineering applications, it is

收稿日期:2019-12-27;**修回日期:**2020-10-18;**责任编辑:**胡娴。

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016EEQ20);山东省高等学校科技计划项目(J16LN32)。

作者简介:谢洪平(1975—),男,四川南充人,高级工程师,硕士,主要研究方向为输变电设备运维与故障检测、电工新材料及其应用技术等, E-mail:xhpyy@163.com。通信作者:连学森(1995—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统防雷与接地技术, E-mail:614627258@qq.com。

引用格式:谢洪平,连学森,黄涛,等. 矿区变电站进线段杆塔辅助接地网散流特性研究[J]. 工矿自动化,2020,46(11):87-94.
XIE Hongping, LIAN Xuesen, HUANG Tao, et al. Research on stray current characteristics of auxiliary grounding grid of incoming line tower of mine substation[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(11): 87-94.

recommended to determine the extension lead length and terminal structure of the auxiliary grounding grid according to the actual soil conditions, and to lay the auxiliary grounding grid to areas with low soil resistivity or to take local soil replacement measures for areas with high soil resistivity to improve the resistance reduction efficiency of unidirectional auxiliary grounding grid of the incoming line tower.

Key words: mine substation; unidirectional auxiliary grounding grid; stray current characteristic; extension lead; resistance reduction efficiency; soil resistivity

0 引言

变电站是矿区的主要动力供应站,其安全性非常重要^[1-2]。矿区变电站多处于山谷地区,其输电线路多架设于山区,落雷密度大,容易发生雷电灾害。如果雷电流侵入波对矿区变电站电气设备造成损害,将导致矿井通风系统停电,矿井内部瓦斯气体浓度急剧上升,威胁工人生命安全^[3]。煤矿现场实践经验表明,进线段防雷保护可有效衰减雷电流侵入波,其中降低进线段杆塔的接地电阻是防雷的关键^[4]。因此,铺设简单、实用、具有高效散流特性的接地装置具有重要意义。

现阶段,对矿区变电站进线段保护及接地装置的研究逐渐增多。文献[5]对屯兰变电站进线段杆塔因遭受雷击导致主变压器损坏的事故进行了剖析研究,提出利用树枝状放射接地体优化杆塔接地电阻、装设氧化锌避雷器、采用可调式过电压保护间隙 3 种措施进行防雷保护。文献[6]通过研究具体矿区雷击事故得出优化接地装置、规范避雷器接地引下线长度及位置等措施可提高矿区电网供电安全性。文献[7]通过 ATP-EMTP 软件仿真验证了利用保护间隙配合避雷器进行差异性保护及通过接地装置降低接地电阻等措施的可行性。文献[8]分析了由于变电站进线段接地电阻过大导致的变电站雷击事故,并提出了相应的防雷保护措施。文献[9]采用仿真模拟和试验的方法研究了水平接地体、针刺型接地体在复杂土壤结构下的冲击特性。由于矿区变电站及输电线路所处地形复杂,在对杆塔接地网进行外延降阻时,往往存在地形受限、有效散流长度短、降阻效率低等问题,对外延接地进行合理设计与结构优化,对指导实际矿区变电站与输电线路防雷具有现实意义。

本文根据发电站、变电站等大型接地网采用辅助接地网降阻的思路,提出对进线段杆塔这种小型接地网采用长距离外延引线辅助接地的降阻方法。通过电力行业通用的防雷接地计算软件 CDEGS 建立相应仿真模型,研究钢管塔单向辅助接地网的散流特性及其影响因素,同时,研究不同土壤结构对外

延辅助接地网降阻效率的影响规律。

1 接地网建模

降低进线段杆塔的接地电阻,能够有效提高其反击耐雷水平,从而降低进线段绕击事故概率。通过铺设辅助接地网和外延引线,可降低钢管塔的接地电阻,达到散流的目的。针对矿区变电站进线段钢管塔,建立“T”型、“Γ”型、方框型、垂直型单向辅助接地网,杆塔与辅助接地网之间由外延引线连接,如图 1 所示。外延引线的作用是将入地电流更多地散流至终端,以降低杆塔接地电阻。

