

土壤模型对地表电位影响及合理选取土壤模型方法研究*

李文峰 杨洪耕[†] 肖先勇 李兴源

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

(2013年1月4日收到; 2013年1月22日收到修改稿)

首次利用物理意义明确的模拟镜像法推导出三维复合分层土壤模型格林函数, 基于特定土壤模型, 分析了不同土壤配置下土壤模型对地表电位的影响. 结果表明, 在一定条件下土壤模型变化仅改变地表电位绝对值, 基本不改变地表电位差, 从理论上阐明了土壤参数变化对地表电位影响的物理机理. 针对如何选取合适土壤模型来准确计算流过变压器中性点的直流量难题, 提出了合理选取土壤模型的判据及其阈值, 避免了土壤模型选取的随意性和盲目性, 为准确评估流过变压器中性点直流量和直流接地极附近变电站选址提供理论依据.

关键词: 格林函数, 模拟镜像法, 直流偏磁, 土壤模型

PACS: 41.20.-q, 41.20.Cv, 88.80.H-, 88.80.hj

DOI: 10.7498/aps.62.144102

1 引言

当前, 能源和环境问题成为全世界普遍关注的问题, 高压直流输电具有稳定和调度控制性能优越、可有效限制短路容量、长距离大容量输电经济性显著及节约走廊等优点, 在中国实现西电东送、南北互供的电网发展战略中扮演着重要角色, 对解决能源分布与负荷中心不平衡都具有重要意义^[1-3]. 在直流输电工程中, 单极大地回路运行时直流接地极的入地电流达数千安, 强大的直流电流长时间持续流过接地极, 会产生一系列负面效应: 对地下金属管道和电力系统接地网产生电化腐蚀^[4,5], 引起变压器直流偏磁^[2,6-8]等, 后者造成变压器振动剧烈、噪声聚升、过热等一系列问题, 严重时甚至可引起变压器损坏, 影响到电网安全稳定运行.

分析入地直流对交流系统影响, 需要首先求出地表电位 (ESP)^[9-11], 这要求解满足一定边界条件的拉普拉斯方程得到其格林函数^[12,13]. 目前大

尺度范围内 ESP 仿真结果不够准确^[14-17], 导致对流过直流接地极附近的一些变电站中性点直流量评估失真, 其中最主要的原因是实际土壤结构在大尺度范围内复杂多变, 难以构造合适的土壤模型来定量计算 ESP 分布^[14-16]. 目前普遍采用的是水平和复合分层土壤模型, 文献 [9—11] 基于水平分层土壤模型计算了地表电位; 文献 [15] 分析了海洋对流入变压器中性点直流电流量的影响, 对靠近海边的变压器更容易发生直流偏磁现象给予了解释; 文献 [16, 17] 分析了土壤结构对流入变压器中性点直流电流的影响, 指出在建立土壤模型时应重点研究表层土壤结构的影响.

然而, 如何构造适当土壤模型来定量计算大尺度范围内 ESP 一直是尚未有效解决的难题^[14-17]. 对于距离接地极数百公里区域来说, 土壤电性结构变化很大, 建立一个完全符合实际的土壤模型几乎不可能^[15], 而且随着土壤分层复杂化, 接地计算也越来越困难. 因此, 如何选取合理的土壤模型, 既不至于工作量过大, 又能得到准确可靠的计算结果就显得尤为重要. 为此, 本文在前人工作的基础上, 首

* 国家自然科学基金 (批准号: 51077095) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yangsi@mail.sc.cninfo.net

先利用物理意义明确的模拟镜像法推导出三维复合分层土壤模型格林函数, 基于特定土壤模型, 计算了土壤模型变化给 ESP 带来的变化, 结果表明满足一定条件时, 即可确定土壤模型, 以避免构建更复杂的模型以记及更大地理范围、更精细的土壤结构, 并通过理论推导和数值仿真给出了判据及其阈值. 研究成果对于充分发挥直流输电的独特优势、减小其不利影响具有一定指导意义.

2 理论计算方法及验证

2.1 理论计算方法

图 1 为三维复合分层土壤模型示意图, $S(x_0, y_0, z_0)$ 为点电源, 平面 xOy 代表地平面. z 轴方向水平分 3 层, 各层土壤电阻率和层厚分别为 $\rho_{z1}, \rho_{z2}, \rho_{z3}$ 和 z_1, z_2-z_1, ∞ ; 然后把 z 轴方向水平第 1 层土壤在 x 轴方向竖直分 3 层, 各层土壤电阻率和层厚分别为 $\rho_{x1}, \rho_{x2}, \rho_{x3}$ 和 ∞, x_2-x_1, ∞ ; 最后把 x 轴方向竖直第 1 层土壤在 y 轴方向竖直分 3 层, 各层土壤电阻率和层厚分别为 $\rho_{y1}, \rho_{y2}, \rho_{y3}$ 和 ∞, y_2-y_1, ∞ .

