

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.021

表层块状土壤对接地网性能的影响研究

陶亚光¹, 肖怀硕², 林金涛³, 吕中宾¹, 杨晓辉¹, 李清泉⁴, 王津宇¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 国网冀北电力有限公司检修分公司, 北京 102488; 3. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021; 4. 山东大学电气工程学院, 济南 250061)

摘要:变电站的建设会改变原始地基表层一定区域内的土壤,为研究表层块状土壤对接地网性能的影响,优化接地网的接地性能。文中运用CDEGS软件仿真了大面积表层块状土壤产生的跨步电压二次峰值现象,针对表层块状土壤的各种参数,研究了块状土壤长度 L 、边缘坡度 $\tan\theta$ 、电阻率 ρ 等因素对跨步电压二次峰值的影响;在此基础上,搭建了接地模拟试验系统,改良了以往的琼脂冻体使用方法,验证了以琼脂冻体模拟表层块状土壤的可行性,并对块状土壤电阻率、土壤尺度等参量对跨步电压二次峰值的影响进行了模拟试验。结果表明:大面积低阻率的表层块状土壤在降低接地电阻的同时,也造成站外出现跨步电压的二次峰值;该二次峰值受块状土壤的长度和电阻率影响很大,块状土壤长度越长、电阻率越大,电压峰值就越低;块状土壤的尺度越大,改变土壤电阻率所带来的二次峰值降低效果越好。实际的变电站建设中可使土石方工程的边缘形成较小的坡度以减少实际工程量、节约投资,具有一定的工程指导意义。

关键词:块状土壤;跨步电压二次峰值;CDEGS;接地模拟试验;琼脂冻体

Effect of Surface Massive Soil on Property of Grounding Grid

TAO Yaguang¹, XIAO Huaishuo², LIN Jintao³, LYU Zhongbin¹, YANG Xiaohui¹,
LI Qingquan⁴, WANG Jinyu¹

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. State Grid Jibei Electricity Power Maintenance Company, Beijing 102488, China; 3. Weifang Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Shandong Weifang 261021, China; 4. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To study the effect of surface massive soil on the property of a grounding grid and optimize the grounding performance, the software CDEGS is used to simulate the secondary peak of step voltage generated by the surface massive soil. The effects of the surface massive soil parameters, such as the soil length L , the edge gradient $\tan\theta$, and the resistivity ρ , on the secondary peak voltage are analyzed. Then, a grounding simulation test system is established, the application method of agar gel is improved, and the feasibility of simulating surface massive soil with agar gel is verified. The influences of the resistivity and soil scale on the secondary peak of step voltage is simulated, and the results show that: 1) the large area of surface massive soil with low resistivity can reduce the grounding resistance, and cause the secondary peak of step voltage outside the substation at the same time; 2) this secondary peak has obvious negative relation with the soil length and the resistivity; 3) the larger the scale of the massive soil, the more significant the reduction of the secondary voltage peak via changing the soil resistivity. So in actual construction of substation, the edge of earthwork should be processed to form a smaller slope to reduce actual work amount and save investment.

Key words: massive soil; secondary peak of step voltage; CDEGS; grounding simulation test; agar gel

0 引言

土壤状况是变电站接地网安全性能的主要影响因素^[1-4]。为了准确分析土壤对接地网性能的影响,建立尽可能符合变电站区域土层实际情况的土壤模型十分重要^[5-13]。在变电站的实际建设过程中,出于地势平整的考虑,通常会对原有的地基进行处理,相关的挖方和回填工作会使站址表层一定区域的土壤发生改变,这在高土壤电阻率地区和核电站区域十分重要。这种情况下的土壤结构与传统的垂直分层或者水平分层不同,呈现出一种存在于表层的块状土壤结构^[14-18]。

在对表层块状土壤问题的研究上,文[19]中 Nahman 等人采用有限元法研究了变电站区域局部的不均匀土壤对变电站接地网性能的影响,并分析了局部不均匀土壤的电阻率、长度、范围等因素对地网性能的影响,研究局限在局部土壤范围相对较小、电阻率较高的情况下,且以仿真为主,缺乏实验证明。文[20]探讨了小面积低电阻率土壤块对变电站接地网性能的影响,指出了小面积的低电阻率土壤块会抬高局部的地电位,导致区域边缘的跨步电压出现突变,该文仍以数值计算为主。文[21]提出了一种水平多层土壤包含块状土壤问题的数值解法,其中 Fortin 等人进行了一次大面积低电阻率的人工土壤层的接地网大型实验,揭示了当表层低电阻率土壤面积大于地网面积时,在变电站外会出现跨步电压二次异常升高的现象,由于实验本身的复杂性,没有对这种现象进行更多的探讨。

