

DOI: 10.7667/PSPC180025

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

郭名文¹, 樊艳芳¹, 耿山^{1,2}, 巩晓玲³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网河北电力公司邯郸供电公司, 河北 邯郸 056000;
3. 国网新疆电力公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 为了提高复杂地质条件下接地极选址的合理性, 避免直流系统单极大地运行时入地电流对交流电网产生不利影响, 针对特高压直流接地极周边典型断裂结构建立复合土壤地质模型, 将行波法与镜像法相结合推导地表电位计算公式。运用 Matlab 仿真平台比较了水平和复合两种土壤地质模型下的地表电位分布情况, 研究断裂及其参数影响下的地表电位分布规律。结果表明: 复合土壤地质模型下地表电位更接近实测值; 大区域内断裂到接地极距离对地表电位影响较大; 接地极近区应主要考虑断裂处电阻率的影响。该结论对接地极选址及预防直流偏磁都有重要意义。

关键词: 特高压直流输电; 断裂结构; 地表电位; 土壤地质模型; 接地极极址

Study on the effect of fracture structure adjacent to ground electrodes of UHVDC power transmission lines on earth surface potential distribution

GUO Mingwen¹, FAN Yanfang¹, GENG Shan^{1,2}, GONG Xiaoling³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Handan Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Company, Handan 056000, China;

3. Changji Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Changji 831100, China)

Abstract: In order to improve the complicated soil structure reasonable grounding location and avoid HVDC system monopole ground operation into the adverse effects of the current to the power grid, a composite soil geological model is set up for the typical fracture structure near the UHVDC grounding electrode. The calculation formula of surface potential is derived by combining the traveling wave method with the mirror image method. Based on the Matlab simulation platform, the surface potential distribution of two soil models under horizontal and composite conditions is compared, and the surface potential distribution under the influence of fracture and parameters is studied. The results show that the surface potential is closer to the measured value under the composite soil geological model. The distance from the fault to the ground electrode has great influence on the surface potential in the large area. The influence of the electrical resistivity at the fracture site is mainly considered in the near area of the grounding electrode. The conclusion is of great significance to locate the site of the ground pole and prevent the DC magnetic bias.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767023) and the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2017D01C028).

Key words: UHVDC; fracture structure; earth surface potential; soil geological model; earth electrode address

0 引言

特高压直流输电(UHVDC)技术已在我国广泛应用^[1-2], 其单极大地回路运行或者双极运行单极突

然闭锁时, 接地极入地电流将在大地回路感应出地表电位^[3], 使周边区域交流电网产生直流偏磁现象^[4], 对变压器造成诸多不利影响, 严重时将危及电网正常运行^[5-7]。

地表电位(Earth Surface Potential, ESP)的准确求解是分析交流电网中直流分布进而预防和治理直流偏磁的首要环节, 其中由复杂地形引起多变的大

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767023); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2017D01C028)

地参数是地表电位研究的难点。文献[8-10]采用镜像法、复镜像法、有限元法计算 ESP，但在多层土壤模型中镜像法分析将十分复杂；文献[11-13]采用水平或垂直层状土壤结构模型分析 ESP 分布特征，却忽略了接地极影响范围内大地电性及其构造的差异，使计算产生一定误差；文献[14]提出三维大地电阻率模型建立方法并验证了模型的可靠性，但没有具体讨论模型中各参数对 ESP 分布规律的影响；文献[15-17]分别阐述了多层复杂土壤、海洋、气候对 ESP 的影响，但对断裂及其参数影响下 ESP 分布规律的研究较少。哈密地处西部断块区^[18]，区内构造运动频繁，褶皱、断裂发育明显，由断裂导致的电阻率异常随处可见。在±800 kV 哈密-郑州特高压直流(下简称±800 kV 天中特高压直流)工程送端天山换流站直流接地极附近变压器中性点直流电流的现场实测中发现，位于干敦大断裂和雅满苏大断裂区内的烟墩西变电站直流电流高达约 23 A^[19]，存在严重的直流偏磁风险，而其他断裂区外站点未出现此类问题，因此亟需对断裂影响下 ESP 分布规律做深入研究。