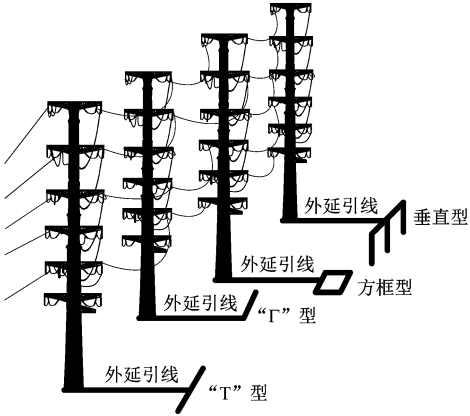


图 1 接地网模型

Fig. 1 Grounding grid models

在 CDEGS 软件中建立钢管塔塔基与单向辅助接地网模型,接地网采用 $\phi 10\text{ mm}$ 、电阻率为 $1.92 \times 10^{-6}\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 、相对磁导率为 636 的镀锌钢接地体,直接与塔基内部钢筋连接,埋深为 0.6 m。塔基埋深为 0.6 m,长度为 8 m,内部由 24 根 $\phi 22\text{ mm}$ 钢筋沿着半径为 0.44 m 的圆环围成,外围混凝土厚度为 0.06 m,混凝土电阻率取 $10\text{ }000\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 。仿真中,取雷电流峰值为 20 kA,通过一根长度为 10 mm、直径为 1 mm 的引下线注流,将内部钢筋等值成内径为 0.404 m、外径为 0.444 m 的垂直钢筒。塔基模型及其等值模型如图 2 所示。

根据图 2 所示的仿真模型,采用 CDEGS 软件计算接地电阻^[10],结果见表 1。

由表 1 可知:采用 2 种模型计算得到的接地电阻相对误差小于 2.5%,从工程角度来看,该误差在

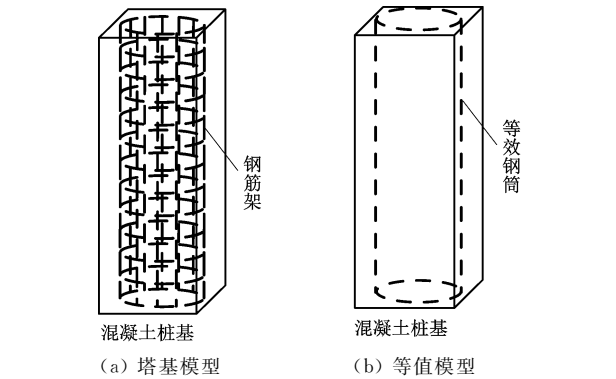


图2 塔基简化计算模型

Fig.2 Simplified calculation model of tower base

表1 塔基模型和等值模型计算结果

Table 1 Calculation results of tower base model and equivalent model

土壤电阻率/(Ω·m)	接地电阻/Ω		相对误差/%
	塔基模型	等值模型	
50	40.27	41.04	1.912
100	43.48	44.26	1.794
500	68.90	69.97	1.553
1 000	100.27	102.03	1.755
1 500	131.27	134.00	2.037
2 000	161.96	165.90	2.433

可接受范围内。由于等值模型的构建和计算更加简便,本文采用等值模型进行钢管塔外延辅助接地降阻的仿真计算。

2 外延引线长度对散流特性的影响

为了更好地描述单向辅助接地网对钢管塔接地电阻的影响,引入降阻效率 γ :

$$\gamma = \frac{R_0 - R}{R_0} \times 100\%$$
 (1)

式中: R_0 为没有单向辅助接地网时的杆塔接地电阻; R 为有单向辅助接地网的接地电阻。

外延引线可以将更多入地电流引向辅助接地网,并在引流过程中将部分电流散流至周围土壤中,起到一定的降阻作用。在 CDEGS 软件中建立钢管塔塔基等值模型,用外延引线与等值模型直接连接。设置外延引线长度为 20~100 m,混凝土电阻率为 10 000 Ω·m,土壤电阻率为 250 Ω·m,入地电流大小为 20 kA,入地电流频率为 50 Hz 和 5 000 Hz (分别代表工频和高频电流),通过仿真计算外延引线长度 L 取不同值时的接地电阻,结果见表 2。

由表 2 可看出,在工频电流的作用下,随着外延引线长度增加,接地电阻逐渐减小,减小幅度也逐渐减小。随着外延引线长度增加,最大降阻效率达到 89.08%。在高频电流作用下,当外延引线长度为