某些 220 kV 的变电站故障时就能在站外产生几百伏的跨步电压,而随着变电站电压等级的越来越高以及土地资源的愈加紧张,对站外跨步电压值的关注是十分有必要的。且以往对表层块状土壤的研究多集中在块状土壤覆盖面积较小的情况下,比如站内某些湿土层或者水池,对大面积低电阻率表层土壤的研究不够,且以数值计算为主,实验研究较少。而对这种情况下产生的跨步电压二次峰值现象,相关的研究更为不足,迫切需要对其成因和影响机理做更多仿真与试验研究。

针对以上问题以及现有研究的不足之处,文中研究了大面积的表层土壤长度、坡度、电阻率等因素对地网性能的影响;并在实验室条件下搭建了接地模拟实验系统,以琼脂冻体模拟表层块状土壤,实现了实验室环境下块状土壤多参量对跨步电压二次峰值(假定人体电阻为无穷大时的开路电压)的影响测量。

1 表层块状土壤的仿真模型

1.1 仿真模型建立

当研究的接地网与土壤块面积不是特别大时,结合矩量法与间接边界元法的 CDEGS 在该问题的计算中所得结果较为准确。

为了对比分析大面积与小面积人工土壤层,构建的接地网模型见图 1,图 1 中所示为俯视图和侧视图。具体参数如下:接地网面积为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$,模型网孔为 10×10 ,纵横方向各有 11 根导体,每根导体长 100 m ,分 10 段,每段 10 m ,埋深 0.8 m ;接地导体直径 5 mm ,电阻率取 $1.78 \times 10^{-7}\text{ W} \cdot \text{m}$,相对磁导率 200。其中,外部土壤电阻率为 $300\text{ W} \cdot \text{m}$,内部土壤电阻率为 $30\text{ }\Omega \cdot \text{m}$;大面积人工土壤层面积为 $140\text{ m} \times 140\text{ m}$,厚度 1 m ;小面积人工土壤层为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,厚度 1 m 。

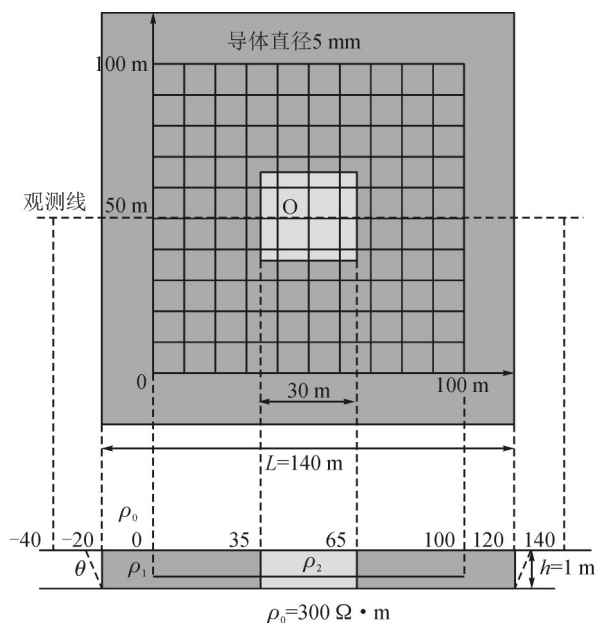


图1 地网模型与表层土壤

Fig. 1 Ground network model and surface soil

1.2 模型产生的跨步电压二次峰值现象

设定块状土壤的电阻率 $\rho_1 = 30\text{ }\Omega \cdot \text{m}$,在 O 点注入 10 kA 的故障电流,计算块状土壤面积较小、无块状土壤、块状土壤面积较大时的跨步电压,以 $y=50\text{ m}$ 为观测线,所得跨步电压 U_{step} 随表层块状土壤的变化见图 2。

图 2 说明了变电站内小面积的低电阻率人工土壤层会降低局部的跨步电压,这是因为在同样的电流下低电阻率土壤使得测量点之间的电位差值减小,使得该区域跨步电压减小,同时也说明了局部的低阻率表层土壤对地网整体的安全性能影响不大。

