

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.024

复杂土壤结构对HVDC系统单极大地运行的地电位分布影响

张俊^{1,2}, 曹晓斌¹, 金炜东¹, 张思渊³, 张彼德⁴, 张榆⁵

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 国网四川省电力公司甘孜供电公司, 四川 甘孜 626099;
3. 西南电力设计院有限公司, 成都 610021; 4. 西华大学电气与电子信息学院, 成都 610051;
5. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041)

摘要: 高压直流(HVDC)输电系统接地极引起的地电位和电场分布,受土壤分层结构的影响,而接地极选址面临复杂土壤结构的背景。因此研究土壤结构中各种因素对地电位和电场分布规律的影响,将有助于改善其分布情况。文中以研究格林函数的微分方程和电位行波的反反射传播方式为方法入口,得到分层土壤结构下存在的振荡衰减函数,提取出电荷积累效应矩阵用于表示积累电荷再分布的振荡衰减过程,获得电位分布在水平、垂直和复合土壤结构下对土壤层厚度 S ,反折射率 k 和电流源位置 h 的表现差异。得出反折射率是影响振荡衰减过程的主要和持续因素,土壤层厚度是次要且持续因素,位置是初始且短暂因素。指出复合土壤结构中电位分布是垂直和水平电荷积累效应的相互影响,其斜方向的等效距离点为两者相互影响效果,土壤层厚度和综合反射率分别以距离函数和等效电荷方式影响衰减速度。最后根据某直流输电工程接地极地质勘测与季节变化情况,构成复杂土壤结构,并考虑接地极位置、土壤层厚度和土壤电阻率三大影响因素,模拟分析了极址5~25 km范围的地电位和电场分布规律。

关键词: 高压直流输电; HVDC 接地极; 地电位分布; 复合分层土壤; 积累电荷

Influence of Complex Soil Structure on Ground Potential Distribution as Monopolar Operation of HVDC Systems

ZHANG Jun^{1,2}, CAO Xiaobin¹, JIN Weidong¹, ZHANG Siyuan³, ZHANG Bide⁴, ZHANG Yu⁵

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Ganzi Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Co., Ltd., Sichuan Ganzi 626099, China; 3. Southwest Electric Power Design Institution, CPECC, Chengdu 610021, China; 4. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610051, China; 5. Electric Power Research Institution of State Grid Sichuan Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The distribution of ground potential and electric field due to the grounding electrodes of high voltage direct current (HVDC) transmission system influenced by soil stratification, while the selection of grounding electrode sites must account for complex soil structures. Therefore, the study of the influence of various of the soil structure on the ground potential and electric field distribution will be helpful for improving its distribution. In this paper the differential equations for the Green function and the propagation mode of refracted and reflected potential travelling waves are employed as the methodological entry point, the oscillatory attenuation function present in soil stratification are obtained and the matrix shown on accumulating electric charge is extracted to represent the oscillatory attenuation process of accumulated charge redistribution, which reveals how the potential distribution responds differently to soil layer thickness (S), the k -ratio and current source position (h) across horizontal, vertical and composite structures of soil. It is concluded that the k -ratio is the primary and persistent factor, the S is a secondary yet persistent factor, and the source location is an initial but transient factor influencing the oscillatory attenuation process. It is pointed out that the potential distribution in the composite soil structure is the mutual influence of vertical and hori-

收稿日期:2025-09-08; 修回日期:2025-11-10

基金项目:国家自然科学基金(51777175)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51777175).

zontal charge accumulation effect, the equivalent distance at its oblique direction is the result of the mutual effect of them. The soil layer thickness and comprehensive reflectivity influence the attenuation speed in the form of distance function and equivalent charge. Finally, based on the geological survey and seasonal variation data of an HVDC projects' s grounding electrode site, a complex soil structure is constructed. Considering three major influencing factors-electrode location, soil layer thicknes, and soil resistivity, a simulation analysis is conducted on the distribution of ground potential and electric field within 5-25 km range from the electrode site on grounding-electrode site.

Key words: high voltage DC transmission; HVDC grounding electrode; ground potential distribution; comprehensive layer soil; accumulation of electric charge

0 引言

HVDC输电形式因其独特的优势,在跨区域长距离输电方面,在区域大电网互联方面得到了广泛的应用^[1-2]。目前中国西电东送的大趋势已基本形成,形成多条由西南水电基地通过HVDC直接送往东部沿海地区的通道,缓解了中国电力资源与负荷分布不均的矛盾。但当HVDC单极运行时,接地极和大地土壤作为输电线路的回路,承担着运行电流的散流作用。此时巨大的电流将在数千公里的范围内散流,其散流特性与大范围内的土壤电阻率相关^[3-8],影响整个回路区域的地电位分布^[9-10],尤其在HVDC输电线路的起点和终点接地极附近,因其散流电流能量集中,地电位和电流场分布受复杂地形结构影响较大^[11-12],因此HVDC接地极选址周围的地形结构、环境,及由此带来的对地电位和电流场分布变化的影响,以及后续对自然生态环境的影响等问题受到众多关注。目前HVDC输电线路落点多集中在东部经济较发达地区,极址选择面临落点相对集中、交流电网庞大复杂、与居民生产生活环境地域冲突等问题,由此产生的地电流对交流电网以及地下管道、接地体、接地设备等设施的影响研究已有开展,东部沿海地区电流场分布的异常情况增加了分层土壤结构对直流电流分布影响的认识^[13-14],这是导致变压器异常的原因^[15]。而HVDC输电的起点多集中在西南水电汇集的山区,其地形环境更为复杂,土壤水平和垂直分层情况差异较大,极址选址和居民生活环境、当地资源环境的地域矛盾突出,可选地形环境受局限性影响更大。在此背景下开展极址周围复杂地形环境对地电位、地电场变化的影响,对生态环境的影响等各方面研究有着重要意义。

目前众多学者对地形结构的研究主要在土壤模型的水平分层结构和垂直分层结构上^[16-17],但在接地极址周围散流电流密集的情况下单一的分层土壤模型来等效复杂的地形结构,研究其电位和电

场变化情况不及复合分层土壤模型更能接近现场地形结构。以往复合分层土壤模型因考虑水平分层和垂直分层土壤模型之间的相互影响后,其计算复杂程度成几何倍数增加,也未涉及电位传播与土壤层界面、等效点位置的关系^[18],因此在结合选址环境情况下,复合分层土壤模型仅考虑电流源点单侧的垂直土壤分层情况^[19]。

文中在分析了复合分层土壤结构下,存在由无数个等效距离点构成的与距离函数和综合反折射率相关的振荡衰减过程后,结合直流输电工程西南水电起点勘测的地形结构情况,构建双侧垂直分层的复合土壤模型,根据分析出的分界面等效电荷积累效应矩阵中影响连续振荡衰减过程的主要因素,考虑接地极选址地形结构变化与影响因素的对应关系,分析比较了由此产生的极址周围地电位和地电场变化规律。

1 水平分层土壤结构模型

1.1 第1土壤层电流源模型

直流系统接地极电流场是不均匀土壤层中的恒定电流场。在整个场域中大地这一媒质并不完全均匀,通过分层,可实现分层均匀。除电流源点所在土壤层以外,直流接地极在其他土壤层中产生的电位分布,在柱坐标下可用拉普拉斯方程表示^[20]

$$\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式(1)中: φ_i 为电位分布函数; r, θ, z 为柱面坐标系下的参数。

解为

$$\varphi_i(r, z) = \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [\alpha_i(\lambda) e^{\lambda z} + \beta_i(\lambda) e^{-\lambda z}] d\lambda \quad (2)$$

式(2)中: $J_0(\lambda r)$ 为零阶赛贝耳函数; λ 为积分变量。

在均匀土壤中,根据电流源点对周围空间的电位分布影响,有

$$\varphi_i(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} e^{-\lambda |z-h|} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

式(3)中: ρ_1 为土壤电阻率; δ 为电流源单位电量; h 为单位电流源点的 z 轴坐标。

那么分层土壤结构中, 与电流源位于同一土壤层的被求点电位应该为上述两个效应之和, 及均匀土壤中的电位和分层土壤中不同层电源点产生电位的累加。

$$\varphi_1(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [e^{-\lambda z - h} + \gamma_1(\lambda) e^{\lambda z} + \eta_1(\lambda) e^{-\lambda z}] d\lambda \quad (4)$$