表2 外延引线长度取不同值时的接地电阻

Table 2 Grounding resistances with different extension lead length

电流频率/Hz	R_0/Ω	L/m	R/Ω	$\gamma/\%$
50	54.30	20	17.30	68.14
		40	10.88	79.96
		60	8.23	84.84
		80	6.80	87.48
		100	5.93	89.08
5 000	54.32	20	17.91	67.03
		40	12.51	76.97
		60	10.98	79.79
		80	10.57	80.54
		100	10.50	80.67

60 m 时,降阻效率可以达到 79.79%,但是接地电阻减小的趋势逐渐减缓。这是由于外延引线具有一定的有效散流长度,超出有效散流长度后,降阻效果就不会明显提升。当外延引线长度大于 60 m 时,辅助接地网降阻效率增大的趋势减缓。在实际工程应用中,采用镀锌钢接地材料作为外延辅助接地网的外延引线时,其长度不宜过长,否则将造成材料与施工成本的浪费。

为了定量分析外延辅助接地网的分流作用,定义流入外延引线的电流 I_w 与总注入电流 I_z 的比值为分流系数 η :

$$\eta = \frac{I_w}{I_z} \times 100\%$$
 (2)

分流系数 η 用于表征外延辅助接地网对钢管塔混凝土桩基的分流能力。外延引线长度取不同值时的分流系数如图 3 所示。

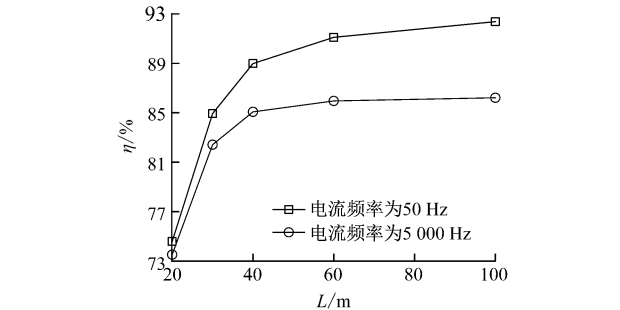


图3 外延引线取不同值时的分流系数

Fig.3 Shunt coefficients with different extension lead length

由图 3 可知,在工频及高频入地电流作用下,随着外延引线长度增加,接地网的分流系数增大。在工频电流作用下,最大分流系数达到 92%;在高频电流作用下,最大分流系数约为 85.5%。但是,由于外延引线具有一定的有效散流长度,在工频电流

下外延引线长度超过 60 m 或在高频电流下外延引线长度超过 50 m 时,分流系数增大的趋势减缓。

此外,从图 3 还可得出,在工频电流下外延引线可以将更多电流散流至终端。这也进一步说明了在高频电流作用下,镀锌钢外延引线的电感效应与趋肤效应进一步增强,阻碍了电流流向远端,导致外延辅助接地网存在有效散流长度。

3 接地网形式对散流特性的影响

为了研究接地网形式对降阻效果的影响,建立“T”型、“Γ”型、垂直型、方框型 4 种辅助接地网模型。设置土壤电阻率为 $250\ \Omega\cdot\text{m}$,入地电流为 20 kA,辅助接地网长度为 40 m,垂直型接地网每段长度为 8 m,垂直型接地网模型如图 4 所示。

不同形式辅助接地网的接地电阻见表 3。由

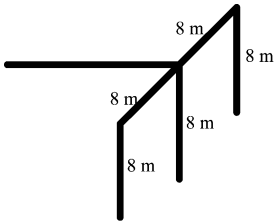


图 4 垂直型接地网模型

Fig. 4 Model of vertical grounding grid

表 3 可看出,随着外延引线长度增加,不同辅助接地网形式下的接地电阻均减小,但是减小的趋势逐渐减缓。在工频电流作用下,降阻效率为 81.71%~89.60%;在高频电流作用下,降阻效率保持在 80%左右。这是由于在高频电流作用下,镀锌钢接地材料的电感效应和趋肤效应逐渐增强,降阻效率与工频下相比有一定下降。从表 3 还可看出,“T”型、“Γ”型、方框型接地网的接地特性比较稳定。