本文将镜像法与行波法相结合推导出复合土壤地质模型下 ESP 计算公式，在 Matlab 仿真平台中以±800 kV天中特高压直流工程为例验证模型的正确性；在大区域内研究断裂到接地极距离影响下 ESP 分布规律和直流电流分布情况；在接地极近区考虑断裂相关参数对 ESP 的影响，为接地极选址工作提供参考。

1 土壤结构模型及地表电位计算方法

1.1 地表电位的形成

特高压直流输电工程运行方式有两种：双极运行和单极大地回路运行。在双极运行时地中无直流，而在单极大地回路运行方式下将有大量直流电流注入大地，其接线方式如图 1 所示。此时直流接地极入地电流可以看作一个恒流场，会对其周围产生感应电势，使直流电流在交流电网各变电站和交流线路中流动，从而导致直流接地极周边变压器出现直流偏磁现象，严重时甚至会危及交流电网的安全。直流偏磁存在地域性，不同地质构造会直接影响大地的电性结构，断裂带内往往充填厚度和规模较大的软弱体或破碎体，造成地电阻率异常，进而改变感应电势大小，因此有必要研究断裂影响下地表电位分布规律。

1.2 模型建立与计算方法

选择合理的土壤结构模型对分析地表电位分布尤为重要，当直流接地极所在地区地质构造较单一

时，通常采用水平均匀分层模型如图 2 所示^[17]。

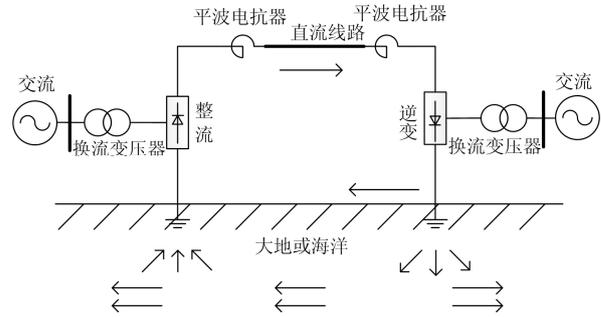


图 1 特高压直流输电单极大地回路运行示意图

Fig. 1 UHVDC transmission in ground-return operation diagram

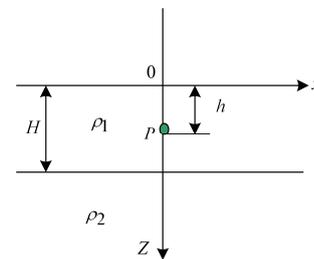


图 2 水平均匀分层模型

Fig. 2 Horizontal layer soil model

考虑到±800 kV天中特高压直流工程天山换流站岌岌台接地极周围受断裂影响而产生的大地电阻率横向变化情况，为了反映断裂对感应电势的影响，建立复合土壤地质模型如图 3 所示。模型中 h 、 H 、 H_1 、 H_2 分别为直流接地极埋深、第一层土壤厚度、断裂距离直流接地极的距离、断裂宽度， ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为第一层土壤电阻率、第二层土壤电阻率、断裂处电阻率。

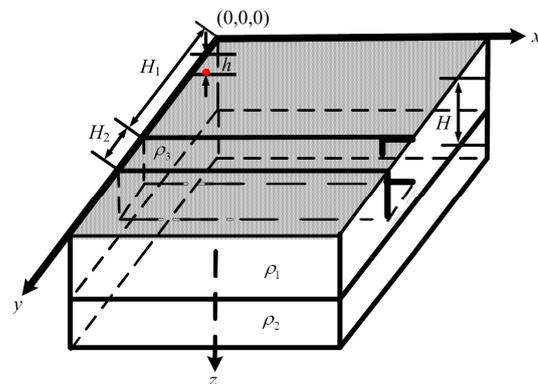


图 3 复合土壤地质模型

Fig. 3 Complex soil geological model

根据电流连续性定理，得到无限大均匀大地模型中点电源周围的电位分布，如式(1)所示。

$$f(x, y, z) = \frac{\rho I}{4\pi\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} \quad (1)$$