对于圆柱坐标系 (r, z) 下, 水平双层土壤结构的示意图见图1。

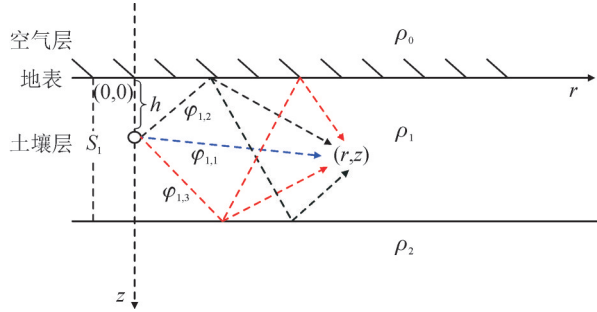


图1 水平双层土壤结构

Fig. 1 Horizontal double-layer soil

由 Green 函数的边界条件式(5)-(7)得式(8)、(9)

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = 0 \quad z = 0 \quad (5)$$

$$\varphi_2(r, z) = 0 \quad z \rightarrow +\infty \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \frac{1}{\rho_1} \cdot \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \frac{1}{\rho_2} \cdot \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \end{cases} \quad z = S_1 \quad (7)$$

$$\varphi_1(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [e^{-\lambda z - h} + e^{-\lambda(z+h)} + \frac{k[e^{-\lambda(2S_1-h)} + e^{-\lambda(2S_1+h)}]}{1 - ke^{-2\lambda S_1}} (e^{\lambda z} + e^{-\lambda z})] d\lambda \quad (8)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (9)$$

式(8)、(9)中: ρ_1 为第1层土壤电阻率; ρ_2 为第2层土壤电阻率; δ 为电流源单位电量; h 为单位电流源点的 z 轴坐标; S_1 为土壤层厚度; φ_1 为第1层土壤电位分布函数; φ_2 为第2层土壤电位分布函数。

如图1所示, 分解 $\varphi_1(r, z)$

$$\varphi_1(r, z) = \varphi_{1,1}(r, z) + \varphi_{1,2}(r, z) + \varphi_{1,3}(r, z) \quad (10)$$

式(10)中:

$$\varphi_{1,1}(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) e^{-\lambda z - h} d\lambda \quad (11)$$

$$\varphi_{1,2}(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [e^{-\lambda(z+h)} + ke^{-\lambda|z-(2S_1+h)|} + ke^{-\lambda|z-(2S_1-h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1+h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1-h)|} + \dots] d\lambda \quad (12)$$

$$\varphi_{1,3}(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [ke^{-\lambda|z-(2S_1-h)|} + ke^{-\lambda|z-(2S_1+h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1-h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1+h)|} + \dots] d\lambda \quad (13)$$

式(10)-(13)中, 电位分布函数 $\varphi_1(r, z)$ 由等效均匀电阻率情况下的电位分布 $\varphi_{1,1}(r, z)$ 、等效电位行波在上层介质分界面反射后的一系列传播过程中的电位分布函数 $\varphi_{1,2}(r, z)$ 、等效电位行波在下层介质分界面反射后的一系列传播过程中的电位分布函数 $\varphi_{1,3}(r, z)$ 3部分组成。其中 k 为反射率。

将 $\varphi_1(r, z)$ 重新进行组合, 即

$$\varphi_1(r, z) = \varphi_{1,1}(r, z) + \varphi_{1,2}^*(r, z) + \varphi_{1,3}^*(r, z) \quad (14)$$

式(14)中:

$$\varphi_{1,1}(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) e^{-\lambda z - h} d\lambda \quad (15)$$

$$\varphi_{1,2}^*(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [e^{-\lambda(z+h)} + ke^{-\lambda|z-(2S_1+h)|} + ke^{-\lambda|z-(2S_1-h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1+h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1-h)|} + \dots] d\lambda \quad (16)$$

$$\varphi_{1,3}^*(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [ke^{-\lambda|z-(2S_1-h)|} + ke^{-\lambda|z-(2S_1+h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1-h)|} + k^2 e^{-\lambda|z-(4S_1+h)|} + \dots] d\lambda \quad (17)$$

式(14)-(17)中: $\varphi_{1,2}^*(r, z)$ 为空气与土壤层分界面下表面积累的等效电荷产生的电位分布函数; $\varphi_{1,3}^*(r, z)$ 为第1层土壤和第2层土壤分界面上表面积累的等效电荷产生的电位分布函数。

进一步分析发现, $\varphi_{1,2}^*(r, z)$ 、 $\varphi_{1,3}^*(r, z)$ 为:

$$\varphi_{1,2}^*(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) [e^{-\lambda h} + \frac{k[e^{-\lambda(2S_1-h)} + e^{-\lambda(2S_1+h)}]}{1 - ke^{-2\lambda S_1}}] e^{-\lambda z} d\lambda \quad (18)$$

$$\varphi_{1,3}^*(r, z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) \frac{k[e^{-\lambda(2S_1-h)} + e^{-\lambda(2S_1+h)}]}{1 - ke^{-2\lambda S_1}} e^{\lambda z} d\lambda \quad (19)$$

式(18)、(19)中: $e^{-\lambda z}$ 的系数为空气与土壤层分界面(上分界面)下表面等效电荷积累情况, 且系数 $\frac{ke^{-\lambda(2S_1+h)}}{1 - ke^{-2\lambda S_1}}$ 为电流源点直接在上分界面下表面产生

电荷的积累; 系数 $\frac{ke^{-\lambda(2S_1-h)}}{1 - ke^{-2\lambda S_1}}$ 为电流源点在第1层土壤和第2层土壤分界面(下分界面)上表面等效电荷反馈影响上分界面电荷再分布的结果; 上分界面下表面等效电荷积累效应 $[ke^{-\lambda(2S_1-h)} + ke^{-\lambda(2S_1+h)}]$ 以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 的倍数衰减, 即以反射率 k 的倍数和等效距离 $2S_1$ 的倍数衰减。

同理 $e^{\lambda z}$ 的系数为下分界面上表面等效电荷积累情况, 且系数 $\frac{ke^{-\lambda(2S_1-h)}}{1 - ke^{-2\lambda S_1}}$ 为电流源点直接在下分界

面上表面产生电荷的积累;系数 $\frac{ke^{-\lambda(2S_1+h)}}{1-ke^{-2\lambda S_1}}$ 为电流源点在上分界面下表面等效电荷反馈影响下分界面电荷再分布的结果。下分界面上表面等效电荷积累效应也为 $[ke^{-\lambda(2S_1-h)} + ke^{-\lambda(2S_1+h)}]$, 同样以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 的倍数衰减,即以反射率 k 的倍数和等效距离 $2S_1$ 的倍数衰减。用矩阵形式表示为

$$\varphi_1(r,z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) \left[\begin{matrix} e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \\ 0 & e^{-\lambda h} \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} d\lambda \quad (20)$$

式(20)中: $A_{11} = \frac{ke^{-\lambda(2S_1-h)}}{1-ke^{-2\lambda S_1}}$; $A_{21} = \frac{ke^{-\lambda(2S_1+h)}}{1-ke^{-2\lambda S_1}}$; $A_{12} = \frac{ke^{-\lambda(2S_1+h)}}{1-ke^{-2\lambda S_1}}$; $A_{22} = \frac{ke^{-\lambda(2S_1-h)}}{1-ke^{-2\lambda S_1}}$; $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ 是以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 为振荡衰减系数的电荷积累效应矩阵,受 k, h, S_1 的影响,直接反应上分界面下表面和下分界面上表面电荷相互影响后的积累情况; A_{11} 和 A_{12} 为下分界面上表面电荷积累效应系数; A_{22} 和 A_{21} 为上分界面下表面电荷积累效应系数; A_{11} 和 A_{22} 分别为下分界面和上分界面电荷积累自效应系数; A_{12} 和 A_{21} 分别为下分界面和上分界面电荷积累互效应系数,其中 A_{12} 表示源自上分界面电荷积累后反馈影响下分界面电荷分布的互效应系数,反之 A_{21} 表示源自下分界面电荷积累后反馈影响上分界面电荷分布的互效应系数; $(e^{\lambda z} \ e^{-\lambda z})$ 为分界面电荷积累矩阵; $e^{\lambda z}$ 表示下分界面电荷积累效应; $e^{-\lambda z}$ 表示上分界面电荷积累效应; 矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为下分界面和上分界面电荷积累效用矩阵; 矩阵 $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 为透射矩阵。示意图见图2。