表 3 不同形式辅助接地网的接地电阻

Table 3 Grounding resistances with different auxiliary grounding grid forms

电流 频率/Hz	辅助 接地网	L=15 m		L=30 m		L=45 m		L=60 m		L=75 m	
		R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%
50	“T”型	9.22	83.02	7.80	85.64	6.83	87.42	6.15	88.67	5.65	89.60
	“Γ”型	8.95	83.52	7.60	86.00	6.69	87.68	6.05	88.86	5.58	89.72
	垂直型	9.54	82.43	8.00	85.27	6.96	87.18	6.24	88.51	5.72	89.47
	方框型	9.93	81.71	8.20	84.90	7.09	86.94	6.32	88.36	5.77	89.37
5 000	“T”型	10.99	79.77	10.60	80.49	10.49	80.69	10.48	80.71	10.47	80.73
	“Γ”型	11.45	78.92	10.87	79.99	10.63	80.43	10.56	80.56	10.55	80.58
	垂直型	11.18	79.42	10.68	80.34	10.51	80.65	10.47	80.73	10.46	80.74
	方框型	11.53	78.77	10.80	80.12	10.54	80.60	10.48	80.71	10.45	80.76

由仿真计算结果可得不同形式辅助接地网的分

流系数,如图 5 所示。

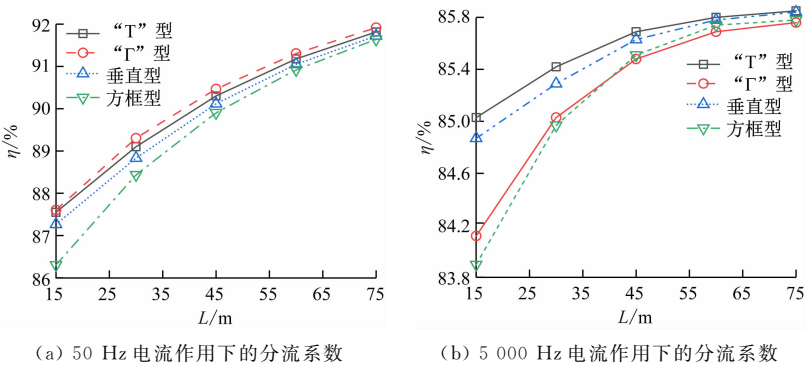


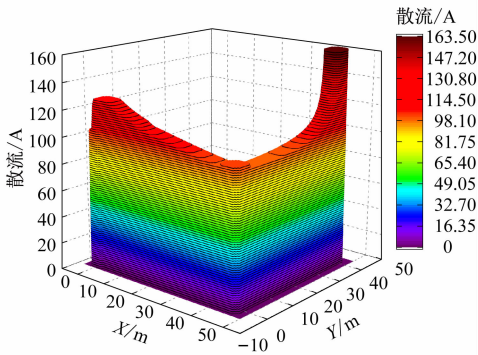
图 5 不同形式辅助接地网的分流系数

Fig. 5 Shunt coefficients with different auxiliary grounding grid forms

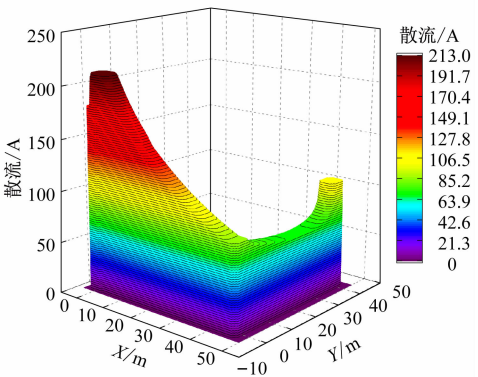
由图 5 可知,由于电感效应和趋肤效应的影响,工频下接地网的分流作用明显优于高频下的分流作用。在工频入地电流作用下,“T”型、“Γ”型辅助接地网的分流作用最好,最大分流系数为 92%。在高频入地电流作用下,“T”型辅助接地网的分流效果

比其他 3 种接地网好,最大分流系数为 85.8%,但是当外延引线长度超过 45 m 时,分流系数基本不再增大。在实际工程应用中,在土壤电阻率较小区域,可以选用“T”型、“Γ”型辅助接地网,以达到理想的降阻效果。

为了观察“Γ”型辅助接地网的散流过程,通过仿真计算得到外延引线长度为 45 m 时的散流分布情况,如图 6 所示,其中 X 为塔基直径加外延引线的铺设长度,Y 为辅助接地网的铺设长度。