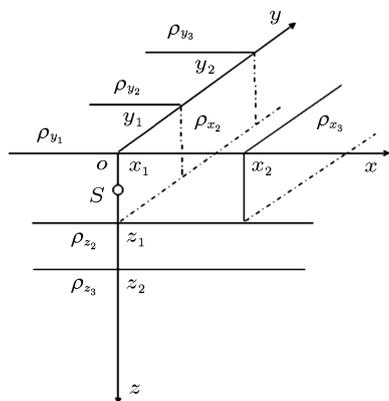


图 1 三维复合分层土壤模型

若 x, y 轴方向土壤不分层, 把图 1 水平第 1 层看作是电阻率为 ρ_{x1} 的均匀土壤, 即 $\rho_{z1} = \rho_{x1}$, 则三维复合分层土壤模型转化为水平分层土壤模型, 除点电源 S 处, 点源在其他各空间位置产生的电位 U 均满足拉普拉斯方程 [18,19]:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = -\frac{1}{\epsilon_i} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0). \quad (1)$$

通过傅里叶变换, 得到频域拉普拉斯方程 [20,21]:

$$\frac{d^2 \tilde{G}}{dz^2} + \gamma^2 \tilde{G} = -\frac{\delta(z-z_0)}{\epsilon_i}. \quad (2)$$

若点源和场点均置于第 1 层土壤, 可得频域格林函数为

$$\tilde{G}_{11} = \frac{1}{2\epsilon_1 \gamma} \left[e^{-\gamma(z-z_0)} + e^{-\gamma(z+z_0)} - \frac{R(\gamma)}{1-R(\gamma)e^{-2\gamma h_1}} S_{\text{exp}} \right], \quad (3)$$

其中,

$$S_{\text{exp}} = e^{-\gamma[z+(2h_1+z_0)]} + e^{-\gamma[z+(2h_1-z_0)]} + e^{-\gamma[-z+(2h_1+z_0)]} + e^{-\gamma[-z+(2h_1-z_0)]},$$

$$R(\gamma) = \frac{k_{12} + k_{23} e^{-2\gamma h_2}}{1 + k_{12} k_{23} e^{-2\gamma h_2}},$$

$$k_{12} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}, \quad k_{23} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_2}{\epsilon_3 + \epsilon_2}.$$

选取准动态镜像点 b_{zi} , 用点匹配法拟合 $\frac{R(\gamma)}{1-R(\gamma)e^{-2\gamma h_1}}$ [22,23], 可得

$$\frac{R(\gamma)}{1-R(\gamma)e^{-2\gamma h_1}} = \sum_{i=1}^{n_z} a_{zi} e^{b_{zi} \gamma}, \quad (4)$$

其中 b_{zi} 为实数, a_{zi} 为复数, 在模拟镜像法中, 避免了复镜像法中复杂的 Prony 法 [24] 或 GPOF 法计算, 与复镜像法相比数值稳定性更高. 另外, 模拟镜像法在选取镜像的位置上有较大的随意性, 而复镜像法的采样点必须选在 k_z 平面上的某些固定路径上. 本文是根据经典镜像理论来选取镜像的位置, 物理意义非常明确.

把 (4) 式代入 (3) 式, 进行傅里叶逆变换得直角坐标系中格林函数:

$$G_{11z}(x_0, y_0, z) = \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left[\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r'_0} - \sum_{i=1}^{n_z} a_{zi} \left(\frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}} + \frac{1}{r_{i3}} + \frac{1}{r_{i4}} \right) \right], \quad (5)$$

式中,

$$r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2},$$

$$r'_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2},$$

$$r_{i1} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (2z_1 + z + z_0 - b_{zi})^2},$$

$$r_{i2} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (2z_1 + z - z_0 - b_{zi})^2},$$

$$r_{i3} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (2z_1 - z + z_0 - b_{zi})^2},$$

$$r_{i4} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (2z_1 - z - z_0 - b_{zi})^2}.$$

图 1 中 x 方向为竖直 3 层土壤模型, 其格林函数的求解和水平分层相同, 当点源和场点均在第 1 层时, 可得到直角坐标系下的格林函数:

$$G_{11x}(x, y_0, z_0) = \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left[\frac{1}{r_0} - \sum_{j=1}^{n_x} a_{xj} \frac{1}{r_{j1}} \right], \quad (6)$$

式中, $r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$, $r_{j1} = \sqrt{[x - (-x_0 - x_2 + x_1 - b_{xj})]^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$.

同理, 当点源和场点均在第 1 层时, y 轴方向直角坐标系下格林函数表达式为

$$G_{11y}(x_0, y, z_0) = \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left[\frac{1}{r_0} - \sum_{k=1}^{n_y} a_{yk} \frac{1}{r_{k1}} \right], \quad (7)$$

式中, $r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$, $r_{k1} = \sqrt{(x-x_0)^2 + [y - (-y_0 - y_2 + y_1 - b_{yk})]^2 + (z-z_0)^2}$. 在实际竖直分层土壤中, 还要考虑地面影响, 这时格林函数表达式是 (6), (7) 式加上源点的镜像作用, 即分别把 (6), (7) 式中 z_0 替换为 $-z_0$.