根据上述分析,同样的土壤层结构和电流源位置,引起分界面电荷分布是相同的。因此电荷积累效应矩阵 $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ 是相同的。由此可以计算出在相同土壤层结构和电流源位置情况下,第2土壤层中的电位分布函数。因第2土壤层中的电位分布函数主要受上分界面下层积累电荷影响,所以上下分界面电荷积累效用矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 变为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 且因影响效果需要穿过第1土壤层与第2土壤层的分界面,因此需要增加透射率影响,及透射矩阵 $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 变为 $\begin{bmatrix} 1-k \\ 1-k \end{bmatrix}$, 即第2层土壤的电位分布函数为

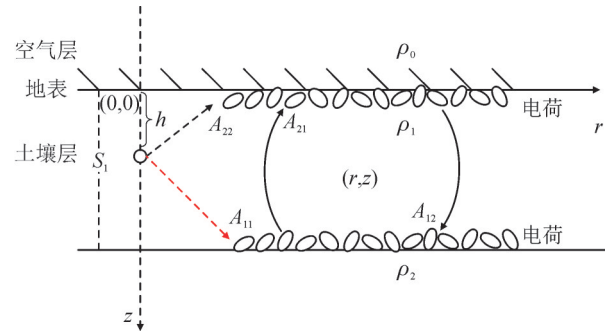


图2 电荷积累分布(1)

Fig. 2 Distribution of accumulation of electric charge(1)

$$\varphi_2(r,z) = \frac{\rho_2 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) \left[\begin{matrix} e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \\ 0 & e^{-\lambda h} \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} 1-k \\ 1-k \end{bmatrix} + \left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-k \\ 1-k \end{bmatrix} d\lambda \quad (21)$$

式(21)中: $\varphi_2(r,z)$ 为第2层土壤中的电位分布函数; ρ_2 为第2层土壤电阻率; $(1-k)$ 为折射率; $\begin{bmatrix} 1-k \\ 1-k \end{bmatrix}$ 为透射矩阵; $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为分界面电荷积累效用矩阵; $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ 为电荷积累效应矩阵,受土壤层结构和电流源位置影响,未发生变化,式(21)与文[21]结论相同,示意图见图3。

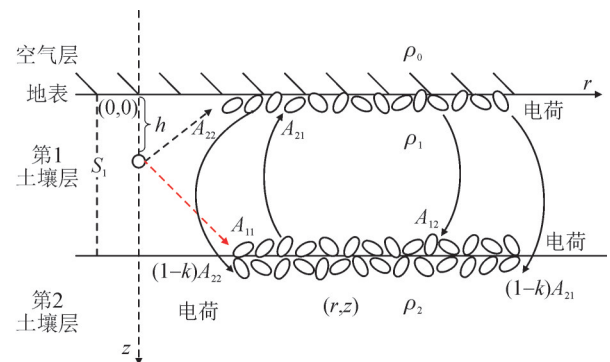


图3 电荷积累分布(2)

Fig. 3 Distribution of accumulation of electric charge(2)

1.2 第2土壤层电流源模型

电流源点位于第2土壤层时,求解第1土壤层的电位分布函数和第2土壤层的电位分布函数。因电流源点位于第2土壤层,导致第1土壤层中振荡衰减的电位分布函数只源自上分界面的电荷积累,所以这种土壤层结构和电流源点位置决定以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 为振荡衰减系数的电荷积累效应矩阵 $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ 中, A_{11} 下分界面电荷积累自效应系数和 A_{21} 源自下分界面电荷积累后反馈影响上分界面电荷分布的互效应系数都为0,即电荷积累效应矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}$, 因电流源点在第2土壤层,计算第1土

壤层的电位分布函数时,透射矩阵应为 $\begin{bmatrix} 1+k \\ 1+k \end{bmatrix}$ 。所以以电流源点位于第2土壤层时,第1土壤层的电位分布函数

$$\varphi_{21}(r,z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) \left[\begin{matrix} e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \\ 0 & 1 \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\lambda h} & 0 \\ 0 & e^{-\lambda h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+k \\ 1+k \end{bmatrix} + \left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+k \\ 1+k \end{bmatrix} d\lambda \quad (22)$$

示意图见图4。

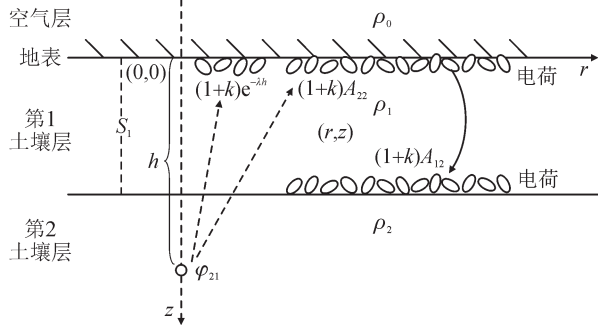


图4 电荷积累分布(3)

Fig. 4 Distribution of accumulation of electric charge(3)

电流源点位于第2土壤层时,求第2土壤层的电位分布函数,因土壤层结构和电流源点未发生变化,所以电荷积累效应矩阵仍然为 $\begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}$,因第2土壤层中的电位分布函数主要受上分界面下层积累电荷影响,所以上下分界面电荷积累效用矩阵应为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,又因在第1土壤层中上分界面和下分界面的电荷积累效应要经过两个透射过程:①由电流源点的第2土壤层透射到第1土壤层,然后上下分界面相互影响后形成上分界面下层电荷分布;②上层分界面下层电荷分布再次透射到第2土壤层。所以透射矩阵应为 $\begin{bmatrix} (1+k)(1-k) \\ (1+k)(1-k) \end{bmatrix}$ 。第1土壤层中连续振荡衰减的电位分布函数表达式

$$\left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1+k)(1-k) \\ (1+k)(1-k) \end{bmatrix} \quad (23)$$

第2土壤层中的电位分布函数表达式

$$\left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -ke^{\lambda(2S_1-h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\varphi_{22}(r,z) = \frac{\rho_2 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) \cdot \left[\left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-\lambda h} & 0 \\ 0 & e^{-\lambda h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ (1+k)(1-k) \end{bmatrix} + \left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -ke^{\lambda(2S_1-h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1+k)(1-k) \\ (1+k)(1-k) \end{bmatrix} \right] d\lambda \quad (25)$$

上述表达式(25)与文[21]结论相同,示意图见图5。

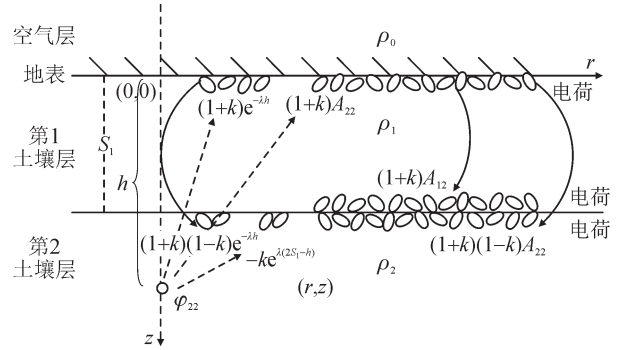


图5 电荷积累分布(4)

Fig. 5 Distribution of accumulation of electric charge(4)

1.3 第2土壤层电流源模型小结

在水平分层双层土壤结构中,存在一个以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 为振荡衰减系数的电荷积累效应矩阵,他表示了上下分界面电荷分布的相互影响,其中自效应系数 A_{11} 和 A_{22} 分别表示了上下分界面和上分界面的电荷积累效应,互效应系数 A_{12} 和 A_{21} 分别表示了上下分界面和上分界面电荷积累的相互影响效应。只要电流源点的位置和土壤分层结构不变,即 h, k, S_1 不变,电荷积累效应矩阵 $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ 是一定的。如果电流源点在第2土壤层,那么第1土壤层的上下分界面电荷积累都是源自电流源点引起的上分界面电荷积累后的再分布,所以电荷积累效应矩阵中的 A_{11} 和 A_{21} 都为0。矩阵 $\begin{pmatrix} e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \end{pmatrix}$ 表示电荷在分界面的积累效应, $e^{\lambda z}$ 表示下分界面电荷积累效应, $e^{-\lambda z}$ 表示上分界面电荷积累效应。矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示了是 $e^{\lambda z}$ 表示的下分界面电荷积累,还是 $e^{-\lambda z}$ 表示的上分界面电荷积累,还是都起了效用。例如在计算第2土壤层电位分布函数时,主要是上分界面电荷积累产生的效用,所以电荷积累效用矩阵为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

透射矩阵表示了从电流源点到被求点经过不同介质层的射入和射出过程

$$\left(e^{\lambda z} & e^{-\lambda z} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式(26)完整的描述了第1土壤层中分界面电荷积累以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 为振荡衰减系数的相互影响后再分布过程。