(a) 50 Hz 电流作用下的散流



(b) 5 000 Hz 电流作用下的散流

图 6 “Γ”型辅助接地网散流分布

Fig. 6 Stray current distribution of “Γ” type auxiliary grounding grid

由图 6 可看出,在工频电流作用下,单向辅助接地网的散流更加均匀;在高频电流作用下,电流多流入接地网前端。这是因为镀锌钢接地体直径小,相对磁导率较大,当电流频率增加时,受趋肤效应影响增强,阻碍电流流向远端。此外,镀锌钢接地体有明

显的端部效应,在辅助接地网尾部和塔基顶部散流相对较多。由于屏蔽效应的影响,外延引线辅助接地网的连接点处散流最少。

4 土壤电阻率对接地网散流特性的影响

矿区进线段地形复杂多变,地质条件不一,土壤电阻率差异较大。为了最大限度地模拟地形和地质条件对接地电阻的影响,分别建立均匀土壤、分块土壤条件下的辅助接地网模型。在仿真软件中建立等值模型,设置土壤电阻率为 50~1 000 Ω·m,混凝土电阻率为 10 000 Ω·m,入地电流大小为 20 kA,入地电流频率分别为 50,5 000 Hz。通过仿真计算不采取任何降阻措施时的钢管塔塔基接地电阻,结果见表 4。

表 4 不采取任何降阻措施时的塔基接地电阻

Table 4 Tower foundation grounding resistances without any resistance reduction measures

土壤电阻率/(Ω·m)	塔基接地电阻/Ω	
	工频(50 Hz)	高频(5 000 Hz)
50	42.60	42.62
250	54.30	54.32
500	68.87	68.88
750	83.37	83.39
1 000	97.84	97.86

4.1 均匀土壤电阻率的影响

设置土壤电阻率 ρ 为 50,250,500,750,1 000 Ω·m,建立钢管塔塔基模型,外延引线长度为 45 m,辅助接地网长度为 40 m,垂直型接地网每段长度为 8 m,入地电流大小为 20 kA,入地电流频率分别为 50,5 000 Hz。计算不同土壤电阻率下的接地电阻,结果见表 5。

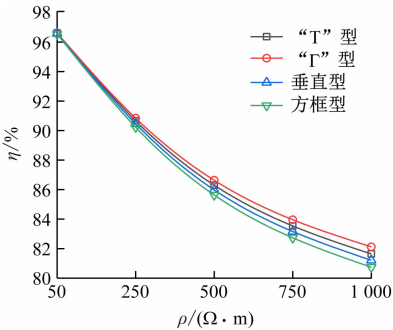
表 5 不同土壤电阻率下的接地电阻与降阻效率

Table 5 Ground resistances and resistance reduction efficiencies under different soil resistivities

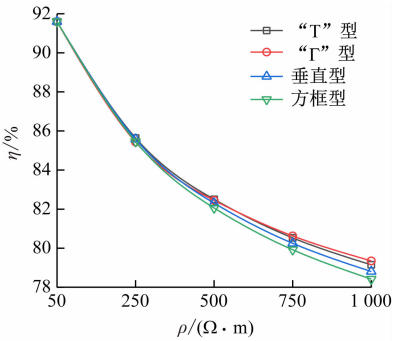
电流频率/Hz	辅助接地网	ρ=50 Ω·m		ρ=250 Ω·m		ρ=500 Ω·m		ρ=750 Ω·m		ρ=1 000 Ω·m	
		R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%	R/Ω	γ/%
50	“T”型	1.90	95.54	6.83	87.42	12.62	81.68	18.23	78.13	23.75	75.73
	“Γ”型	1.90	95.54	6.69	87.68	12.32	82.11	17.77	78.69	23.13	76.36
	垂直型	1.92	95.49	6.96	87.18	12.89	81.28	18.62	77.67	24.24	75.23
	方框型	1.94	95.45	7.09	86.94	13.12	80.95	18.95	77.27	24.67	74.79
5 000	“T”型	4.72	88.93	10.49	80.69	15.96	76.83	21.32	75.88	26.65	72.77
	“Γ”型	4.71	88.95	10.63	80.43	16.04	76.71	21.24	75.97	26.42	73.00
	垂直型	4.71	88.95	10.51	80.65	16.10	76.63	21.57	75.60	27.02	72.39
	方框型	11.53	78.77	10.80	80.12	10.54	80.60	10.48	80.71	10.45	80.76