从 (6) 式可知, 在 x 方向竖直分层土壤模型中, 镜像点 y 和 z 坐标不变, 仅 x 坐标变化, 可以想象在 x 轴方向匹配有几个镜像点, 在它们作用下 x 方向竖直分层边界条件得以满足. 因此, 在这几个镜像点作用下, 可以将上层土壤看作是电阻率为 ρ_{x1} 的均匀土壤. 这时三维复合分层土壤模型变成二维复合分层土壤模型, 而上述的镜像点就可以看作是在 x 轴方向竖直第 1 层中的源点. 为了满足 y 轴方向的边界条件, 这些镜像点须根据 (7) 式的关系, 再在 y 轴方向镜像, 这时二维复合分层土壤模型转化为水平分层土壤模型, 而上述的镜像点就可以看作是 z 轴方向水平第 1 层中的源点. 同理, 为了满足 z 轴方向的边界条件, 这些镜像点根据 (5) 式的关系, 再在 z 轴方向镜像. 在上述所有镜像点作用下, 求出的电位表达式就是三维复合分层土壤模型的格林函数 [17].

由上可知, 当点源和场点均在 x, y, z 方向第 1 层时, 三维复合分层土壤模型下格林函数可以写为

$$\begin{aligned} G_{11z}(x, y, z) &= \frac{\rho_{x1}}{4\pi} \left\{ H_{11}(x, y, z_0) + H_{11}(x, y, -z_0) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^{n_z} a_{zi} [H_{11}(x, y, z_0 + 2z_1 - b_{zi}) \right. \\ &\quad \left. + H_{11}(x, y, z_0 - 2z_1 + b_{zi}) \right\}, \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} &+ H_{11}(x, y, -z_0 + 2z_1 - b_{zi}) \\ &+ H_{11}(x, y, -z_0 - 2z_1 + b_{zi}) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

式中,

$$\begin{aligned} &H_{11}(x, y, z_0) \\ &= \left[G_{11x}(x, y_0, z_0) - \sum_{k=1}^{n_y} a_{yk} G_{11x}(x, -y_0 - y_2 \right. \\ &\quad \left. + y_1 - b_{yk}, z_0) \right] / (\rho_{x1}/4\pi). \end{aligned}$$

若源点和场点在不同土壤层, 则相应地改变水平分层模型和垂直分层模型镜像点位置及大小, 按照上述方法即可求得相应的格林函数.

2.2 理论有效性及可信性

本文根据推导的三维复合分层土壤模型格林函数开发了 ESP 计算程序. 为了验证本文方法的有效性及其可行性, 在相同参数条件下与文献 [11] 计算结果进行了比较. 文献 [11] 分别采用简易算式和 CDEGS 仿真软件计算了晋东南地区 (晋城、长治) 各主要站点 ESP, 分析了山西 - 江苏 ± 500 kV 高压直流输电工程直流单极运行后对晋东南地区 220 kV 及以上变电站的影响. 其中, 土壤参数为: 电阻率 $\rho_{z1}, \rho_{z2}, \rho_{z3}$ 分别为 0.2, 10, 0 k Ω ·m, 层厚 h_{z1}, h_{z2} 分别为 4, 30 km, 接地极采用双环设计, 入地电流 3000 A, 埋深 3 m. 得到镜像位置分别为 $b_{z1} = 26, b_{z2} = 34, b_{z3} = 60, b_{z4} = 42$ km, 相应幅值分别为 $a_{z1} = -28.91, a_{z2} = 56.84, a_{z3} = 22.31, a_{z4} = -51.88$. CDEGS 仿真软件是计算 ESP 比较权威的方法, 三维复合分层土壤模型是作者在总结前人工作基础上所提出, 故将本文三维模型过渡到水平分层土壤模型, 在相同的计算参数下用模拟镜像法计算了 ESP, 与文献 [11] 计算结果进行了比对研究, 结果表示在图 2 中. 从图 2 可以看出, 随着距离接地极距离 (r) 的增加, ESP 逐渐减小, 约呈负指数衰减趋势, 本文计算结果与文献 [11] 中 CDEGS 软件仿真结果符合得很好, 与简易算式计算结果相比精度有较大提高, 验证了本文方法的可靠性, 表明本文方法和模型可以用于计算流过变电站中性点直流量. 实际土壤结构复杂且变电站分布比较广泛, 合理选择土壤模型对有效分析流过变电站中性点直流量问题具有重要意义, 本文模型可以考虑实际土壤同时在三维方向的变化, 能够更加准确地模拟

实际土壤,采用三维复合分层土壤模型有助于准确计算 ESP.