1.4 振荡衰减模型

为进一步阐明该过程,以文[19]中直流电流源和土壤结构参数为计算数据,见表1。将 $e^{\lambda z}$ 表示的下分界面电荷积累效应产生的电位分布函数设为

负值,将 $e^{-\lambda z}$ 表示的上分界面电荷积累效应产生的电位分布函数设为正值,见图6。式(27)表示了电位分布函数的振荡衰减趋势

表1 直流电流源和土壤结构参数表

Table 1 Parameter of soil-structure and DC power source

参数	case1	case2	case3	case4
I/A	3 000	3 000	3 000	3 000
h/m	4	20	4	4
$\rho_1/(\Omega \cdot m)$	100	100	100	100
S_1/m	40	40	80	10
$P_2/(\Omega \cdot m)$	1 000	1 000	1 000	10 000
x/m	100	100	100	100
z/m	4	4	4	4

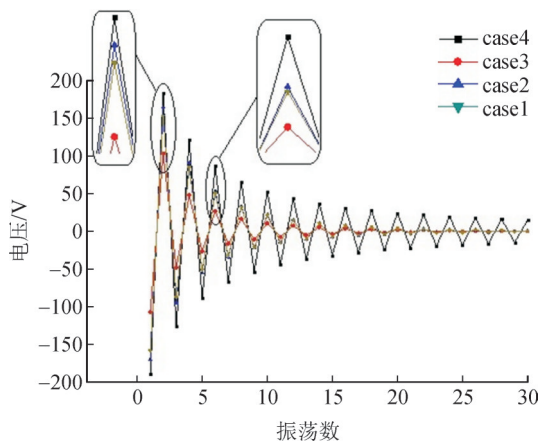


图6 电位函数的振荡衰减趋势(1)

Fig. 6 Decay-type vibration tendency of potential function(1)

$$\varphi_1(r,z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) (e^{\lambda z} \quad e^{-\lambda z}) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} d\lambda \quad (27)$$

电位函数的振荡衰减趋势(2)见图7。如图7所示,式(28)表示了另外一组振荡衰减趋势。

$$\varphi_1(r,z) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r) (e^{\lambda z} \quad e^{-\lambda z}) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} d\lambda \quad (28)$$

以第1组数据 case1 为基础,通过对比可以看出,case2的 h 不同,即为电流源点的深度不同,它决定着振荡函数最开始与 case1 的高差,但随着振荡函数的持续振荡,与 case1 的函数图像很快重合,说明 h 的不同会在开始的振荡函数中产生影响,很快这种影响就趋于零,不会对 case2 整体函数的衰减速度产生较大影响。case3 是土壤层厚度 S_1 增加时的函数图像,与 case1 相比,无论在与 case1 开始的高差,还是振荡后的衰减情况,都显著的说明, S_1 的增加将明显加快振荡函数的衰减速度,加速函数趋于零点的速度。case4 是提高土壤层反射率时的函数变化情况,与前3组数据相比,单次振荡高差最高,振荡函数整体衰减最慢,说明土壤反射率能显著影

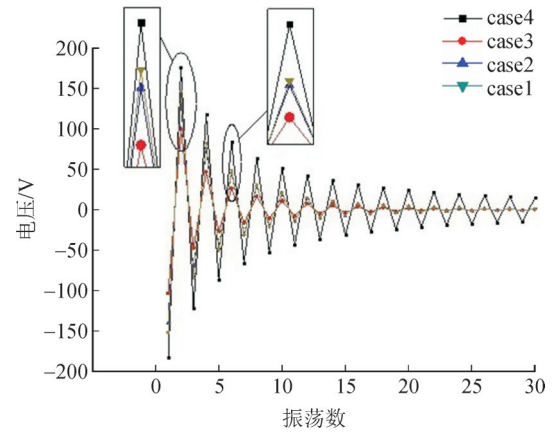


图7 电位函数的振荡衰减趋势(2)

Fig. 7 Decay-type vibration tendency of potential function(2)

响单次振荡函数的高差和振荡函数的整体衰减速度。另外对比图6、7不难发现,case1 和 case2 的初始振荡值大小正好相反,说明电流源点位置 h 的变化,影响了上下分界面的电荷分布,当电流源点下移时,出现了源自下分界面电荷分布导致的振荡衰减函数的振荡值大于 case1 值的情况,反之出现了源自上分界面电荷分布导致的振荡衰减函数的振荡值小于 case1 值的情况,之后两者均随着振荡函数的持续振荡而趋于相同。

由此可以得出, h 短时影响振荡函数的高差明显,但后续对振荡函数整体衰减速度影响微小,很快因 h 的不同产生的高差就随着振荡次数的增加而趋于零。 S_1 和土壤反射率是影响振荡函数单次振荡高差和整体衰减速度的主要因素,且土壤反射率的持续影响效果显著的高于土壤层厚度 S_1 。土壤反射率 k 影响振荡衰减速度体现为等效电荷分布的数值衰减,表现为 k^n 的等效数值衰减。土壤层厚度 S_1 影响振荡衰减速度体现为等效电荷分布的距离衰减,表现为 $2n S_1$ 的等效距离衰减。数值衰减影响效果大于距离衰减。

为了效验上述分析的准确性,用上述4种情况下的参数对比表,进行分析并模拟计算出分别在 z 轴和 x 轴两个方向延伸后的地电位分布和电流密度分布,与CDEGS软件计算结果进行对比分析,见表2、3。

1.5 振荡衰减模型小结

在水平双层分层土壤结构中,在上分界面和下分界面之间总存在一个以 $ke^{-2\lambda S_1}$ 为振荡衰减系数的等效电荷衰减效应,受电流源点位置、土壤层厚度、土壤反射率三者因素影响,其中源点位置主要影响起始点的单次振荡高差,持续影响效果弱,土壤反射率和土壤层厚度持续影响效果强,具体表现在以

表2 CDEGS与本模型的地电位比较

Table 2 Ground potential comparison between the model and CDEGS

x/m	z/m	U/V							
		case1		case2		case3		case4	
		模拟计算	CDEGS 计算	模拟计算	CDEGS 计算	模拟计算	CDEGS 计算	模拟计算	CDEGS 计算
100	4	2 056.50	2 055.10	2 052.400	2 051.07	1 407.300	1 406.64	4 562.0	4 561.33
200	8	1 418.90	1 417.57	1 417.700	1 416.37	1 028.300	1 027.63	3 761.1	3 760.41
300	12	1 100.40	1 099.09	1 099.800	1 098.49	835.203	834.54	3 303.4	3 302.81
400	16	902.34	901.05	901.987	900.70	709.470	708.81	2 985.7	2 985.08
500	20	765.58	764.30	765.348	764.07	619.080	618.43	2 744.3	2 743.67
600	24	664.93	663.67	664.773	663.51	550.210	549.56	2 550.9	2 550.33
700	28	587.58	586.33	587.463	586.22	495.640	495.00	2 390.6	2 390.00
800	32	526.20	524.98	526.115	524.89	451.177	450.53	2 254.3	2 253.71

表3 CDEGS与本模型的电流密度比较

Table 3 Current density comparison between the model and CDEGS

x/m	z/m	J/(A·m ⁻²)							
		case1		case2		case3		case4	
		模拟计算	CDEGS 计算	模拟计算	CDEGS 计算	模拟计算	CDEGS 计算	模拟计算	CDEGS 计算
100	4	0.099 54	0.099 50	0.098 65	0.098 70	0.061 63	0.061 60	0.117 01	0.177 0
200	8	0.041 92	0.041 90	0.041 82	0.041 80	0.024 89	0.024 90	0.056 99	0.057 0
300	12	0.024 31	0.024 30	0.024 28	0.024 30	0.015 12	0.015 10	0.037 15	0.037 2
400	16	0.016 14	0.016 10	0.016 12	0.016 10	0.010 48	0.010 50	0.027 27	0.027 3
500	20	0.011 57	0.011 60	0.011 57	0.011 60	0.007 80	0.007 80	0.021 36	0.021 4
600	24	0.008 73	0.008 74	0.008 73	0.008 73	0.006 08	0.006 08	0.017 44	0.017 5
700	28	0.006 83	0.006 84	0.006 83	0.006 83	0.004 89	0.004 89	0.014 65	0.014 7
800	32	0.005 49	0.005 50	0.005 49	0.005 50	0.004 03	0.004 04	0.012 56	0.012 6