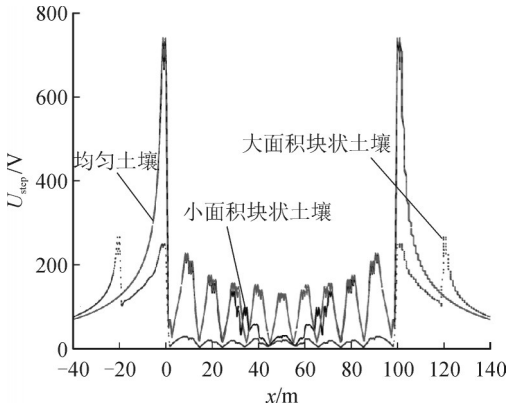


图2 不同面积块状土壤下的跨步电压对比

Fig. 2 Comparison of step voltage in massive soil of different area

然而大面积的人工土壤层展现出不一样的影响结果。尽管大面积的低阻率土壤大大降低了跨步电压峰值的数量级,但从图2中能明显看到在接地网边缘 $x=0$ m和 $x=100$ m处出现跨步电位峰值,这一点与以往的工作吻合,即发变电站接地系统的最大跨步电压出现在接地网网格边缘。另外,大面积的表层土壤拉低了地网内的跨步电位差,其原理与小面积时类似;最值得注意的是跨步电位在变电站接地网外 $x=-20$ m和 $x=120$ m出现二次峰值,这个现象说明了大面积低阻率的表层块状土壤层是跨步电压二次峰值出现的主要原因,此时只注意站内的安全措施是不够的,还要注意加强站外的安全保障措施。

2 块状土壤各参量对跨步电压二次峰值影响

在采用边界元法来计算表层块状土壤的问题时,需要把大面积的块状土壤表面细分成小的面元。面元的划分精度越高、面元数越多,计算结果就越准确,相应的计算量就越大。仿真过程中发现以尽可能大的面元数计算就能得到相对准确的结果。

对块状土壤的计算,使用自适应算法中的阈值算法,以面元面积和电阻率比率作为优先标准。仿真中设置尽可能小的阈值参数以获得相对准确的结果。

假设周围土壤电阻率不变,采用控制变量法,探讨大面积块状土壤的各个参数:表层土壤的长度 L 、深度 h 、斜坡角度 $\tan\theta$ 、电阻率 ρ 等因素对地表面跨步电压二次峰值以及相应接地电阻的影响。

2.1 长度 L 对跨步电压和接地电阻的影响

假设周围土壤电阻率 $\rho_0=300\ \Omega\cdot\text{m}$,表层土壤电阻率 $\rho_1=30\ \Omega\cdot\text{m}$,深度 $h=1$ m,改变长度 L : 120、140、160 m,对应的观测线上的跨步电压变化见图3,接

地电阻变化见表1。

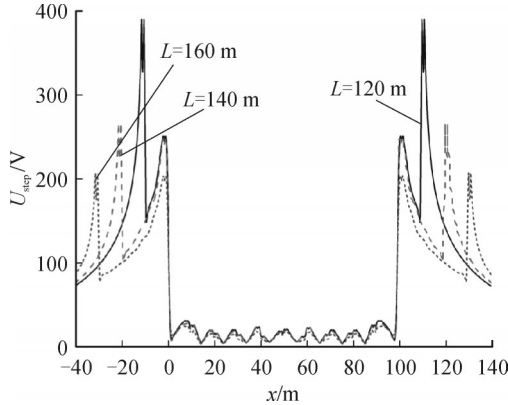


图3 跨步电压随长度 L 的变化

Fig. 3 The change of step voltage with length L

表1 块状土壤不同参量下的最大地电位升 GPR_{max} 和接地电阻

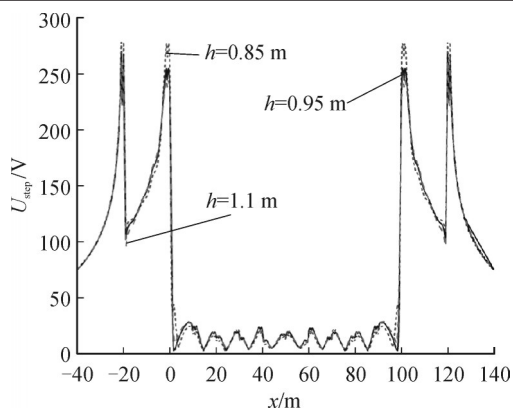
Table 1 The maximum potential rise and the ground resistance under different parameters of massive soil

影响因素		$GPR_{\text{max}}/\text{V}$	接地电阻/ Ω
长度	$L=120\text{ m}$	11 984.65	1.198 465
	$L=140\text{ m}$	11 529.62	1.152 962
	$L=160\text{ m}$	10 985.42	1.098 542
深度	$h=0.85\text{ m}$	12 014.67	1.201 467
	$h=0.95\text{ m}$	11 529.62	1.152 962
	$h=1.10\text{ m}$	11 493.23	1.122 057
坡度	$\tan\theta=1$	11 490.13	1.149 013
	$\tan\theta=3$	11 522.30	1.152 230
	$\tan\theta=\infty$	11 529.62	1.152 962
电阻率	$\rho_1=10\ \Omega\cdot\text{m}$	10 866.99	1.086 699
	$\rho_1=30\ \Omega\cdot\text{m}$	11 529.62	1.152 962
	$\rho_1=100\ \Omega\cdot\text{m}$	12 570.81	1.257 081