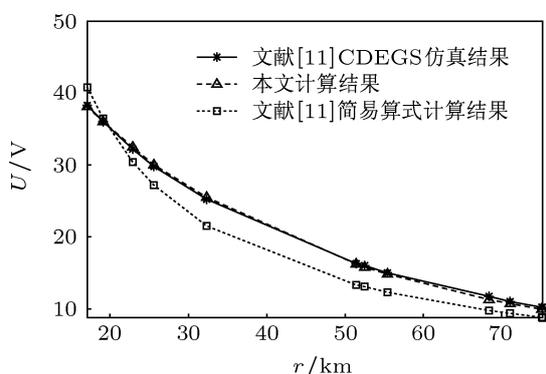


图2 本文计算结果与文献[11]对比研究

3 土壤模型选取方法

3.1 水平分层土壤模型选取方法

为研究水平分层土壤模型选取方法,假定土壤模型 A 为水平 3 层,土壤模型 B 为水平 2 层, B 和 A 前两层土壤参数相同. A 模型参数为:电阻率 $\rho_{z1}, \rho_{z2}, \rho_{z3}$ 分别为 1, 2, 10 $k\Omega \cdot m$, 层厚 h_{z1}, h_{z2} 分别为 5, 30 km. 土壤模型变化对 ESP 的影响记为 ΔESP , 分析了第 1, 2 层土壤参数对 ΔESP 的影响, 结果列于表 1 中. 直流接地极由直径为 600 m 的单圆环构成,

埋深 4 m, 入地电流为 3000 A.

从表 1 可以看出, 第 1, 2 层土壤参数均对 ΔESP 带来影响, 随着极距的增加 ΔESP 越来越小, ΔESP 约与 Δr 成正比例关系, 由于模型 A 和 B 前两层土壤参数完全相同, 故 ΔESP 即表示第 3 对 ESP 带来的影响, ΔESP 越小, 表明第 3 层对 ESP 的影响越小. 随着 ρ_{z1} 的变小或 h_{z1} 的变大, ΔESP 越来越小且随着极距的变化越来越均匀, 表明随着 ρ_{z1} 的变小或 h_{z1} 的变大, 第 3 层对 ESP 的影响越小且越均匀.

从表 1 还可以看出, 对于相同极距, 当 h_{z2} 不变时, 若 $\rho_{z2} > \rho_{z1}$, 随着 ρ_{z2} 的变大, ΔESP 越来越小, 若 $\rho_{z2} < \rho_{z1}$, 随着 ρ_{z2} 的变小, ΔESP 越来越小; 当 ρ_{z2} 不变时, 无论 $\rho_{z2} > \rho_{z1}$ 或 $\rho_{z2} < \rho_{z1}$, 随着 h_{z2} 的变大, ΔESP 越来越小. 另外, 随着 $|\rho_{z2} - \rho_{z1}|$ 或 h_{z2} 的变大, ΔESP 随极距的变化越均匀, 即某土壤分层与表层电阻率相差越大、层厚越大, 其下各土壤分层对表层 ESP 的影响越均匀. 在评估流过变电站中性点直流电流时, 关心的是变电站间电位差且变电站大多建在距离接地极数十千米之外, 故当某土壤分层与表层电阻率相差较大、层厚较大时, 忽略其下各层对变电站间电位差的影响在工程上是允许的, 这将减小土壤模型的复杂度, 易于编程且具有较高的准确性.

表 1 第 1, 2 层土壤参数对 ΔESP 的影响 ($\rho_{z1}, \rho_{z2}/k\Omega \cdot m, h_{z1}, h_{z2}/km$)

极距	距接地极不同距离 (km) 处的 ΔESP (V)													
	ρ_{z1}	ρ_{z1}	ρ_{z1}	h_{z1}	h_{z1}	ρ_{z2}	ρ_{z2}	ρ_{z2}	ρ_{z2}	h_{z2}	h_{z2}	h_{z2}/ρ_{z2}	h_{z2}/ρ_{z2}	
	1	0.8	0.5	10	40	4	8	0.8	0.5	50	100	50/0.5	100/0.5	
30	25.5	24.1	21.2	20.9	10.4	21.5	7.0	20.5	16.5	17.6	9.5	10.5	5.4	
40	24.7	23.4	20.6	20.4	10.3	20.9	6.9	19.9	16.1	17.2	9.5	10.4	5.4	
50	23.8	22.6	20.0	19.8	10.2	20.1	6.6	19.2	15.6	16.6	9.4	10.2	5.4	
60	22.9	21.7	19.4	19.2	10.1	19.3	6.4	18.5	15.1	16.3	9.3	10.0	5.4	
80	21.0	20.1	18.1	18.0	9.8	17.8	6.0	17.2	14.1	15.5	9.2	9.7	5.3	
100	19.3	18.5	16.8	16.8	9.5	16.3	5.5	16.1	13.2	14.7	9.0	9.3	5.2	
120	17.8	17.2	15.7	15.7	9.2	15.0	5.1	15.0	12.5	13.9	8.8	8.9	5.1	

由上分析, B 型相当于 A 模型的简化, 简化效果与第 1, 2 层土壤参数密切相关, 若简化效果用 k 评价, 当 $\rho_{z2} > \rho_{z1}$ 时, 简化效果约与 ρ_{z2}, h_{z1} 和 h_{z2} 成正比, 约与 ρ_{z1} 成反比, 即 $k \propto \rho_{z2}h_{z1}h_{z2}/\rho_{z1}$; 当 $\rho_{z2} < \rho_{z1}$ 时, 简化效果约与 ρ_{z1}, h_{z1} 和 h_{z2} 成正比, 约与 ρ_{z2} 成反比, 即 $k \propto \rho_{z1}h_{z1}h_{z2}/\rho_{z2}$. 这可做如下

解释:

(a) 水平三层模型中, 设 $\rho_{z2} \gg \rho_{z1}, h_{z2} \gg h_{z1}$, 则每单位长度上由上层土壤流入中间层的电流很小, 在计算中可以假定上层土壤中入地电流的方向近似水平; 又因为 ρ_{z3} 极小, 在计算中可以近似认为入地电流垂直穿过中间层进入第 3 层流动, 在上层土

壤中^[11]

$$-d\varphi = \frac{\rho_{z1} dr}{2\pi r h_{z1}} I \text{ 或 } \frac{d\varphi}{dr} = -\frac{\rho_{z1} I}{2\pi r h_{z1}}, \quad (9)$$

中间层土壤中

$$-dI = \frac{\varphi}{\rho_{z2} h_{z2} / (2\pi r dr)} \text{ 或 } \frac{dI}{dr} = -\frac{2\pi r \varphi}{\rho_{z2} h_{z2}}, \quad (10)$$

式中, 直流地表电位为 φ , 上层土壤中的电流为 I , 入地总电流为 I_0 , r 为某站点到电流注入点的距离.

由 (9) 和 (10) 式, 并设 $x_1 = \sqrt{\rho_{z1}/h_{z1}}$, $x_2 = \sqrt{1/\rho_{z2}h_{z2}}$, $X = jx_1x_2r$, 得零阶贝塞尔方程

$$\frac{d^2\varphi}{dX^2} + \frac{d\varphi}{XdX} + \varphi = 0, \quad (11)$$

其解为 $\varphi(r) = C_1J_0(jx_1x_2r) + C_2H_0(jx_1x_2r)$, J_0 , H_0 分别为第一、三类零阶贝塞尔函数. 将 $\varphi(r)$ 对 r 求导, 并代入 (9) 式得:

$$I = -\frac{2\pi r}{x_1^2} \frac{d\varphi}{dr} = -2\pi r [C_1J_1(jx_1x_2r) + C_2H_1(jx_1x_2r)] j \frac{x_2}{x_1}, \quad (12)$$

式中, J_1 , H_1 分别为第一、三类一阶贝塞尔函数. J_0 具有在 $r = 0$ 时为有限值的性质, H_1 具有当 $r \rightarrow \infty$ 时为 0 的性质. 根据边界条件求得:

$$\frac{I}{I_0} = -\frac{\pi}{2} x_1x_2r H_1(jx_1x_2r). \quad (13)$$

由文献 [25] 可知, 随着 x_1x_2r 的增大 (也即 r 的增大), 电流将很快在上层土壤中消失, 当 $x_1x_2r = 4$ 时, 流经上层的电流只有全部入地电流的 5%, 此时即可认为电流已基本全转入第 3 层流动. 故可得电流基本转入下层流动的距离为

$$r = 4\sqrt{\rho_{z2}h_{z1}h_{z2}/\rho_{z1}}, \quad (14)$$

上式表明土壤参数 ρ_{z1} , ρ_{z2} , h_{z1} 和 h_{z2} 将直接影响到电流转入下层的速度, 上层土壤越厚, ρ_{z2}/ρ_{z1} 越大,

电流在上层土壤中消失得越慢, 电流进入第 3 层的速度越慢, 那么 ESP 受第 3 层的影响越小, 土壤模型简化对 ESP 带来的影响也越小.

(b) 同理, 设 $\rho_{z2} \ll \rho_{z1}$, $h_{z2} \gg h_{z1}$, ρ_{z2} 极小且 ρ_{z3} 极大, 可得电流基本转入第 3 层流动的距离为

$$r = 4\sqrt{\rho_{z1}h_{z1}h_{z2}/\rho_{z2}}, \quad (15)$$

上式表明土壤参数 ρ_{z1} , ρ_{z2} , h_{z1} 和 h_{z2} 将直接影响到电流转入下层的速度, 中层土壤越厚, ρ_{z1}/ρ_{z2} 越大, 电流在中层土壤中消失得越慢, 电流进入下层越慢, 那么 ESP 受第 3 层的影响越小, 土壤模型简化带来的影响也越小.

由上述分析可见, 土壤模型简化效果主要与表层和待估层的电阻率和层厚有关, 设待估层电阻率和层厚为 ρ_i , h_i , 表层电阻率和层厚为 ρ_1 , h_1 , 那么 $\rho_i > \rho_1$ 时, $\alpha_1 = \sqrt{\rho_i h_i h_1 / \rho_1}$ 越大, 简化土壤模型效果越好; $\rho_i < \rho_1$ 时, $\alpha_2 = \sqrt{\rho_1 h_i h_1 / \rho_i}$ 越大, 简化土壤模型效果越好. 待评层与表层距离越大, 简化土壤模型效果越好. 因此, 虽然本文分析中所用的模型是特定的, 但由此得到的结果却具有普遍性. 通过大量仿真表明, 当 $\rho_i > \rho_1$ 时, 若 $\alpha_1 > 2.6 \times 10^4$, 忽略 ρ_i 以下各层基本上不改变变电站间电位差, 可作为判断能否简化土壤模型的阈值; 当 $\rho_i < \rho_1$ 时, 阈值 $\alpha_2 > 2.6 \times 10^4$.