k^n 的等效数值衰减和以 $2n S_1$ 的等效距离衰减上,且土壤反射率持续影响效果强于土壤层厚度。

2 垂直和复合分层土壤结构模型

2.1 垂直分层土壤模型

同理垂直分层土壤结构的电位分布函数同样可以用式(29)描述,电荷积累分布见图8。

$$\varphi_1(r_1, x) = \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \int_0^{+\infty} J_0(\lambda r_1) \left[\begin{matrix} e^{-\lambda x} & e^{-\lambda x} \\ 0 & e^{-\lambda x_0} \end{matrix} \right] \begin{matrix} 0 \\ e^{-\lambda x_0} \end{matrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ k_{14} \end{bmatrix} + \left(e^{\lambda x} \quad e^{-\lambda x} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} d\lambda$$

$$\text{式(29)中: } B_{11} = \frac{k_{13} e^{-\lambda(2S_2 - X_0)}}{1 - k_{14} k_{13} e^{-2\lambda S_2}}; k_{13} = \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_3 + \rho_1}; B_{12} =$$

$$\frac{k_{14} k_{13} e^{-\lambda(2S_2 + X_0)}}{1 - k_{14} k_{13} e^{-2\lambda S_2}}; B_{21} = \frac{k_{13} k_{14} e^{-\lambda(2S_2 - X_0)}}{1 - k_{13} k_{14} e^{-2\lambda S_2}}; B_{22} = \frac{k_{14} k_{13} e^{-\lambda(2S_2 + X_0)}}{1 - k_{13} k_{14} e^{-2\lambda S_2}};$$

$$k_{14} = \frac{\rho_4 - \rho_1}{\rho_4 + \rho_1}; r_1 = [(z-h)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}。$$

2.2 复合分层土壤模型

复合分层土壤结构电位分布函数由文中上述的水平分层土壤结构电荷积累效应,垂直分层土壤

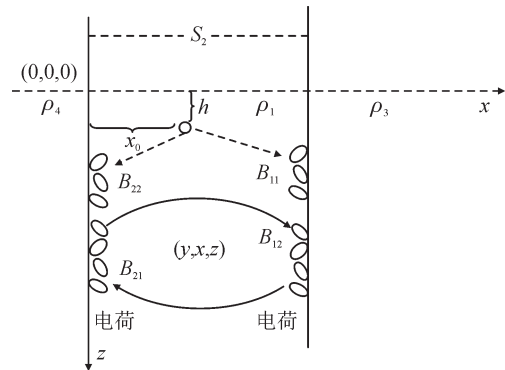


图8 电荷积累分布(5)

Fig. 8 Distribution of accumulation of electric charge(5)

结构电荷积累效应,和上述两者效应的相互影响3部分线性叠加构成,其中前两者水平分层土壤结构电荷积累效应和垂直分层土壤结构电荷积累效应见图9。上述两者效应的相互影响是求复合分层土壤结构电位分布函数的关键。其两者效应的相互影响见式(30)

$$\frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \left(\frac{K_{(n_1, n_2)}}{D_{(n_1, n_2)}} \right) + \frac{\rho_1 \delta}{4\pi} \left(\frac{K_{(n_1, n_2)}}{D_{(n_1, n_2)}} \right) + \dots \quad (30)$$

$D_{(n_1, n_2)}$ 由矩阵 $D_{n,n}$ 的每个元素组成,

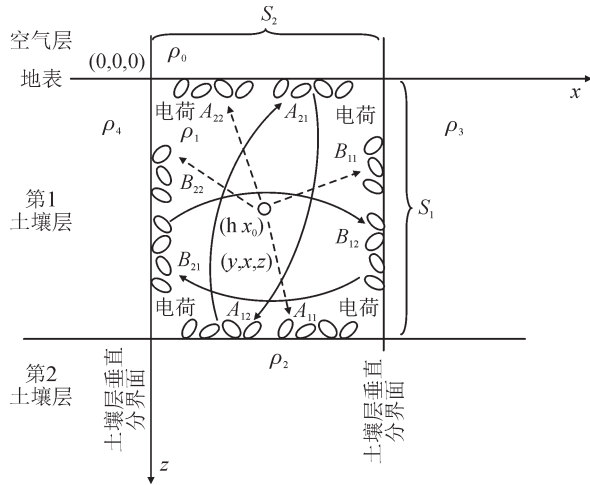


图9 电荷积累分布(6)

Fig. 9 Distribution of accumulation of electric charge(6)

$$D_{n,n} = \begin{bmatrix} D_{(-2nS_1-h, -2nS_2-X_0)} & D_{(-2nS_1-h, -2nS_2+X_0)} & \cdots & D_{(-2nS_1-h, 2nS_2-X_0)} & D_{(-2nS_1-h, 2nS_2+X_0)} \\ D_{(-2nS_1+h, -2nS_2-X_0)} & D_{(-2nS_1+h, -2nS_2+X_0)} & \cdots & D_{(-2nS_1+h, 2nS_2-X_0)} & D_{(-2nS_1+h, 2nS_2+X_0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{(2nS_1-h, -2nS_2-X_0)} & D_{(2nS_1-h, -2nS_2+X_0)} & \cdots & D_{(2nS_1-h, 2nS_2-X_0)} & D_{(2nS_1-h, 2nS_2+X_0)} \\ D_{(2nS_1+h, -2nS_2-X_0)} & D_{(2nS_1+h, -2nS_2+X_0)} & \cdots & D_{(2nS_1+h, 2nS_2-X_0)} & D_{(2nS_1+h, 2nS_2+X_0)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$K_{n,n} = \begin{pmatrix} k^n \\ k^n \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ k^n \\ k^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{13}^n k_{14}^{n+1} & k_{13}^n k_{14}^n & \cdots & k_{14}^n & \cdots & k_{13}^n k_{14}^{n-1} & k_{13}^n k_{14}^n \end{pmatrix} = \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n+1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} & \cdots & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n-1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} \\ K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n+1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} & \cdots & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n-1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n+1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} & \cdots & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n-1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} \\ K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n+1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} & \cdots & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^{n-1})} & K_{(k^n, k_{13}^n, k_{14}^n)} \end{bmatrix} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

复合分层土壤结构中振荡函数的等效距离分点见图10。图10示只画出了复合分层土壤结构中等效x轴正方向的距离函数点,同理按照垂直分层土壤结构的分层理论,x轴负方向同样具有相同数量和位置的等效电荷点。所以复合分层土壤结构下的电位分布函数为,水平分层土壤结构下的振荡衰减函数,垂直结构下的振荡衰减函数,和斜方向的振荡衰减函数3者效应之和,其中文中如前所述的水平分层土壤结构下的振荡衰减函数即为图10中x=x₀处,z从上到下所有等效电荷点体现出的振荡衰减过程,文中前述中垂直分层土壤结构下的振荡衰减函数即为图10中z=h处,x从左到右所有等效电荷点体现出的振荡衰减过程。在x=x₀处的z轴方向和z=h处的x轴方向以外的斜方向即为两者相互影响的振荡衰减函数。斜方向无论是距离函数,还是综合反射率都将衰减的更快。

$D_{(n_1, n_2)} = \sqrt{(z-n_1)^2 + (x-n_2)^2}$ 为距离函数, $K_{(n_1, n_2)}$ 由矩阵 $K_{n,n}$ 的每个元素组成, $K_{(n_1, n_2)} = n_1 \cdot n_2$ 为综合反射率。

复合分层土壤结构电位分布函数由水平分层土壤结构电荷积累效应,垂直分层土壤结构电荷积累效应,和两者效应的相互影响3部分组成。其中两者效应的相互影响主要受距离函数和综合反射率影响,综合反射率为单次水平反射率和垂直反射率的乘积,即 $K_{(n_1, n_2)}$ 。距离函数为单次反射的水平等效反射距离和垂直等效反射距离的平方和的1/2次方,即 $D_{(n_1, n_2)}$ 。

3 复合分层模型工程实例的模拟应用

文中选择某HVDC工程接地极选址常见的盆地地形,对盆地周围的地下和周边的地质资料进行查阅^[22],盆地周围的山体及山脚延伸入地部分多为中密、密实的卵石、岩石,其电阻率较高,盆地腹地,接地极选址周围的垂直方向,上层多为冲洪积粉质粘土、粘土,成可塑和软塑状,多因沟渠纵横显稍湿至很湿状,该层深度通常为几到十几m不等。下层多为冲洪积含粘性土卵(碎)石、岩石,由山区洪流形成的冲洪积层。上部主要以粒径较小的松散、稍密的卵(碎)石,岩石为骨架,骨架间充填大量粘性土构成混合物。下部主要以粒径较大的中密、密实的卵石,岩石为骨架,骨架间充填少量的圆砾、角砾构成,该层深度通常为十几到几十m不等。接地极选