式中: x 、 y 、 z 分别表示任意点坐标; x_0 、 y_0 、 z_0 分别表示点电源坐标; ρ 为介质电阻率; I 为点电源电流。

将镜像法与行波法相结合推导基于复合土壤地质模型的地表电位分布计算公式, 如式(2), 它由水平分层和垂直分层 ESP 叠加而成^[16]。

$$U = U_1 + U_2 \quad (2)$$

其中水平均匀分层模型下 ESP 分布镜像如图 4 所示。根据行波法的原理, 接地极电流在土壤中传播时遇到电阻率不同的土壤介质分界面会发生反射与折射。反射系数 α 和折射系数 β 如式(3)、式(4)所示; 反射电流 I_{fan} 和折射电流 I_{zhe} 如式(5)、式(6)所示^[20]。其中 $\rho_n (n=1, 2, 3)$ 为相应土壤的电阻率, 得到的 ESP 如式(7)所示。

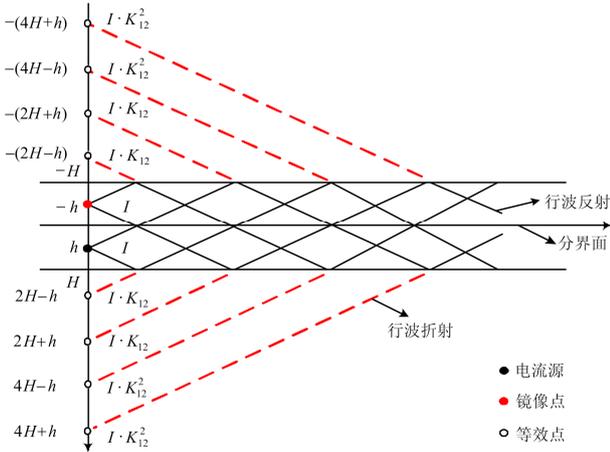


图 4 水平分层土壤结构下 ESP 分布镜像图

Fig. 4 ESP distribution mirror image under horizontal stratified soil structure

$$\alpha = \frac{\rho_{n+1} - \rho_n}{\rho_n + \rho_{n+1}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2\rho_n}{\rho_n + \rho_{n+1}} \quad (4)$$

$$I_{\text{fan}} = \frac{\rho_{n+1} - \rho_n}{\rho_n + \rho_{n+1}} I_d \quad (5)$$

$$I_{\text{zhe}} = \frac{2\rho_n}{\rho_n + \rho_{n+1}} I_d \quad (6)$$

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \cdot [f(x_0) + \sum_{m=1}^{\infty} k_{12}^m \cdot g(x_0)] \quad (7)$$

与水平均匀分层模型类似, 可得到垂直分层 ESP 计算公式, 由于场域内站点与断裂的相对位置

不同, 可分为待求点与直流接地极位于断裂同一侧、待求点位于断裂上以及待求点与直流接地极分别位于断裂两侧三种情况, 见式(8)一式(10)中的 U_2 , 其中部分参数的表达式如式(11)所示。

$$U_2 = \frac{\rho_3 I}{4\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & f(x_0) + k_{13} \cdot f(M) + (1 - k_{13}^2) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} k_{13}^n \cdot f(N) + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} k_{12}^m \cdot [g(x_0) + k_{13} \cdot g(M) + (1 - k_{13}^2) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} k_{13}^n \cdot g(N)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$U_2 = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \cdot (1 + k_{13}) \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} k_{13}^n \cdot f(T) + f(N) + \sum_{m=1}^{\infty} k_{12}^m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} k_{13}^n \cdot g(T) + g(N) \right] \quad (9)$$