由表 5 可知,随着土壤电阻率逐渐增大,单向辅助接地网的降阻效率逐渐降低。这是由于土壤电阻率增大,接地网向周围土壤散流的能力减弱。由于趋肤效应的影响,单向辅助接地网在工频电流作用下的降阻效率高于高频电流作用下的降阻效率。在土壤电阻率较小的情况下,4 种单向辅助接地网降阻效率差别不大;随着土壤电阻率增大,“Γ”型单向辅助接地网的降阻效果比其他 3 种单向辅助接地网好。在工频电流作用下,单向辅助接地网最大降阻效率达到 95.54%,降阻效果非常明显。

均匀土壤条件下的分流系数如图 7 所示。由图 7 可知,土壤电阻率较小时,4 种单向辅助接地网的分流系数大小基本没有差别;随着土壤电阻率增大,各种接地网分流系数逐渐减小,且减小趋势逐渐变缓。“Γ”型单向辅助接地网在土壤电阻率较大时的分流系数比其他 3 种接地网更大,这说明“Γ”型单向辅助接地网散流能力更好。从图 7 还可看出,工频电流作用下各种接地网的分流系数明显大于高频电流作用下的分流系数。最大分流系数约为 96.5%。在实际工程应用中,建议选用“Γ”型单向辅助接地网,以获得理想的降阻效果。



(a) 50 Hz 电流作用下的分流系数

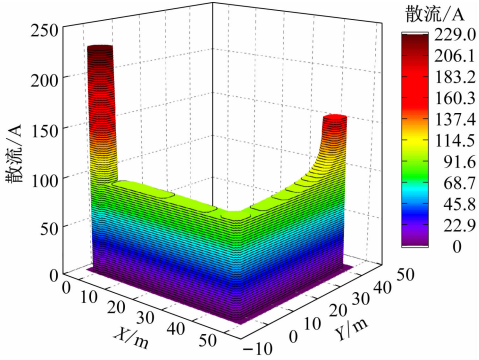


(b) 5 000 Hz 电流作用下的分流系数

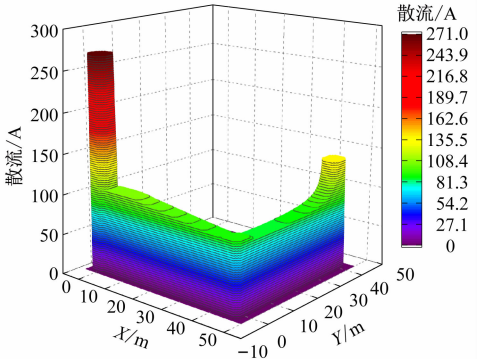
图 7 均匀土壤条件下的分流系数

Fig. 7 Shunt coefficients under uniform soil conditions

为了直观地看出“Γ”型接地网在电阻率较大情况下的散流过程,通过仿真计算得到土壤电阻率为 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 时外延辅助接地网的散流分布,如图 8 所示。



(a) 50 Hz 电流作用下的散流情况



(b) 5 000 Hz 电流作用下的散流情况

图 8 土壤电阻率为 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 时的散流分布

Fig. 8 Stray current distribution when soil resistivity is $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$

由图 8 可知,在土壤电阻率较大的条件下,镀锌钢接地体受端部效应的影响特别显著,辅助接地网终端及塔基处散流最多。由于土壤电阻大,屏蔽效应强,外延引线及辅助接地网中段向周围土壤散流较少,且散流比较均衡。与工频电流作用下的散流情况相比,在高频电流作用下,趋肤效应增强,不利于均衡散流,且屏蔽效应增强,辅助接地网与外延引线连接处散流少,更多电流在端部流至周围土壤中,单向辅助接地网终端散流减少。

4.2 分块土壤电阻率的影响

设置左侧土壤电阻率为 $250\,\Omega\cdot\text{m}$,右侧土壤电阻率 ρ_1 为 $50,250,500,750,1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$,建立分块土壤模型,如图 9 所示。设外延引线及辅助接地网参数与均匀土壤电阻率下的参数相同,计算分块土壤条件下的接地电阻与降阻效率,结果见表 6。