3.2 竖直分层土壤模型简化方法

用同样的方法研究了竖直分层土壤模型简化方法, 结果列于表 2 中. 其中, 原始土壤模型参数: 电阻率 ρ_{x1} , ρ_{x2} , ρ_{x3} 分别为 1, 1.5, 5 kΩ·m, 第 2 层分界面 h_{x1} , h_{x2} 分别距接地极 30, 50 km. 直流接地极处于竖直第 1 层, 由直径为 600 m 的单圆环构成, 埋深 4 m, 入地电流为 3000 A.

表 2 第 1, 2 层土壤参数对 ΔESP 的影响 (ρ_{x1} , $\rho_{x2}/k\Omega\cdot m$, h_{x1} , h_{x2}/km)

极距	距接地极不同距离 (km) 处 ΔESP (V)												
	ρ_{x1}	ρ_{x1}	ρ_{x1}	h_{x1}	h_{x1}	ρ_{x2}	ρ_{x2}	ρ_{x2}	ρ_{x2}	h_{x2}	h_{x2}	h_{x2}/ρ_{x2}	h_{x2}/ρ_{x2}
	1	0.5	0.1	50	50	2.5	4.0	0.8	0.1	70	100	70/0.1	100/0.1
5	2.4	0.9	0.048	1.7	0.96	1.2	0.34	3.8	4.1	1.7	1.2	2.6	1.7
10	2.6	0.9	0.051	1.8	0.99	1.3	0.36	4.0	4.3	1.8	1.2	2.7	1.7
15	2.7	1.0	0.054	1.8	1.0	1.4	0.38	4.3	4.4	1.9	1.3	2.7	1.8
20	2.9	1.0	0.058	1.9	1.0	1.5	0.41	4.5	4.6	1.9	1.3	2.8	1.8
25	3.1	1.1	0.062	2.0	1.1	1.6	0.43	4.8	4.9	2.0	1.4	2.9	1.8
30	3.3	1.2	0.067	2.1	1.1	1.7	0.47	5.1	5.1	2.1	1.4	3.0	1.8

从表 2 可以看出, 竖直分层土壤模型下模型简化对 ΔESP 的影响规律与水平分层模型相似, 随着 $|\rho_{x2} - \rho_{x1}|$ 或 $h_{x2} - h_{x1}$ 的变大, 第 3 层对第 1 层 ESP 的影响变小且影响变均匀, 即某土壤分层与目标层电阻率相差越大、层厚越大, 其后各土壤分层对目标层 ESP 影响越小. 同样, 当 $\rho_{x2} > \rho_{x1}$ 时, 可用 $\beta_1 = \sqrt{\rho_{x2}h_{x1}(h_{x2} - h_{x1})/\rho_{x1}}$ 来衡量简化效果, β_1 越大, 电流进入第 3 层速度越慢, 那么 ESP 受第 3 层影响越小, 土壤模型简化效果也越好; 当 $\rho_{x2} < \rho_{x1}$ 时, $\beta_2 = \sqrt{\rho_{x1}h_{x1}(h_{x2} - h_{x1})/\rho_{x2}}$ 越大, 简化效果越好. 通过大量仿真表明, 竖直分层土壤模型下阈值 β_1, β_2 约为 3.9×10^4 , 当大于阈值时, 在评估流过目标层变电站中性点的直流量时, 忽略其后各层在工程上是允许的.

3.3 三维复合分层土壤模型简化方法

三维复合分层土壤模型下土壤分层更加复杂, 将上述水平和竖直分层土壤模型简化判据应用到复合分层土壤模型, 当满足判据要求时即可确定土壤模型并准确求得流过变电站中性点的直流量, 从而避免考虑更加复杂的分层情况.

4 三维复合复层土壤模型下模型简化对流过变压器中性点直流量的影响

为验证土壤模型简化方法的有效性, 进行如下算例分析, 原始土壤模型为三维复合分层土壤模型, 如图 1 所示. 土壤模型参数: $\rho_{y1}, \rho_{y2},$

$\rho_{y3}, \rho_{x2}, \rho_{x3}, \rho_{z2}$ 和 ρ_{z3} 分别为 0.5, 10, 5, 0.1, 1, 20 和 $2 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$; y_1, y_2, x_1, x_2, z_1 和 z_2 分别为 50, 100, 0, 40, 40 和 360 km; 得 $\alpha_1, \beta_{2x}, \beta_{2y}$ 分别约为 $7.6 \times 10^5, 6.1 \times 10^4$ 和 2.2×10^5 , 均大于阈值. 因此可以把土壤模型简化为 x, y 方向竖直 2 层和 z 方向水平 2 层. 为验证推断的可靠性, 基于场路耦合算法, 计算了土壤模型简化前后流过变电站 B, C 中性点的直流电流, 并比较了不同交流网络参数下效果, 结果列在表 3 中. 直流感地极与交流网络相对位置和连接关系如图 3 所示. 其他计算参数如下:

- 1) 直流接地极坐标为 $(-150, 0, 0.004)$, 交流电网全部处于 x, y 竖直第 1 层, 变电站 B, C 坐标为 $(-120, 0, 0.0008), (-20, 0, 0.0008)$, 杆塔间距为 0.5 km, 输电线路长度为 100 km;
- 2) 直流接地极由 800 和 600 m 的同心圆环构成, 埋深 4 m, 接地极入地电流 5 kA;
- 3) 变电站接地网为 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$, 埋深 0.8 m; 杆塔接地体为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$, 埋深 1 m;
- 4) 假设输电线路为单回 220 kV 线路, 每相导线单位长度直流电阻为 $0.09 \Omega\cdot\text{km}$, 地线单位长度直流电阻为 $2.5 \Omega\cdot\text{km}$, 忽略变压器绕组电阻.