$$U_2 = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \cdot (1 + k_{13}) \cdot \left[f(0) + \sum_{m=1}^{\infty} k_{12}^m \cdot g(0) + \sum_{n=1}^{\infty} k_{13}^n \cdot f(T) + \sum_{m=1}^{\infty} k_{12}^m \cdot \sum_{n=1}^{\infty} k_{13}^n \cdot g(T) \right] \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & f(x) = r(x, y_0, P) + r(x, y_0, Q) \\ & g(x) = r(x, y_0, A) + r(x, y_0, B) + r(x, y_0, C) + r(x, y_0, D) \\ & A = 2(m-1)H + h, B = 2mH - h, C = -(2mH + h) \\ & D = -2(m+1)H + h, M = 2H_2 - 2(H_1 - H_2) \\ & N = -2nH_2 - 2(H_1 + H_2), P = -(2H - h) \\ & Q = -h, T = 2nH_2 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: r 表示电流源到镜像点与等效点之间距离; k_{12} 与 k_{13} 分别表示折射系数与反射系数, $k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$, $k_{13} = \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_3}$; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别代表浅层、深层、断裂处电阻率; H 、 H_1 、 H_2 分别代表浅层土壤厚度、断裂距直流接地极距离、断裂宽度; h 代表直流接地极埋深。

2 两种模型下直流电流分布计算

哈密地区跨越哈萨克斯坦-准噶尔板块和塔里木板块两个地质构造单元, 发育有多条大断裂。针对 ± 800 kV 天中特高压直流输电工程送端岌岌台接地极附近的某些变电站受断裂影响出现的直流偏磁问题, 本文基于 Matlab/Simulink 仿真软件, 搭建如图 5 所示的哈密地区电网结构, 采用 1.2 节的复合土壤地质模型仿真计算额定入地电流为 2500 A 时各变电站中性点直流电流分布, 与水平均匀分层模型下直流电流计算结果相比较, 其未考虑断裂结构的影响。对比分析两种土壤模型即有无断裂结构下接地极入地电流大小, 利用哈密地区实测数据验证复合土壤地质模型。接地极附近变电站直流电流分布如图 6 所示(取流入为正)。

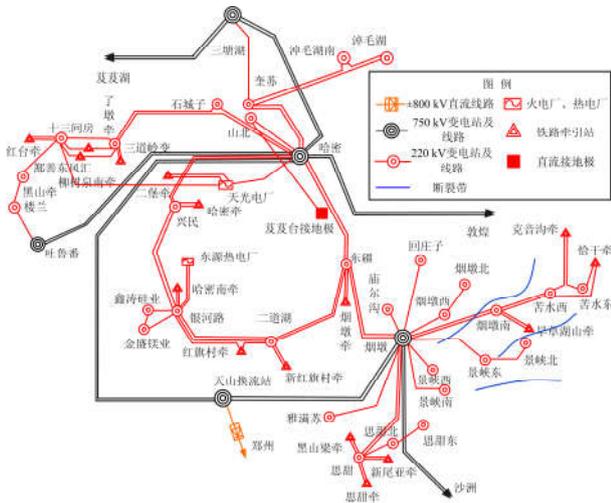


图5 哈密地区电网构架

Fig. 5 Hami regional power grid structure

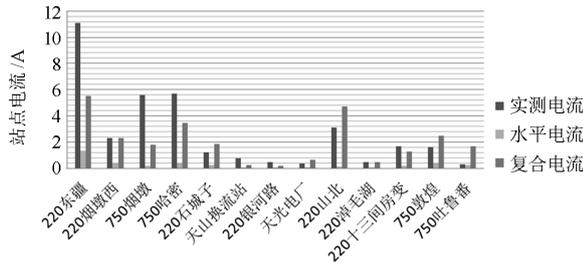


图6 接地极附近站点电流分布情况

Fig. 6 Current distribution of site near ground pole

计算时取 $\rho_1=100 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2=10\,000 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_3=15 \Omega \cdot \text{m}$, $H=4 \text{ km}$, $H_1=9 \text{ km}$, $H_2=50 \text{ km}$, 直流感地极形状采用同心圆环, $h=3.5 \text{ m}$, 内环半径 $A_1=350 \text{ m}$, 外环半径 $A_2=400 \text{ m}$, 各变电站的接地电阻、线路参数和变压器的直流绕组均采用实测值。