从图3可看出,长度 L 变化时,跨步电压二次峰值出现的位置也随之变化,这是因为低阻率人工土壤使得边缘内部电势升高,而边缘外电势相对较低,导致跨步电位差出现二次峰值即二次峰值总出现在土壤电阻率突变处;另外,跨步电位的二次峰值也随着长度 L 的增大而缩小,这跟整体的接地电阻降低、地电位下降有关。

2.2 深度 h 对跨步电压和接地电阻的影响

假设周围土壤电阻率 $\rho_0=300\ \Omega\cdot\text{m}$,表层土壤电阻率 $\rho_1=30\ \Omega\cdot\text{m}$,地网埋深0.8 m,范围 $L=140$ m。考虑实际工程中变电站土石方工程的限制,改变深度 h : 0.85、0.95、1.1 m对应的观测线上的跨步电压变化见图4,接地电阻变化见表1。

图4 跨步电压随深度 h 的变化Fig. 4 The change of step voltage with depth h

从图4可看出:随着块状土壤深度的增加,跨步电压的一次峰值和二次峰值稍有降低,说明深度的轻微变化对跨步电压的二次峰值影响很小。所以在文中之后的试验中不再对块状土壤深度做更多讨论。另外,表1的结果显示深度所造成的接地电阻变化要小于长度的影响,这就说明了跨步电压二次峰值虽受接地电阻影响,但是关系并不是很大。

2.3 坡度对跨步电压和接地电阻的影响

坡度为放坡开挖中边坡坡面与水平面的角度。假设周围土壤电阻率 $\rho_0=300 \Omega \cdot m$,表层土壤电阻率 $\rho_1=30 \Omega \cdot m$,地网埋深0.8 m,范围 $L=140$ m,土壤深度 $h=1$ m,改变坡度 $\tan\theta:\infty, 0.3, 0.1$ 对应的观测线上的跨步电压变化见图5。

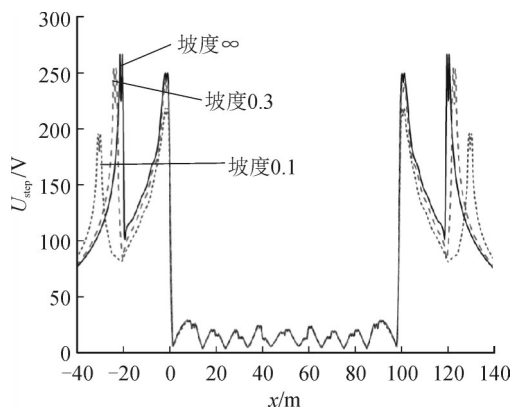


图5 跨步电压随坡度的变化

Fig. 5 The change of step voltage with slope

从图5可看出,坡度变化较小时对跨步电压的一次峰值、二次峰值影响都很小,只有当坡度很小即表层土壤上表面长度很大时二次峰值才有显著降低,这一点的原理类似于长度 L 的变化。

2.4 电阻率对跨步电压和接地电阻的影响

假设周围土壤电阻率 $\rho_0=300 \Omega \cdot m$,地网埋深0.8 m,范围 $L=140$ m,土壤深度 $h=1$ m,坡度 ∞ ,改变表层土壤电阻率 $\rho_1: 10, 30, 100 \Omega \cdot m$,对应的观测线上的跨步电压变化见图6,接地电阻变化见表1。

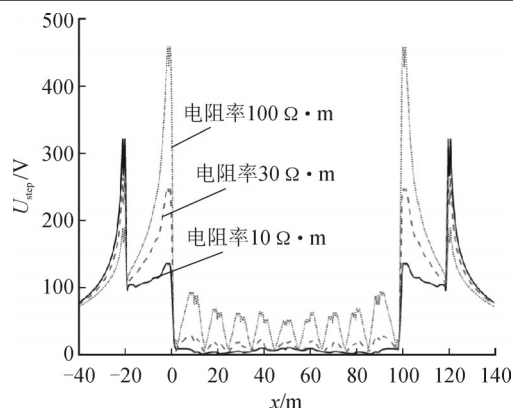


图6 跨步电压随电阻率的变化

Fig. 6 The change of step voltage with resistivity

从图6可看出,随着表层土壤电阻率的增大,跨步电位差的一次峰值增大、二次峰值减小,呈现出一种相反的变化趋势,这是因为在同样故障电流下,接地电阻的增大导致表层土壤内部的跨步电位差增大,而表层土壤覆盖区域整体的地电位是降低的,因而二次峰值降低。另外,块状土壤电阻率增大在降低跨步电压二次峰值的同时也增大了接地电阻。