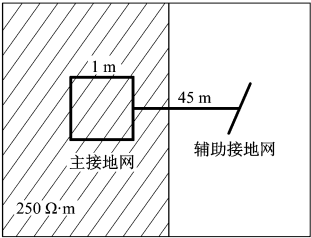


图 9 分块土壤模型

Fig. 9 Block soil model

表 6 分块土壤条件下的接地电阻与降阻效率

Table 6 Grounding resistances and resistance reduction efficiencies under block soil conditions

电流 频率/Hz	辅助 接地网	$\rho_1=50\ \Omega\cdot\text{m}$		$\rho_1=250\ \Omega\cdot\text{m}$		$\rho_1=500\ \Omega\cdot\text{m}$		$\rho_1=750\ \Omega\cdot\text{m}$		$\rho_1=1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$	
		R/Ω	$\gamma/\%$	R/Ω	$\gamma/\%$	R/Ω	$\gamma/\%$	R/Ω	$\gamma/\%$	R/Ω	$\gamma/\%$
50	“T”型	2.65	95.12	3.95	92.73	9.86	81.84	11.72	78.42	12.99	76.08
	“Γ”型	2.66	95.10	3.91	92.80	9.67	82.19	11.52	78.79	12.79	76.45
	垂直型	2.68	95.07	4.03	92.58	10.03	81.53	11.88	78.12	13.14	75.80
	方框型	2.72	94.99	4.10	92.45	10.18	81.25	12.04	77.83	13.29	75.53
5 000	“T”型	7.96	85.35	8.90	83.62	12.41	77.15	13.67	74.83	14.59	73.14
	“Γ”型	7.98	85.31	9.01	83.41	12.46	77.06	13.65	74.87	14.53	73.25
	垂直型	7.95	85.37	8.88	83.65	12.48	77.03	13.76	74.67	14.69	72.96
	方框型	7.94	85.38	8.88	83.65	12.55	76.90	13.86	74.49	14.79	72.77

由表 6 可知,右侧土壤电阻率越低,单向辅助接地网的降阻效果越好。工频电流作用下,最大降阻效率达到 95.12%,最小为 75.53%。因此,单向辅助接地网能够很好地解决钢管塔接地电阻较大的问题。从表 6 还可看出,“Γ”型单向辅助接地网的降阻效果最好,建议在实际工程中选用“Γ”型单向辅助接地网。

分块土壤条件下的分流系数见表 7。由表 7 可知,由于趋肤效应的影响,在高频电流作用下,镀锌钢材料的散流特性变差,不利于向周围土壤散流,因此工频电流作用下的分流系数大于高频电流作用下的分流系数。当右侧土壤电阻率为 50 Ω·m 时,辅助接地网分流作用最强,工频电流作用下,最大分流系数达到 96.85%。随着右侧土壤电阻率增加,分流系数逐渐减小。

表 7 分块土壤条件下的分流系数

Table 7 Shunt coefficients under block soil conditions

电流 频率/ Hz	辅助 接地网	分流系数				
		50 Ω·m	250 Ω·m	500 Ω·m	750 Ω·m	1 000 Ω·m
50	“T”型	96.85	95.29	87.98	85.63	84.02
	“Γ”型	96.83	95.33	88.22	85.88	84.26
	垂直型	96.80	95.19	87.77	85.41	83.81
	方框型	96.73	95.07	87.52	85.17	83.58
5 000	“T”型	90.81	89.57	84.73	83.04	81.83
	“Γ”型	90.73	89.38	84.69	83.08	81.91
	垂直型	90.82	89.58	84.62	82.91	81.69
	方框型	90.82	89.55	84.47	82.74	81.52

在实际工程应用中,应尽可能将辅助接地网铺设于土壤电阻率较小的区域或者对局部土壤采取换土措施,如将辅助接地网铺设于近水源的水沟、水塘、沼泽等区域(确保附近无人触及),或将外延引线铺设至路基两侧的低洼处、草地等,以进一步提高钢管塔辅助接地网的降阻效率。

5 结论

(1) 外延引线长度对进线段杆塔的接地电阻有显著影响。外延引线长度越大,降阻效果越好。在工频电流下外延引线长度超过 60 m 或在高频电流下外延引线长度超过 50 m 时,分流系数增大的趋势减缓,在工频电流作用下,降阻效率可以稳定在 85%以上。从实际工程经济性考虑,建议矿区钢管塔外延引线长度不超过 60 m。