从图6可以看出, 相比于水平均匀分层模型而言, 本文理论计算值与实测值间的误差更小, 结果更准确, 进而验证了复合土壤地质模型与计算方法的正确性。说明在哈密地区直流电流分布计算中考虑断裂结构的影响更符合实际情况。

3 断裂影响下的地表电位分布规律

3.1 大区域内地表电位分布规律

研究断裂对交流电网的影响时, 在直流感地极周围较大区域内需主要考虑断裂到直流感地极的距离这一影响因素, 分析在其影响下的地表电位分布规律及直流电流分布情况。

3.1.1 断裂到直流感地极距离对地表电位分布的影响

在 Matlab 软件中进行仿真, 直流入地电流为 $5\,000 \text{ A}$, 取 $\rho_1=100 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2=10\,000 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_3=150 \Omega \cdot \text{m}$,

$H=4 \text{ km}$, $H_2=3 \text{ km}$, 分别将 H_1 设置为 1 km 、 10 km 、 30 km , 其仿真结果如图7所示。

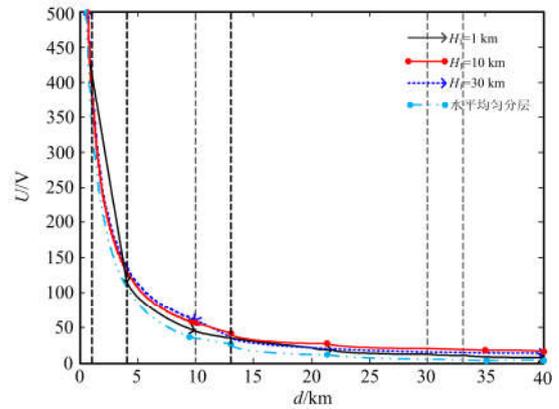


图7 断裂到直流感地极距离影响下 ESP 分布规律

Fig. 7 Regularities of distribution of distance from break to DC grounding electrode and ESP

从图7中可以发现, 1 km 处断裂前后的 ESP 下降速率较 10 km 和 30 km 处更大。这说明断裂距直流感地极较近时对 ESP 分布的影响较为显著。 H_1 越小, ESP 下降速率越快, 在相同的断裂宽度下, 受其影响而导致的断裂前后地表电位差也越大, 越容易出现直流偏磁现象; H_1 越大, 断裂前后地表电位差越小, 当 H_1 足够大时则可忽略断裂对 ESP 的影响。此外, 与图中水平均匀分层曲线相比, 含有断裂的曲线所示 ESP 明显升高, 说明断裂构造的出现会使其周围地表电位整体提高。

为了更清楚地表达 H_1 的变化给断裂前后地表电位带来的影响, 表1给出了不同 H_1 下断裂前后土壤地表电位的差值 ΔU 。

表1 断裂前后地表电位差值表

Table 1 Values of surface potential difference before and after fracture

H_1/km	U_1/V	U_2/V	$\Delta U/\text{V}$
1	425.25	121.05	304.20
5	144.00	61.30	82.70
10	81.10	38.87	42.23
15	57.40	29.00	28.40
20	44.67	23.45	21.22
25	36.70	20.00	16.70
30	31.20	18.00	13.20
35	27.00	15.00	12.00
40	24.00	14.24	9.76
45	21.50	12.75	8.75
50	19.55	11.55	8.00

图 8 根据表 1 绘制而成, 由图可知断裂前后地表电位差 ΔU 随着 H_1 的增大而减小。在接地极附近 30 km 范围内, 不同 H_1 对应的 ΔU 值较大, 其中原点(接地极)附近 ΔU 随 H_1 的增大而变化得最为敏感; 30 km 范围以外, 不同 H_1 对应的 ΔU 值基本相同, 此时曲线趋于平缓。综合考虑经济性因素, 认为当断裂距接地极距离不小于 30 km 时即可忽略断裂对 ESP 的影响。