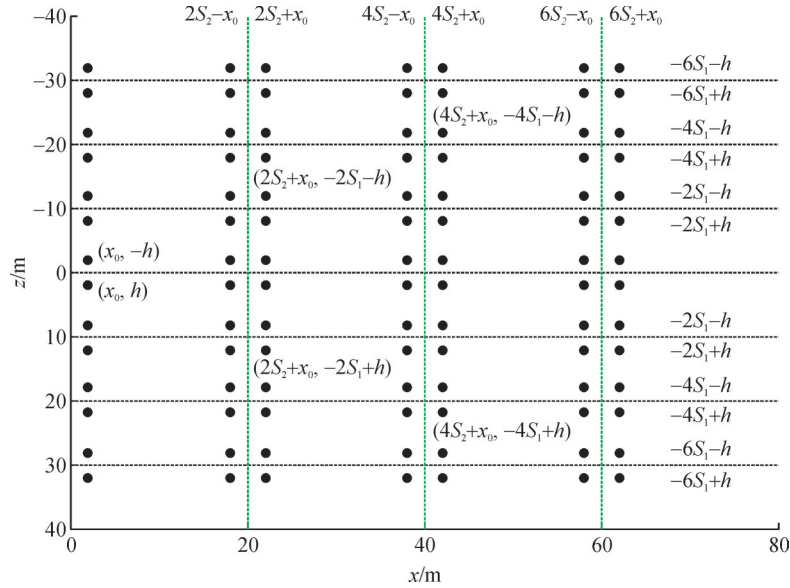


图10 复合分层土壤中等效距离分布点

Fig. 10 Distribution of equivalent distance node in comprehensive layer soil

址水平方向另侧为盆地腹地河流汇集形成的水库和池塘。绘制出的简易示意图见图11。

接地极的埋深^[23]通常是3~4.5 m,文中取4 m,土壤层水平分层,文中将湿性粘土土壤层和显湿性粘土充填小粒径松散、稍密卵(碎)石、岩石为骨架的混合土壤层定义为第1土壤层,因其含水量较多,综合电阻率较小,其厚度通常从8~21 m不等。将圆砾、角砾充填大粒径密实卵石、岩石为骨架的土壤层定义为第2土壤层,其综合电阻率明显高于第1土壤层。土壤层垂直分层,文中将盆地周围由中密、密实的卵石、岩石构成的山体及山脚延伸入地部分的土壤定义为左侧土壤层,其电阻率较大。

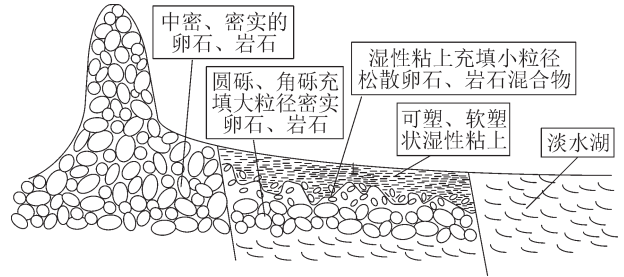


图11 分层土壤结构

Fig. 11 Layer soil structure

由盆地腹地河流等水系汇集构成的水库、池塘、秧田等大面积区域定义为右侧土壤层,其电阻率较小。依据相关标准^[24]对比地质勘测中土壤构成与对应电阻率电气参数的参考取值,电气参数分布见表4。

表4 复合分层土壤的电气参数(1)

Table 4 Electrical parameter in comprehensive layer soil(1)

I/A	h/m	x_0/m	$\rho_0/(\Omega \cdot m)$	$\rho_1/(\Omega \cdot m)$	S_1/m	$\rho_2/(\Omega \cdot m)$	S_2/m	$\rho_3/(\Omega \cdot m)$	$\rho_4/(\Omega \cdot m)$
3 000	4	5 000	$+\infty$	50	11	1 000	30 001	20	2 000

按照文[25]介绍,离开直流接地极超过3倍直流极尺寸区域,电流点源可以代替具体的直流极进行电场、电位分布计算^[5]。目前直流接地极外环半径不超过500 m,占地约1 km²。电压等级为800 kV,额定电流为4 000 A的直流输电系统,在距离接地极20 km以外的区域,地电位已降至最高地电位的1%、2%以下,如只评估接地极对周围环境的影响,不考虑对换流站或110 kV及以上交流变电站等电网系统的影响,只需重点考虑距离接地极20 km以内区域的电位、电场和电流密度分布^[25]。论文重点评估盆地地形腹地的接地极选址对周围环境的影响,因此将接地极以电流点源代替,考虑极址5 km以外,25 km

以内这段范围之间的电位、电场和电流密度分布。绘制出复合分层结构的电气参数分布图见图12。

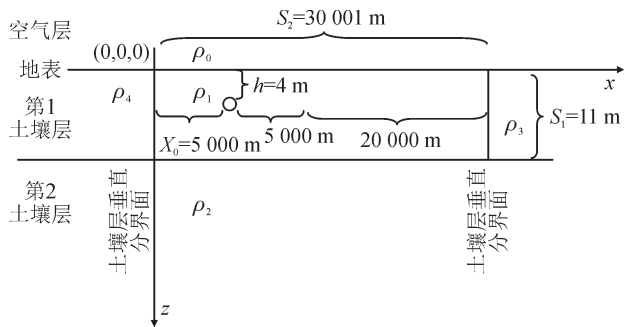


图12 复合分层土壤的电气参数(2)

Fig. 12 Electrical parameter in comprehensive layer soil(2)

根据直流工程接地极址地勘情况的变化范围及地下水位变动情况,类比出极址环境可能出现的另外3种变化情况:①季节影响,出现周边河流馈入,地下水位抬升至以圆砾、角砾充填大粒径密实卵石、岩石为骨架的第2土壤层;②极址环境出现地下水干涸,至第2土壤层由含水量极低的密实卵石、岩石构成;③第1土壤层厚度变化至21 m深。对应参数变化见表5,计算分析上述情况,垂直深度4 m,距离接地极5~25 km范围内地电位分布情况,见图13。

表5 参数变化情况对比(1)

Table 5 Comparison of parameters variation situations(1)

参数	case1	case2	case3	case4
I/A	3 000	3 000	3 000	3 000
h/m	4	4	4	4
x_0/m	5 000	5 000	5 000	5 000
$\rho_1/(\Omega \cdot m)$	50	50	50	50
S_1/m	11	21	11	11
$\rho_2/(\Omega \cdot m)$	1 000	1 000	2 000	20
S_2/m	30 001	30 001	30 001	30 001
$\rho_3/(\Omega \cdot m)$	20	20	20	20
$\rho_4/(\Omega \cdot m)$	2 000	2 000	2 000	2 000
x/m	10 ~ 30	10 ~ 30	10 ~ 30	10 ~ 30
z/m	4	4	4	4

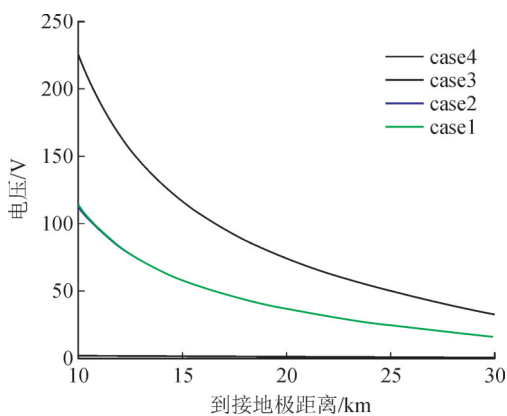


图13 地电位分布情况(1)

Fig. 13 Ground potential distribution(1)

从图13可以看出,与case1相比,第1土壤层厚度的变化几乎对地电位分布无影响,而第2土壤层电阻率的改变,对地电位分布产生直接的影响。如果在雨季,地下水位上升至第2土壤层电阻率降低,在距离接地极5 km范围内,电流已基本泄入地下深层,在第1土壤层5 km范围外的地电位基本已降至零,对表层土壤层环境的影响已很微小。如果出现地下水干涸多年至第2土壤层电阻率明显升高,则会显著提高第1土壤层5~25 km范围内的地电位水

平,增大接地极的影响范围,应引起足够关注。

在上述分析例1(case1)的基础上,根据该直流工程接地极选址条件,类比可能发生接地极址环境条件改变的4种情况:①接地极址出现水平移动;②垂直分层土壤层厚度变化;③右侧土壤层电阻率变化;④右侧土壤层不再分层。电气结构示意图见图14、15,参数表变化见表6,计算出垂直深度4 m,距离接地极5~25 km范围内地电位分布和电场分布情况见图16、17。