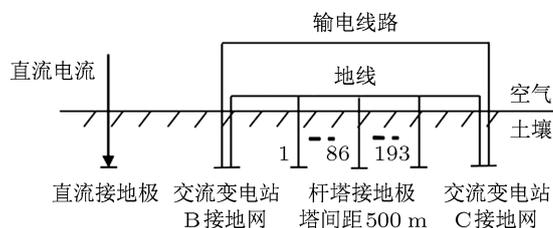


图 3 直流感地极与交流网络相对位置和连接关系

表 3 选取不同土壤模型对流过变压器中性点直流电流 (I/A) 的影响

变电站	简化模型						原模型					
	1 回	2 回	3 回	0.3	0.6	0.8	1 回	2 回	3 回	0.3	0.6	0.8
B	-4.81	-6.02	-8.02	-5.73	-4.46	-3.88	-4.80	-6.01	-8.01	-5.72	-4.45	-3.87
C	4.81	6.02	8.02	5.73	4.46	3.88	4.80	6.01	8.01	5.72	4.45	3.87

从表 3 可以看出, 原土壤模型简化后, 流过变压器中性点的直流电流基本不变, 且随着交流线路回数 and 变电站接地电阻变化, 简化效果仍然较好, 证明了本文所提土壤模型选取方法的有效性.

5 结论

针对如何构造合理土壤模型来准确计算流过变压器中性点的直流电流难题, 首次利用物理意义

明确的模拟镜像法推导出三维复合分层土壤模型格林函数, 基于水平和竖直分层土壤模型, 分析了不同土壤配置下土壤模型对 ESP 的影响, 提出了合理选取土壤模型的判据及其阈值. 结论如下:

- 1) 水平 (竖直) 分层土壤模型下, 随着极距 r 的增加, 待估层对 ESP 影响减小, ΔESP 约与 Δr 成正比关系; 待估层与表层 (目标层) 电阻率相差越大、层厚越大, ΔESP 随 r 变化越均匀, 即 ΔESP 随

Δr 变化越缓慢; 从理论上论证了待估层对 ESP 的影响规律, 表明 ΔESP 与电流流入待估层速度有关, 电流进入待估层速度越慢, 待估层对 ESP 影响越小且越均匀, 反之待估层对 ESP 影响越大;

2) 水平 (竖直) 分层土壤模型下, 待估层与表层 (目标层) 电阻率相差越大、层厚越大, 待估层对 ESP 影响越均匀, 当满足下面 (3), (4) 判据时, 忽略待估层以下 (后) 各层仅改变 ESP 绝对值, 基本不改变各点电位差, 从而可以确定土壤模型, 避免土壤模型选取的盲目性和随意性;

3) 水平分层土壤模型下, 可用 $\alpha_1 = \sqrt{\rho_i h_i h_1 / \rho_1}$ ($\rho_i > \rho_1$) 或 $\alpha_2 = \sqrt{\rho_1 h_i h_1 / \rho_i}$ ($\rho_i < \rho_1$) 评价待估层

对 ESP 的影响程度, α_1, α_2 越大, 待估层对 ESP 的影响越均匀, 当 $\alpha_1, \alpha_2 \geq 2.6 \times 10^4$ 时, 选取土壤模型时可以忽略 ρ_i 以下各层;

(4) 竖直分层土壤模型下, 可用 $\beta_1 = \sqrt{\rho_i h_i h_1 / \rho_1}$ ($\rho_i > \rho_1$) 或 $\beta_2 = \sqrt{\rho_1 h_i h_1 / \rho_i}$ ($\rho_i < \rho_1$) 评估待估层对 ESP 的影响程度, β_1, β_2 越大, 待估层对 ESP 的影响越均匀, $\beta_1, \beta_2 \geq 3.9 \times 10^4$ 时, 选取土壤模型时可以忽略 ρ_i 以后各层;