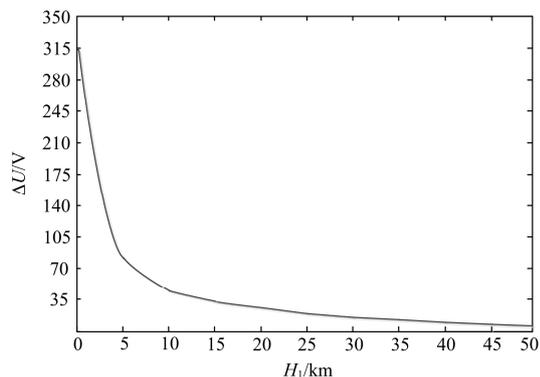


图 8 断裂前后地表电位差分布规律图

Fig. 8 Regularities of surface potential difference before and after fracture

3.1.2 断裂到直流接地极距离影响下交流电网直流电流分布情况

比较断裂到直流接地极不同距离时交流电网中出现直流电流超标的变电站数量, 验证上节结论的正确性。当前岌岌台接地极距离断裂 46.1 km, 将实际接地极位置向东南方向移动, 使其距离断裂更近(21.9 km), 接地极移动前后的位置如图 9 所示。综合考虑气候、周边环境等重要因素, 结合《高压直流接地极极址选择规定》可认为在移动范围内除断裂以外的其他影响因素均接近一致。

依据图 5 中网架结构, 假设变压器中性点接地

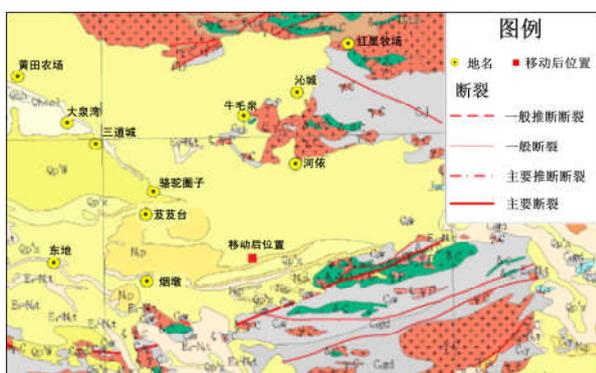


图 9 接地极移动前后位置

Fig. 9 Position of ground pole before and after moving

开关全部合上, 分别计算当额定入地电流为 5 000 A 时接地极移动前后各交流变电站直流电流分布情况, 发现接地极移动后, 直流电流总量达到了 146.71 A, 烟墩北等 13 处变电站直流电流均有超标现象, 将导致交流电网局部受到直流偏磁危害, 而移动前直流电流总量为 73.11 A, 仅 6 座变电站面临直流偏磁风险, 大多数变电站中性点直流电流均在合理范围内, 以此验证上述结论的正确性。

3.2 接地极近区地表电位分布规律

由于哈密地区断裂构造十分复杂, 对其研究不能仅停留在大区域内, 有必要在小范围内对复合土壤地质模型断裂处不同土壤参数配置下 ESP 分布进行分析, 研究断裂相关参数在距离接地极更近的区域对 ESP 的影响, 为此后接地极选址工作寻找依据。

由 1.2 节可知, $U=f(\rho_1、\rho_2、\rho_3、H、H_1、H_2、h)$, 其中断裂处的土壤参数有断裂宽度 H_2 及断裂处土壤电阻率 ρ_3 , 改变两者大小, 其余参数保持不变, 分别计算接地极近区 ESP 分布情况, 得到可变参数影响下的 ESP 分布特性曲线。

3.2.1 断裂处电阻率影响下的地表电位分布规律

设置 $H_1=9$ km, $H_2=3$ km, $\rho_1=100 \Omega \cdot \text{m}$, 改变浅层土壤电阻率 ρ_1 与断裂处电阻率 ρ_3 的相对大小, 表 2 给出了模型的具体参数, 其中方案 1、2 模拟了 $\rho_1 > \rho_3$ 的情况, 方案 3、4 模拟了 $\rho_1 < \rho_3$ 的情况, 其仿真结果如图 10 所示。

表 2 断裂处电阻率取值表

Table 2 Values of fracture resistivity

方案	H_1/km	$\rho_3/\Omega \cdot \text{m}$	H_2/km
1	9	1	3
2	9	50	3
3	9	150	3
4	9	250	3