总之,结合工程实际,以上一系列的仿真结果表明可以尝试从表层块状土壤长度、块状土壤边缘坡度、块状土壤电阻率等角度来降低跨步电压的二次峰值。

3 接地模拟试验

3.1 试验平台与试验方法

在接地模拟试验时,为了尽可能减少电解槽槽壁对接地网模型电流场分布的影响,金属内壁电解槽的半径应大于两倍接地网模型的对角线。在参照文[22-23]中对接地模拟试验系统介绍以及参数选择上,该研究拟使用琼脂和水模拟土壤介质。

用自来水来模拟下层均匀土壤,用琼脂冻体来模拟表层块状土壤。经测量仪测量后,所用自来水的电导率约为 $898 \mu S/cm$,即电阻率 $11.13 \Omega \cdot m$ 。考虑到实验期间温度变化不大,可以认为电阻率不变。

而对要模拟的表层块状土壤,在琼脂冻体的制作过程中,应先将一定量的NaCl溶解于水中,之后加入一定量的琼脂粉搅拌均匀,然后加热,将热的混合溶液倒入一个定做好的模具里。地网模型事先用直径0.8 mm棉线固定在模具中,模型在模具中的相对位置可以借此调节,混合溶液冷却后即可得到模拟表层块状土壤的琼脂冻体,此时地网模型被固定在冻体中。试验中使用的琼脂粉与水的质量比为3.5:100,此时成型的琼脂冻体就具有一定的强

度,在金属水箱中用棉线吊起地网模型后琼脂冻体的完整性不会被破坏。适当调节金属水箱中水面的高度以使水面刚好与琼脂冻体的上表面平齐,从而模拟实现表层块状土壤与均匀土壤。

在此基础上,文中设计了见图7(a)所示的接地模拟试验系统,主体由隔离变压器、调压器和电解槽组成。其中金属水箱长宽高为114 cm×114 cm×30 cm;模型比例尺取为100,所使用的地网模型的尺寸为20 cm×20 cm,网格数为4×4,导体直径2 mm,埋深0.8 cm。

结合文[24]对成型琼脂冻体电阻率的探讨,试验中可以对琼脂冻体的电阻率做出相对准确的调节。进行试验时首先制作低电阻率的琼脂冻体,取水、NaCl和琼脂粉质量比为100:0.42:3.5,成型琼脂冻体电阻率约为0.95 Ω·m。

第1步在模具中制作长宽为26 cm×26 cm、厚度为1 cm的琼脂以模拟长宽26 m×26 m、深度1 m的表层块状土壤,其中地网模型导体中心位于琼脂深0.8 cm处。于中心O点注入5 A故障电流,考虑到对称性的存在,为减少试验的复杂程度,只测量了O点左侧关键区域的地电位进而得到跨步电压分布,见图7(b)。所用测量探针直径2 mm,深入水面1 mm,试验中从 $x=42$ cm开始,每隔0.1 cm取一个点,直至 $x=50$ cm,共81个点。按标准取正常人跨步1 m,在试验中定义点 x_0 处的跨步电压 U_{Step} 为距离该点前后0.5 cm处地表电位 $U_{x_0+0.5}$ 、 $U_{x_0-0.5}$ 的差值,即

$$U_{\text{Step}} = U_{x_0+0.5} - U_{x_0-0.5} \quad (1)$$

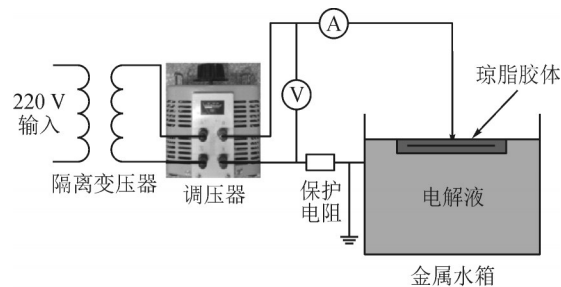
第2步修整26 cm×26 cm的琼脂冻体尺寸为23 cm×23 cm,重复第1步中的测量过程。

其次制作电阻率相对较高的琼脂冻体,分别取水、NaCl和琼脂粉质量比为100:0.16:3.5、取水、NaCl和琼脂粉质量比为100:0.09:3.5,成型琼脂冻体电阻率约为1.96 Ω·m和3.75 Ω·m,重复之前的过程。