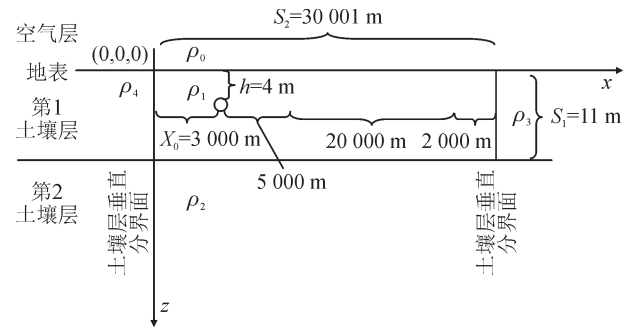


图14 复合分层土壤的电气参数(3)

Fig. 14 Electrical parameter in comprehensive layer soil(3)

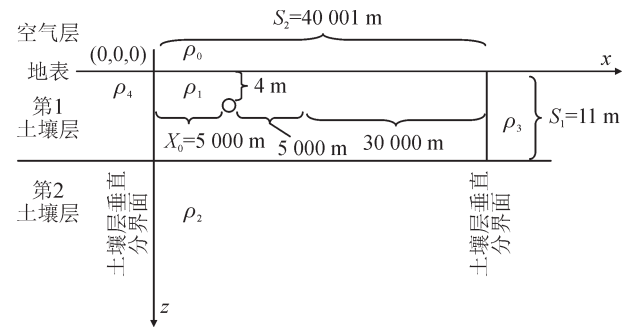


图15 复合分层土壤的电气参数(4)

Fig. 15 Electrical parameter in comprehensive layer soil(4)

地电位分布图从整体上看,除了case4,其他情况变化很接近。电场强度分布图从整体上看5种情况的变化不大。说明接地极右侧土壤的电阻率仍然是地电位整体分布较大变化的主要因素,但这对地电场的整体分布影响却不大。如果细微比较分析,5种变化情况仍然有不同的地电位和地电场分布特点。

在图16中,case4表示右侧土壤层出现高层阻时,整体电位分布较其他情况明显提高,根据文中前述理论,复合分层土壤结构电位分布函数为垂直和水平以及斜方向无数个振荡衰减点的叠加,且衰减速度主要受等效距离衰减和等效电荷衰减影响,等效距离与土壤层厚度相关,等效电荷与反折射率有关。其中影响最显著且持续影响时间最长的是反折射率及右侧土壤层电阻率。因为右侧土壤层是高层阻,产生正影响,所以明显抬高了整体电位分布,同时右侧高层阻明显延缓了振荡衰减速度,

表6 参数变化情况对比(2)

Table 6 Comparison of parameters variation situations(2)

参数	case1	case2	case3	case4	case5
I/A	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
h/m	4	4	4	4	4
x_0/m	5 000	3 000	5 000	5 000	5 000
$\rho_1/(\Omega \cdot m)$	50	50	50	50	50
S_1/m	11	11	11	11	11
$\rho_2/(\Omega \cdot m)$	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
S_2/m	30 001	30 001	40 001	30 001	30 001
$\rho_3/(\Omega \cdot m)$	20	20	20	2 000	50
$\rho_4/(\Omega \cdot m)$	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
x/m	10 ~ 30	8 ~ 28	10 ~ 30	10 ~ 30	10 ~ 30
z/m	4	4	4	4	4

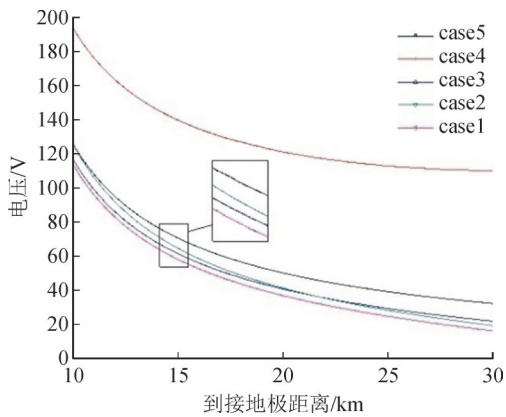


图16 地电位分布情况(2)

Fig. 16 Ground potential distribution(2)

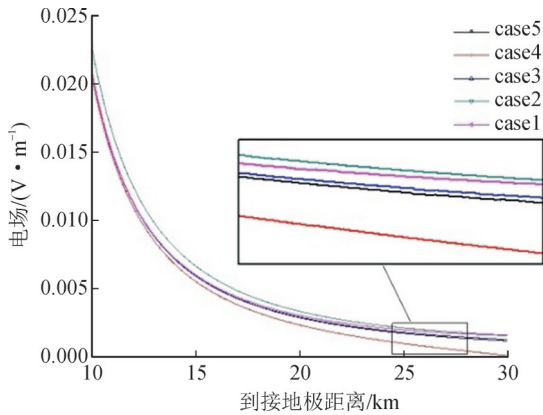


图17 地电场分布情况

Fig. 17 Electric field distribution

其延缓程度明显高于其他情况,所以与其他情况相比,其电场强度最低,如图17所示 case4的电场分布为最低。同理 case5为右侧土壤层不分层情况,其与 case1的右侧低阻土壤层产生等效电荷负影响相比, case5的电位分布图高于 case1,但次于 case4,而电场分布图相比其他情况为次低,低于 case1,如图17所示。

case3为土壤层厚度增加及等效距离增加情况,

等效距离增加将加快振荡函数衰减,但因 case3 表示右侧土壤层为低阻层,产生负影响,故将减缓振荡衰减速度,所以电位分布图略高于 case1,如图16所示,振荡函数衰减减缓,其电场分布降低,如图17所示,略低于 case1。

影响振荡函数衰减的因素有等效电荷衰减和等效距离衰减。除此之外电位分布还和接地极址位置相关。为了确保被求区域为距离接地极址 5~25 km 范围内的电位分布和电场分布, case2 在考虑接地极址向左平移 2 km 后,调整为计算被求区域 8~28 km 范围内的电位分布和电场分布。case2 与 case1 相比,因已排除了绝对距离的影响, case2 极址位置的变化,影响到无数个等效电荷点的分布,从而影响电位分布和电场分布,如图16所示,因 case2 极址位置移向左侧高阻层,左侧高阻层等效电荷点分布影响增强,且影响为正影响,故 case2 电位分布图高于 case1。

电场分布,因整个被求区域电场分布总体为左高右低趋势, case2 极址左移,增强了左侧高阻层等效电荷分布影响,同时减弱了右侧低阻层等效电荷分布影响,其增强与减弱方向恰好与整个被求区域电场的左高右低趋势相同,故 case2 的电场强度整体分布高于 case1,见图17。

仔细对比 case2 与 case3 的地电位分布图16发现,在近接地极址的区域,因极址位置移动提高电位分布的效果较距离函数的改变提高电位分布的效果更大,故在近极址处 case2 的电位分布图开始高于 case3,但随着距离极址位置的不断增加,距离函数的持续影响效果将大于极址位置移动的影响效果,对比分析图16中, case2 与 case3 图像出现了交点,电位分布大小随着距离的增加出现了互换。

上述4种表示复合分层土壤结构垂直方向土壤层变化的参数调整(极址位置左移,增大垂直分层土壤层厚度,改变右侧土壤层为高阻层,设右侧土壤为不分层结构),相比 case1 都可以整体提高地电位分布,但增大的机理却不相同,由此产生了对应不同的电场分布图。

总体上看,右侧土壤层设为高阻层仍然是提高电位分布效果最直接的影响因素,与此同时也是整体降低电场分布最直接的原因。右侧土壤层为不分层结构,只是改变右侧土壤层电阻率的特殊情况,其影响机理和对电位和电场的的影响效果,趋势变化一致。

与改变右侧土壤层电阻率相比,增加土壤层厚度和极址位置左移,两者都可提高地电位整体分

布,但提高效果却不及前者,且两者的影响效果出现随距离的增加而大小转换的情况,具体为极址位置左移产生的电位分布增大效果开始大于土壤层厚度增加产生的电位分布增大效果,往后小于土壤层厚度增加产生的电位分布增大效果。所以右侧土壤层电阻率改变仍然是影响电位整体分布和电场整体分布最大的因素。

在土壤层结构变化影响因素中,除了case2表示的极址移动影响因素,其他影响因素均出现了,较case1提高了整体电位分布,却相应的降低了整体电场分布的情况,即电位分布变化趋势和电场分布变化趋势相反的情况,只有极址移动的影响因素是电位分布变化趋势和电场分布变化趋势相同。