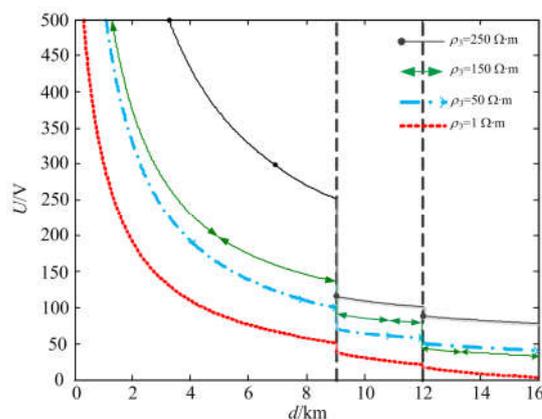


图 10 断裂处电阻率影响下 ESP 分布规律图

Fig. 10 Regularities of distribution of fracture resistivity and ESP

由图 10 可知, 上述情况下随着 ρ_3 增大, ESP 下降速率逐渐降低, 在 9 km 断裂垂直分界面处, ρ_3 较大时, 断裂前后地表电位差更大, 更容易出现直流偏磁现象; 电阻率之差相等时, 地表电位差近似相等, 可为小范围内直流接地极极址的选择提供更多的低中阻区域。

3.2.2 断裂宽度影响下地表电位分布规律

分别将 H_2 设置为 3 km、6 km、10 km, 其余各参数设置为固定值, 其仿真结果如图 11 所示。

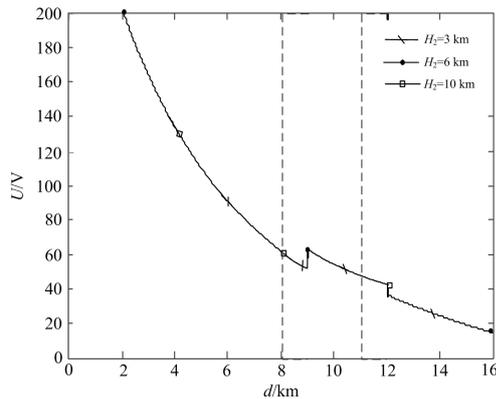


图 11 断裂宽度影响下 ESP 分布规律图

Fig. 11 Regularities of distribution of fault width

图 11 中, 当 H_2 分别选取不同数值 3 km、6 km、10 km 时, ESP 分布曲线均重合, 说明断裂宽度 H_2 的改变对 ESP 分布基本没有影响, 可以忽略。

综上所述, 为了防止大量直流入地电流进入附近的交流电网, 产生直流偏磁现象, 在进行直流接地极极址的选择时, 应尽量远离断裂结构, 将极址选择在距离断裂 30 km 以外的区域, 此外, 还应考虑断裂处电阻率, 使其尽量避开高阻区域。

4 结论

1) 断裂结构会使接地极周围地表电位明显提高, 采用含有断裂的复合土壤地质模型可提高复杂地质情况下地表电位计算的准确性。

2) 在直流接地极大区域内地表电位主要受断裂到直流接地极距离的影响, 距离越近, 地表电位越高; 当距离大于 30 km 左右时, 即可忽略断裂的影响。

3) 直流接地极近区地表电位主要受断裂相关参数影响, 断裂处电阻率越大, 地表电位越高, 不同电阻率之差相等时, 地表电位差近似相等; 断裂宽度对地表电位的影响可忽略不计。

参考文献

[1] 耿庆申, 卢玉, 樊海荣, 等. 特高压和超高压交流输电

系统运行损耗比较分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 72-77.

GENG Qingshen, LU Yu, FAN Hairong, et al. Comparative analysis of operation losses of UHV AC and EHV AC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 72-77.

[2] 王渝红, 欧林, 张超, 等. 基于多台不同变压器的直流偏磁抑制措施研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 159-165, 172.

WANG Yuhong, OU Lin, ZHANG Chao, et al. Study on DC bias suppression measures based on multiple different transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 159-165, 172.

[3] 苗红霞, 萧旋旋, 江冰, 等. 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 85-91.