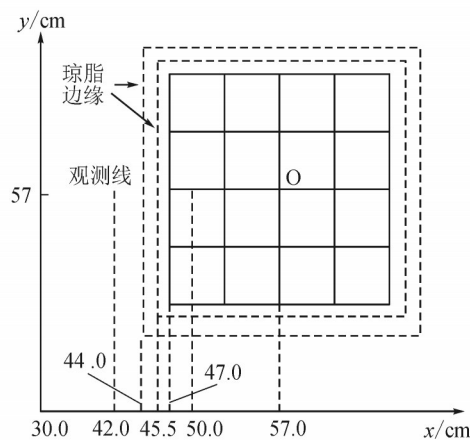
3.2 试验结果分析

整理实验数据,从而得出如图8所示的不同电阻率琼脂冻体跨步电压分布曲线以及表2所示的接地电阻。

图8的结果说明,跨步电压的二次峰值多出现在琼脂边缘,即表层块状土壤的边缘。同时,两图中电压分布曲线随电阻率的变化也说明了提高表层块状土壤的电阻率有助于降低跨步电压的二次峰值。但是对比图8(a)、(b)的结果可以得出,这种二次峰值的降低在琼脂尺度较小时效果并不明显,即在表层块状土壤面积稍大时处理回填土壤才能



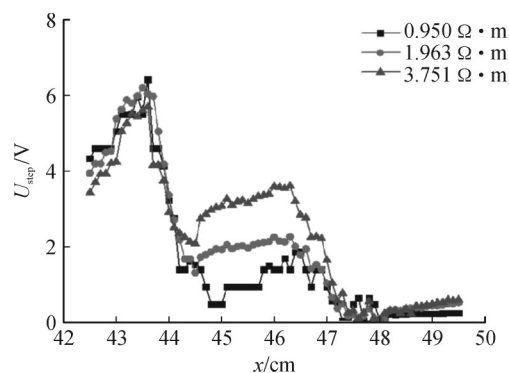
(a) 试验平台



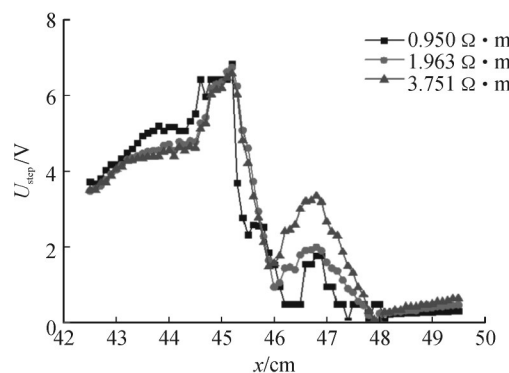
(b) 测量线与琼脂、地网

图7 跨步电压随电阻率的变化

Fig. 7 The change of step voltage with resistivity



(a) 琼脂冻体尺寸为26 cm×26 cm时跨步电压随琼脂电阻率的变化



(b) 琼脂冻体尺寸为23 cm×23 cm时跨步电压随琼脂电阻率的变化

图8 不同尺寸琼脂下跨步电压随琼脂电阻率的变化

Fig. 8 The change of step voltage with agar resistivity in different sizes of agar

表2 不同尺寸琼脂下接地电阻随琼脂电阻率的变化
Table 2 The change of grounding resistance with agar resistivity in different sizes of agar

琼脂尺寸/cm	琼脂电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	接地电阻/ Ω
26×26	0.95	10.03
	1.96	10.35
	3.75	10.86
23×23	0.95	10.39
	1.96	10.73
	3.75	10.97

起到较好的降压效果。

表2接地电阻随琼脂电阻率的增大而增大,随琼脂尺寸的增大而减小,但是二次峰值却均有所降低,说明了盲目追求接地电阻的降低反而不利于接地网性能的改善,实际应用中应该灵活应用。

为研究坡度的影响,可以在第1步与第2步之间修整上下表面为26 cm×26 cm的琼脂冻体下表面尺寸为23 cm×23 cm,从而形成一定坡度,重复之前的测量,得出如图9所示跨步电压随电阻率为1.96 $\Omega \cdot \text{m}$ 的琼脂尺寸变化的曲线以及表3所示的接地电阻。

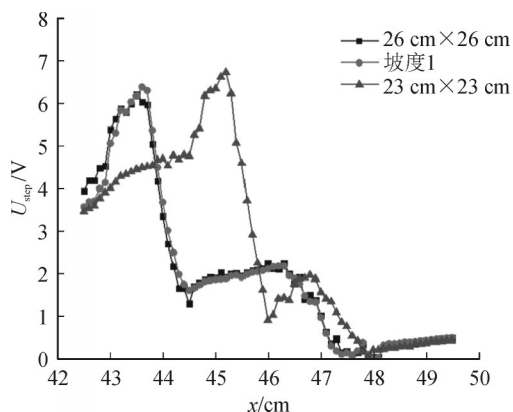


图9 跨步电压随琼脂尺寸的变化

Fig. 9 The change of step voltage with agar sizes

表3 不同尺寸琼脂下接地电阻的变化

Table 3 The changes of grounding resistance in different sizes of agar

琼脂尺寸/cm	26×26	上表面26×26 下表面23×23	23×23
接地电阻/ Ω	10.35	10.49	10.73

从图9的电压分布曲线可以看出,形成一定坡度的琼脂冻体所产生的跨步电压二次峰值出现在琼脂的上层边缘处,与26 cm×26 cm琼脂跨步电压的二次峰值位置近似;且该二次峰值比23 cm×23 cm的琼脂冻体对应的二次峰值要小,即表层块状土壤