5) 三维复合分层土壤模型下土壤分层更复杂, 运用结论 3) 和 4) 可有效减少模型复杂度, 易于编程且具有较高精度。

- [1] Jiang X L, Wang S H, Zhang Z J, Hu J L, Hu Q 2010 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **17** 71
- [2] Li X P, Wen X S, Markham P N, Liu Y L 2010 *IEEE Trans. Power Del.* **25** 2504
- [3] Liao K, He Z Y, Li X P 2012 *Automation of Electric Power Systems* **36** 1 (in Chinese) [廖凯, 何正友, 李小鹏 2012 电力系统自动化 **36** 1]
- [4] Wei D J 2008 *Power System Technology* **32** 75 (in Chinese) [魏德军 2008 电网技术 **32** 75]
- [5] Dong X H, Yang W, Tang C, Liu G 2009 *High Voltage Engineering* **35** 1546 (in Chinese) [董晓辉, 杨威, 唐程, 刘刚 2009 高电压技术 **35** 1546]
- [6] Boldue L, Granger M, Saintonge J 2005 *IEEE Trans. Power Del.* **20** 163
- [7] Zeng R, Yu Z Q, He J L, Zhang B, Niu B 2011 *IEEE Trans. Power Del.* **26** 2785
- [8] Zhu Y Y, Jiang W P, Zeng Z H, Yin Y H 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 1 (in Chinese) [朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 印永华 2005 中国电机工程学报 **25** 1]
- [9] Hao Z G, Yu Y, Zhang B H, Cheng L Y, Cao R F, Ding M S, Zhang J 2009 *Electric Power Automation Equipment* **29** 10 (in Chinese) [郝治国, 余洋, 张保会, 程临燕, 曹瑞峰, 丁茂生, 张军 2009 电力自动化设备 **29** 10]
- [10] Villas J E T, Portela C M 2003 *IEEE Trans. Power Del.* **18** 867
- [11] Ren Z C, Xu J G, Zhang Y K, Zhen W, Wu G N 2011 *Transactions of China Electrotechnical Society* **26** 256 (in Chinese) [任志超, 续建国, 张一坤, 甄威, 吴广宁 2011 电工技术学报 **26** 256]
- [12] Xiao C Y, Lei Y Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1950 (in Chinese) [肖春燕, 雷银照 2005 物理学报 **54** 1950]
- [13] Liang C H, Zhu Q X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2202 (in Chinese) [梁昌洪, 褚庆昕 2002 物理学报 **51** 2202]
- [14] Zhang B, Zeng R, He J, Zhao J, Li X, Wang Q, Cui X 2008 *IET Gener. Transm. Distrib.* **2** 185
- [15] Liu Q, Zheng J C, Li L C 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [刘曲, 郑健超, 李立涅 2007 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [16] He J J, Ye H S, Lin F C, Li H, Lu Y X, Gui Z 2007 *Proceedings of the CSEE* **27** 14 (in Chinese) [何俊佳, 叶会生, 林福昌, 李化, 卢毓欣, 桂重 2007 中国电机工程学报 **27** 14]
- [17] Li W F, Yang H G, Xu F W 2012 *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* **44** 161 (in Chinese) [李文峰, 杨洪耕, 徐方维 2012 四川大学学报: 工程科学版 **44** 161]
- [18] Shang Y, Huo B Z, Meng C N, Yuan J H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8178 (in Chinese) [尚英, 霍丙忠, 孟春宁, 袁景和 2010 物理学报 **59** 8178]
- [19] Li Y L, Wang M J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2420
- [20] Chow Y L, Yang J J, Srivastava K D 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 569
- [21] Han Z Y, Wang H N, Yao J J, Han Z Y, Yang S W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1608 (in Chinese) [韩子夜, 汪宏年, 姚敬金, 韩子夜, 杨守文 2009 物理学报 **58** 1608]
- [22] Torabian A, Chow Y L 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 1777
- [23] Shubair R M 2001 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society Boston*, January 7-13, 2001 p838
- [24] Hou W B, Liu T Q, Li X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3531 (in Chinese) [侯王宾, 刘天琪, 李兴源 2010 物理学报 **59** 3531]
- [25] Xie G R 1991 *Power System Grounding Technology* (Beijing: China Electric Power Press) p96 (in Chinese) [解广润 1991 电力系统接地技术 (北京: 中国电力出版社) 第 96 页]

The effect of soil model on earth surface potential and reasonable selection method for soil model*

Li Wen-Feng Yang Hong-Geng[†] Xiao Xian-Yong Li Xing-Yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(Received 4 January 2013; revised manuscript received 22 January 2013)

Abstract

The Green's function of three-dimensional combined-layer soil model is firstly derived using simulated image method. Based on the specified soil model, the influence of soil model on the earth surface potential (ESP) is analyzed for different soil structure configurations. It is found that difference in soil model only changes the absolute value of ESP, but the influence of ESP difference can be ignored under certain conditions. And the physical mechanism for the effect of soil parameter change on ESP is explained theoretically. One of the challenges that have not been solved effectively is how to establish the proper soil model to calculate DC current flowing through the neutral point of transformer accurately. For this challenge, the criteria and threshold value for selecting the soil model reasonably are introduced. Therefore, the arbitrariness and blindness of selecting the soil model can be avoided. The results are useful for calculating accurate results, which can further provide theoretical references for selecting substations near the HVDC ground electrode.

Keywords: Green's function, simulated image method, DC bias, soil model

PACS: 41.20.-q, 41.20.Cv, 88.80.H-, 88.80.hj

DOI: 10.7498/aps.62.144102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51077095).

[†] Corresponding author. E-mail: yangsi@mail.sc.cninfo.net