(2) 单向辅助接地网可以明显降低钢管塔的接地电阻。“T”型、“Γ”型单向辅助接地网的分流作用最好,最大分流系数约为 92%。由于趋肤效应的影响,高频电流作用下单向辅助接地网的降阻效果变差,分流作用减弱。在实际工程应用中,建议采用“T”型或“Γ”型单向辅助接地网。

(3) 在均匀土壤条件下,“Γ”型单向辅助接地网的接地电阻最小,分流作用最好;在土壤电阻率较大区域,降阻效率在 75%左右;在土壤电阻率较小区域,降阻效率可以达到 95.5%。在分块土壤条件下,土壤电阻率较大区域辅助接地网降阻效率仍在 70%以上。在实际工程应用中,建议将辅助接地网铺设于土壤电阻率较小区域,或者对土壤电阻率较大区域进行局部换土措施,以提高辅助接地网的降阻效率。

参考文献(References):

[1] 高新智,仇炜,韩爱芝,等. 针对某 35 kV 配电线路防雷问题的探讨[J]. 高压电器,2010,46(4):69-73.
GAO Xinzhi, QIU Wei, HAN Aizhi, et al. Study on the lightning protection problem of 35 kV transmission and distribution line[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 69-73.

[2] 刘源,彭利强,王伟平,等. 配电网架空线路并联可调间隙保护装置研究[J]. 高压电器,2011, 47(4): 47-51.

LIU Yuan, PENG Liqiang, WANG Weiping, et al. Research on adjustable gap lightning protection device for distribution network overhead lines [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 47-51.

[3] 徐伟, 刘浔, 黄伟超. 基于 ATP-EMTP 的杆塔接地体冲击接地电阻计算模型[J]. 电力建设, 2010, 31(5): 22-25.

XU Wei, LIU Xun, HUANG Weichao. Computation model of impulse grounding resistance of grounding devices for transmission towers based on spark discharge equivalent radius [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(5): 22-25.

[4] 冯杰, 司马文霞, 杨庆, 等. 35 kV 变电站雷电侵入波特性的仿真与分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 89-91.

FENG Jie, SIMA Wenxia, YANG Qing, et al. Simulation and analysis of lightning invasion wave performance for 35 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 89-91.

[5] 潘欢, 沈璟, 陈锦麟. 某矿区电网进线段雷击事故分析及改造措施[J]. 工矿自动化, 2019, 45(4): 95-100.

PAN Huan, SHEN Jing, CHEN Jinlin. Lightning strike accident analysis and modification measures for incoming lines of power grid in a mining area[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 95-100.

[6] 陈锦麟, 高兴成, 周易龙, 等. 福建宁德大烟 35 kV 线路雷击断线事故分析及防雷措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2013, 136(6): 47-51.

CHEN Jinlin, GAO Xingcheng, ZHOU Yilong, et al. Analysis on lightning-caused breaking accidents and lightning protection measures of Dayan 35 kV line in Ningde Fujian Province [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013, 136(6): 47-51.

[7] 童年, 周易龙, 周利兵, 等. 某矿区变电站进线段防雷改造措施及仿真分析[J]. 工矿自动化, 2014, 40(4): 105-110.

TONG Nian, ZHOU Yilong, ZHOU Libing, et al. Lightning protection measures of inlet line of a mining area substation and its simulation analysis [J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(4): 105-110.

[8] 邓杰文, 任文斌, 张东, 等. 某矿区瓦斯电厂 35 kV 进线遭受雷击事故分析与防雷措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2012, 135(6): 81-85.

DENG Jiewen, REN Wenbin, ZHANG Dong, et al. Analysis and study on lightning accident and lightning protection measures of 35 kV inlet wire of gas power plant in mining area [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012, 135(6): 81-85.

[9] 李景丽, 张宇, 贺鹏威, 等. 复杂土壤结构对杆塔接地装置冲击特性影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2019, 142(2): 1-8.

LI Jingli, ZHANG Yu, HE Pengwei, et al. Analysis of the influence of massive texture soil model on impulse characteristic of ground device for pole and tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019, 142(2): 1-8.

[10] 潘文霞, 王兵, 全锐, 等. 典型特高压杆塔基础接地计算与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 679-685.

PAN Wenxia, WANG Bing, QUAN Rui, et al. Calculation and analysis of grounding body of typical tower foundation for UHV power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 679-685.