导致的跨步电压二次峰值总出现在块状土壤的最边缘处;其次,块状琼脂边缘形成的坡度有效降低了跨步电压的二次峰值,即坡度的存在起到了跟扩大块状土壤范围类似的效果,具有一定的实际意义。

4 分析与讨论

对比仿真和试验结果:CDEGS仿真计算得出的跨步电压在每个峰值附近会有两个极大值,而试验测量的结果中一般只有一个。这是因为仿真计算中某一点跨步电压定义为该点与距离该点一步之外点的电位差值,且按照球形内最大电位计算;而该研究的试验测量中按国内标准取跨步1 m,定义某点的跨步电压为该点前后0.5 m处两点的电位差值,因此极大值只有一个,这种数据处理上的不同对跨步电压最大值没有影响,对该研究的试验分析影响不大

试验中测量了长度为26 cm和23 cm的琼脂冻体下的跨步电压分布。其中,跨步电压二次峰值出现的位置总是在琼脂边缘处,这一点与仿真结果较为吻合,即二次峰值总出现在不同电阻率土壤分界面附近;另外,试验中琼脂电阻率的变化对跨步电压的影响并没有仿真中那么大,一方面是因为小型化的接地模拟试验对跨步电压有一定限制,另一方面也说明了变电站局部换土的效果并不是十分理想。接地电阻的变化说明增大地网面积、增加地网埋深、引外接地等降低接地电阻的措施也可以用于降低跨步电压的二次峰值。

试验中制作了边缘具有一定坡度的琼脂冻体,与仿真中坡度改变时的降压效果相比比较明显,这跟小型化的试验模型有一定关系。同时,坡度的存在对接地电阻影响不大,实际工程中可以应用这一点以减少工程中的土方工程量、节约投资。

5 结论

文中对大面积表层块状土壤产生的跨步电压二次峰值现象(假定人体电阻为无穷大时的开路电压)进行了仿真与试验研究,所得成果在高土壤电阻率地区、水电站区域或者敷设导体金属板时应用性较强。研究所得出的结论如下:

1)研究揭示了大面积的低阻率块状土壤是跨步电压二次峰值出现的主要原因。

2)增加表层块状土壤的长度能降低跨步电压的二次峰值和接地电阻;增大块状土壤的电阻率也能降低跨步电压峰值,但会增大接地电阻。

3)试验所得结果证明了采取琼脂冻体模拟表层块状土壤是可行的,能够用于以后多层次的接地模拟试验。

4)在实际的工程应用中可以扩大施工动土范围、处理回填土壤来应对跨步电压二次峰值。

5)进行变电站的土石方工程时可以在施工边缘形成较小的坡度,既可以降低站外事故发生的风险,又能减少工程中的挖方填方量、节约投资。

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] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007:367-368.
HE Jinliang, ZENG Rong. Power system grounding[M]. Beijing:Science Press, 2007:367-368.
- [3] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
LIN Fuchang. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [4] HAJIABOLI A, FORTIN S, DAWALIBI F P. Numerical techniques for the analysis of HVDC sea electrodes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6):5175-5181.
- [5] VISACRO S, ALIPIO R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 927-934.
- [6] 司马文霞,李晓丽,袁涛. 考虑土壤非线性特性的接地网冲击特性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16):127-132.
SIMA Wenxia, LI Xiaoli, YUAN Tao. Analysis of grounding grid impulse characteristics in frequency domain inconsideration of soil non-linear characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 127-132.
- [7] 苏磊,王丰华,王劭菁,等. 基于试验分析的变电站接地网冲击特性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(9):98-102.
SU Lei, WANG Fenghua, WANG Shaojing, et al. Experimental analysis on impulse characteristics of substation grounding grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):98-102.
- [8] 陶亚光,李天娇,田野,等. 不同土壤分层结构下接地网性能的差异计算[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(4):103-109.
TAO Yaguang, LI Tianjiao, TIAN Ye, et al. Difference calculation of grounding grid performance under different soil layered structures[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2017, 47(4): 103-109.
- [9] 张曾,文习山. 任意块状结构土壤中接地的边界元法分析[J]. 电网技术, 2010, 35(9):170-174.
ZHANG Zeng, WEN Xishan. Boundary element analysis on grounding systems in soil with arbitrary massive texture[J]. Power System Technology, 2010, 35(9): 170-174.
- [10] 苏杰,吴广宁,周炜明,等. 异质土壤对地网接地电阻的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(9):166-169.
SU Jie, WU Guangning, ZHOU Weiming, et al. Effects of heterogeneous soil on grounding resistance of grounding mesh[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 166-169.
- [11] 潘文霞,刘铜锤,王兵,等. 分层土壤任意块状基础的接地计算方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7):145-151.
PAN Wenxia, LIU Tongchui, WANG Bing, et al. Grounding computation method for layered-soil with arbitrary massive texture foundation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 145-151.
- [12] 赵志斌,崔翔,张波,等. 多层土壤中含有不同电阻率块状媒质时的接地网分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9):218-223.
ZHAO Zhibin, CUI Xiang, ZHANG Bo, et al. Analysis of grounding systems in multi-layer soil with finite volumes of different resistivities[J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(9): 218-223.
- [13] 谭波,杨建军,文习山,等. 高土壤电阻率地区大型水电站接地系统设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(10):2485-2490.
TAN Bo, YANG Jianjun, WEN Xishan, et al. Safety design principle of grounding system in large hydropower station in the area of high soil resistivity[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2485-2490.
- [14] 何为,张瑞强,杨帆,等. 变电站内水平多层土壤参数反演[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33):5964-5973.
HE Wei, ZHANG Ruiqiang, YANG Fan, et al. Parameter estimation of horizontal multi-layer earth in substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5964-5973.
- [15] PEREIRA W, SOARES M, MARTINS N L. Horizontal multilayer soil parameter estimation through differential evolution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(2): 622-629.
- [16] 潘卓洪,张露,刘虎,等. 多层水平土壤地表电位分布的仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(1):116-123.
PAN Zhuohong, ZHANG Lu, LIU Hu, et al. Simulation and analysis of earth surface potential distribution in horizontal multi-layer soil[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 116-123.
- [17] 郭卫,黄文武,文习山,等. 应用快速多极子边界元法的块状土壤结构地网接地参数算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9):1436-1445.
GUO Wei, HUANG Wenwu, WEN Xishan, et al. A study of grounding parameters of grounding grid in soil with massive

- texture by using fast multipole boundary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1436-1445.
- [18] 文习山, 郭婷婷, 吴小东, 等. 基于边界元法的江河湖泊对直接地极设计的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3868-3874.
- WEN Xishan, GUO Tingting, WU Xiaodong, et al. Influence of rivers and lakes on DC ground Pole design based on boundary element method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3868-3874.
- [19] NAHMAN J, PAUNOVIC I. Effects of the local soil nonuniformity upon performances of ground grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2180-2184.
- [20] LIU Jie, DAWALIBI F P, MITSKEVITCH N, et al. Realistic and accurate model for analyzing substation grounding systems buried in various backfill material[C]//2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S. l.]: IEEE, 2014: 1-6.
- [21] FORTIN S, MITSKEVITCH N, DAWALIBI F P. Analysis of grounding systems in horizontal multilayer soils containing finite heterogeneities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5095-5100.
- [22] GOUDA O E, EL DEIN A Z. Ground potential rise of faulty substations having equal and unequal spacing grounding grids conductors[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(1): 18-26.
- [23] 许 军, 蓝 磊, 文习山, 等. 三峡电站模型地网接地电阻小比例模型试验研究[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 38-40.
- XU Jun, LAN Lei, WEN Xishan, et al. Small-scale model test for grounding resistance of grounding mesh model for three gorges hydroelectric power station[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 38-40.
- [24] WEBSTER J G. Electrical impedance tomography[M]. London: Institute of Physics Publishing, 1990.
- 陶亚光(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统接地技术。
- 李清泉(1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为气体放电、高电压与绝缘技术(通讯作者)。

(上接第148页)

- pipe in large space and its numeric analysis[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(2): 43-46.
- [20] 陈彦君, 李元阳, 刘振华. 基于多相流模型的腔体内纳米流体自然对流换热数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(5): 600-607.
- CHEN Yanjun, LI Yuanyang, LIU Zhenhua. Experiment on heat exchange with natural convection over horizontal circular pipe in large space and its numeric analysis[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 49(5): 600-607.
- [21] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 17-24.
- ZHANG Guansheng. Basis theory of electric appliance[M]. Beijing: China Machine Press, 1989: 17-24.
- 张宇娇(1979—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备及电磁装置多物理场耦合数值分析及机辅设计。
- 郭桂炜(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁及多物理场耦合研究。
- 黄雄峰(1980—), 男, 博士, 研究方向为电力设备及电磁装置多物理场耦合研究、网络化控制系统。