4 结论

1)在水平双层分层土壤结构中,在上分界面和下分界面之间总存在一个以 $ke^{-2\alpha S_1}$ 为振荡衰减系数的等效电荷衰减效应,具体表现在以 k^n 的等效数值衰减和以 $2n S_1$ 的等效距离衰减上。电荷积累效应矩阵 $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ 完整的描述了这一过程。在水平分层土壤结构中求解不同位置的电位分布函数,关键是找到对应的电荷积累效应矩阵。电荷积累效应矩阵只与土壤层反折射率和土壤层厚度,电流源点位置相关。

2)振荡衰减函数中影响衰减的因素:电流源点位置、土壤层厚度、土壤层反折射率3个影响效果不同,源点位置只影响起始点的振荡高差,后继影响效果不大。土壤层厚度和土壤层反折射率对振荡函数产生持续性影响,且后者持续影响效果大于前者。

3)复合分层土壤结构为水平分成土壤结构和垂直分成土壤结构加上两者土壤结构相互影响效果的叠加。斜方向产生的等效距离点即为两者效应的相互影响。它们以距离函数和综合反射率的方式影响振荡衰减速度。

4)在选择接地极极址时,深处土壤层电阻率是影响地电位分布最重要因素,在其深处电阻率基本一致情况下,该盆地地形环境约束下,右侧土壤层电阻率是影响电位分布的第二重要因素,同时也是影响电场分布的重要因素,普遍规律是,电位分布整体增加必然会使电场分布整体减小,且增加的越多,减小的也越多,所以选址时需勘测右侧土壤层电阻率,如果遇到高阻层,地电位必将升高,但此时地电场会降低,所以这种情况不必过于担心,整体抬升了地电位分布后却减小了电场分布,对极址周

围环境的影响变化不大。

另外通过增大土壤层厚度方式提升电位分布,电位分布抬升后电场分布却降低了,对环境的影响仍然变化不大。

最后接地极址变化,也会影响地电位分布,尤为注意这种方式提高电位分布也会同时提高电场分布。这种方式将增大对极址周围环境的影响。因此在极址选址时,如果极址位置移向高阻层,那么需重点评估其对环境的影响,因为这种方式同时增强了电位和电场分布。

参考文献:

- [1] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4):1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] 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.
- [3] WANG X, RUAN L, WEN X, et al. Characteristics analysis of DC-bias currents considering deep-earth resistivity[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1536-1543.
- [4] LI Wei, PAN Zhuohong, LU Hailiang, et al. Influence of deep earth resistivity on HVDC ground-return currents distribution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1844-1851.
- [5] 阮羚,全江涛,杨小库,等. 深层大地电阻率对交流电网直流电流分布的影响[J]. 高电压技术,2014,40(11):3528-3536.
RUAN Ling, QUAN Jiangtao, YANG Xiaoku, et al. Influence of deep earth resistivity on direct current distribution in AC power grid[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3528-3536.
- [6] 郭名文,樊艳芳,耿山,等. 特高压直流接地极周边断裂结构对地表电位分布的影响研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(2):73-79.
GUO Mingwen, FAN Yanfang, GENG Shan, et al. Study on the effect of fracture structure adjacent to ground electrodes of UHVDC power transmission lines on earth surface potential distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 73-79.
- [7] 刘连光,马成廉. 基于有限元方法的直流输电接地极多层土壤地电位分布计算[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(18):1-5.
LIU Lianguang, MA Chenglian. Calculation of multi-layer soil earth surface potential distribution of HVDC due to finite element method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 1-5.
- [8] 耿山,樊艳芳,巩晓玲,等. 特高压直流接地极周边地表电位分布计算与敏感性参数研究[J]. 高压电器,2019,55(3):163-169.
GENG Shan, FAN Yanfang, GONG Xiaoling, et al. Calculation of earth surface potential around UHVDC grounding electrode and analysis on sensitive parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 163-169.

- [9] ZHANG Bo, ZHAO Jie, ZENG Rong, et al. Numerical analysis of DC current distribution in AC power system near HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2):960-965.
- [10] 刘 曲. 高压直流输电系统单极大地运行时地中电流分布的研究[D]. 北京:清华大学, 2007.
LIU Qu. Research on current distribution during monopolar operation of HVDC systems with grounding return[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [11] 李景丽, 栗超超, 冯 鹏. 复杂土壤结构对流入变压器直流电流的影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(3):34-42.
LI Jingli, LI Chaochao, FENG Peng. Analysis of the influence of complex soil structure on DC current flowing into transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3):34-42.
- [12] 李景丽, 栗超超, 冯 鹏. 异阻层状土壤对HVDC接地极散流性能的影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(2):1-9.
LI Jingli, LI Chaochao, FENG Peng. Analysis of layered soil resistance effect on HVDC grounding diffuser performance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(2):1-9.
- [13] 刘 曲, 李立涅, 郑健超. 考虑海洋影响的直流输电单极大地运行时变压器中性点直流电流研究[J]. 电网技术, 2007, 31(2):57-60.
LIU Qu, LI Liying, ZHENG Jianchao. Study on DC current through transformer neutrals caused by ground return operation mode of HVDC system with sea influence considered[J]. Power System Technology, 2007, 31(2):57-60.
- [14] 何俊佳, 叶会生, 林福昌, 等. HVDC单极大地运行时土壤结构对地电位和地中电流分布的影响[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1):26-31.
HE Junjia, YE Huisheng, LIN Fuchang, et al. Influence of soil structure on surface potential and ground currents distribution while HVDC mono-polar operation with ground return[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1):26-31.
- [15] 苑 舜, 王天施. 电力变压器直流偏磁研究综述[J]. 高压电器, 2010, 46(3):83-87.
YUAN Shun, WANG Tianshi. Summary of the research on transformer DC magnetic bias[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3):83-87.
- [16] 吴 超, 吴广宁, 范建斌, 等. 高压互联电网极址土层参数对直流地表电位影响的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3):41-46.
WU Chao, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Influences of grounding site soil parameters on earth surface potential of the high-voltage interconnected power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):41-46.
- [17] 曹晓斌, 胡劲松, 余 波, 等. 一类垂直双层土壤中地网接地电阻的简易计算公式[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1):120-126.
CAO Xiaobin, HU Jinsong, YU Bo, et al. A simplified formula for grounding grids resistance in a type of vertical two-layer soil[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1):120-126.
- [18] VILLAS J E T, PORTELA C M. Calculation of electric field and potential distributions into soil and air media for a ground electrode of a HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3):867-873.
- [19] 魏敏敏, 曹保江, 任志超, 等. 地形结构及参数对特高压直流地电流散流特性的影响分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2):414-420.
WEI Minmin, CAO Baojiang, REN Zhichao, et al. Influence of terrain structure and parameter on the divergence character of UHVDC grounding current[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):414-420.
- [20] 任志超. 直流系统接地极电流场的分布特性及其对交流电网影响的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
REN Zhichao. Distribution characteristic of DC system grounding electrode current field and its effect on AC power grid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [21] FALEIRO E, ASENSIO G, DENCHE G, et al. Electric behavior of conductor systems embedded in finite inhomogeneous volumes scattered into a multilayered soil: The problem of High-Resistivity Ratios revisited[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 148(2):183-191.
- [22] 西南电力设计院有限公司. ±800 kV特高压直流输电工程雅中换流站接地极岩土工程勘察报告[R]. 成都:西南电力设计院有限公司, 2018.
Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd.. Geotechnical investigation report of ±800 kV HVDC grounding electrode in Yazhong converter substation[R]. Chengdu: Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., 2018.
- [23] 崔明德, 刘连光, 孙中明, 等. 高压直流输电环形电极埋深特性分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):156-159.
CUI Mingde, LIU Lianguang, SUN Zhongming, et al. Analysis of the burial depths of the annular electrodes in HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):156-159.
- [24] 交流电气装置的接地设计规范:GB 50065—2011[S]. 北京:中国计划出版社, 2011.
Code for design of AC electrical installations earthing: GB 50065—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [25] 刘连光, 崔明德, 孙中明, 等. ±800 kV直流接地极对交流电网的影响范围[J]. 高电压技术, 2009, 35(6):1243-1247.
LIU Lianguang, CUI Mingde, SUN Zhongming, et al. Influence scope of AC network by DC grounding electrode rated ±800 kV[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6):1243-1247.
- 张 俊(1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事高压直流输电接地计算及环境影响的研究工作(通信作者)(E-mail: zhang-junsichuan@sina.com)。