MIAO Hongxia, XIAO Xuanxuan, JIANG Bing, et al. State evaluation of prefabricated substation based on information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 85-91.

[4] 王泽忠, 谭瑞娟, 臧英, 等. 基于串联电阻的特高压变压器空载直流偏磁计算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 129-137.

WANG Zezhong, TAN Ruijuan, ZANG Ying, et al. DC-bias calculation for UHV transformer in no-load by series resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 129-137.

[5] 曹楠, 王天正, 王冬青, 等. 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 117-122.

CAO Nan, WANG Tianzheng, WANG Dongqing, et al. Study on configuration optimization method of transformer magnetic bias treatment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 117-122.

[6] FAN Rongwei, MENG Qiyu, ZHI Qianbo, et al. Substation area joint defensive protection strategy based on distributed cooperative all-in-one device[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 467-477.

[7] 刘春明, 黄彩臣, 潘明明, 等. 抑制变压器直流偏磁的电容隔直装置优化配置[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2308-2314.

LIU Chunming, HUANG Caichen, PAN Mingming, et al. Configuration of capacitor blocking devices for suppressing DC bias in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2308-2314.

[8] 陈德智, 黄振华, 刘杰, 等. 水平分层土壤中点电流源电场的计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1379-1382.

- CHEN Dezhi, HUANG Zhenhua, LIU Jie, et al. Calculation of current field due to a point source in multi-layer soil[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1379-1382.
- [9] 刘力, 孙结中. 等值复数镜像法在多层土壤接地计算中的应用[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 57-60.
- LIU Li, SUN Jiezhong. Application of equivalent complex image method in multi-layer soils grounding calculation[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(3): 57-60.
- [10] 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.
- [11] 郝治国, 余洋, 张保会, 等. 高压直流输电单极大地方式运行时地表电位分布规律[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 10-14.
- HAO Zhiguo, YU Yang, ZHANG Baohui, et al. The distribution law of surface potential in HVDC monopole ground operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 10-14.
- [12] 潘卓洪, 张露, 林进弟, 等. 多层水平土壤对交流电网直流分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 855-862.
- PAN Zhuohong, ZHANG Lu, LIN Jindi, et al. Influence of horizontal multi-layer soil on DC current distribution in AC power grid[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 855-862.
- [13] 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.
- [14] 李文峰, 杨洪耕, 肖先勇, 等. 土壤模型对地表电位影响及合理选取土壤模型方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 158-165.
- LI Wenfeng, YANG Honggeng, XIAO Xianyong, et al. The effect of soil model on earth surface potential and reasonable selection method for soil model[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 158-165.
- [15] 马成廉, 刘连光, 王乐天, 等. 高压直流输电接地极地电位分布 ANSYS 仿真[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(4): 19-26, 33.
- MA Chenglian, LIU Lianguang, WANG Letian, et al. The ANSYS simulation of HVDC grounding electrode potential distribution[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(4): 19-26, 33.
- [16] 刘曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 8-13.
- LIU Qu, LI Licheng, ZHENG Jianchao. DC currents distribution in HVDC systems of monopolar operation with ground return in complex soil structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 8-13.
- [17] 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.
- [18] 李莹甄, 沈军. 新疆哈密地区地震地质及地震活动性[J]. 内陆地震, 2001, 15(2): 141-146.
- LI Yingzhen, SHEN Jun. Eismogeological tectonics and seismicity in Hami, Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 2001, 15(2): 141-146.
- [19] 于永军, 杨琪, 侯志远. 天中直流工程入地电流对新疆哈密地区交流电网的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2298-2303.
- YU Yongjun, YANG Qi, HOU Zhiyuan. Influence of grounding current in UHVDC transmission project from Tianshan to Zhongzhou on Hami AC power system in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2298-2303.
- [20] 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.

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-02-12

作者简介:

郭名文(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电、新能源并网技术; E-mail: 2753337541@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、微电网控制技术; E-mail: 410849062@qq.com

耿山(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电、新能源并网技术。E-mail: 386016390@qq.com

(编辑 魏小丽)