

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.032

特高压直流接地极优化选址研究

曾 富¹, 樊艳芳¹, 耿 山²

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 国网邯郸供电公司, 河北 邯郸 056000)

摘要: 为了减小特高压直流接地极入地电流对交流电网直流偏磁的危害,文中从优化直流接地极位置角度出发减小交流电网中直流偏磁危害。研究断裂构造与岩土类型对直流接地极预选选址的影响,并将预选极址采用网格点模式法划分网格区域,以直流偏磁站点数量最少与交流电网中直流电流总量最低为目标,筛选优化预选址区域,并确定最终直流接地极位置。研究表明:直流接地极极址应远离断裂构造,且极址应选择在地表为低阻率土壤以及地下为高阻率岩石区域,合理的直流接地极位置从源头上降低了直流接地极所引起的直流偏磁对交流电网的影响。

关键词: 特高压直流输电; 直流接地极选址; 直流偏磁; 岩土类型; 网格化模式方法

Research on Optimal Location of UHVDC Grounding Electrode

ZENG Fu¹, FAN Yanfang², GENG Shan²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid HanDan Electric Power Supply Company, Hebei Handan 056000, China)

Abstract: In order to reduce the harm of grounding current of UHVDC grounding electrode to DC bias in AC power network, the harm of DC bias in AC power network is reduced by optimizing the position of DC grounding electrode. The influence of fault structure and geotechnical type on DC grounding electrode pre-selection is studied. The pre-selection electrode location is divided into grid areas by grid point mode method. Aiming at the minimum number of DC bias sites and the minimum total DC current in AC network, the pre-selection area is optimized and the final DC grounding electrode location is determined. The results show that the location of DC grounding electrode should be far away from the fault structure, and the location should be in the low resistivity soil on the surface and in the high resistivity rock area on the ground. The reasonable location of DC grounding pole reduces the influence of DC magnetic bias caused by DC grounding pole on AC network from the source.

Key words: UHVDC transmission; DC grounding electrodesite selection; DC bias; geotechnical type; meshing mode approach

0 引言

在直流线路的送、受端一般一个换流站需要配套相对应的直流接地极^[1-4],它在单极大地返回运行时担负着钳制中性点电位以及为入地电流提供返回通路的重任^[5-8]。

极址是一个大型接地体,直流接地极极址选择恰当与否,不仅关系到其能否解决直流偏磁所引发

的变压器损耗增加、噪声增大等问题^[9-14],还决定了其是否能充分发挥作用来解决小极址与大电流的矛盾,在特高压直流输电工程中起到关键性作用^[15-16]。因此,亟需对特高压直流接地极极址选择问题进行深入研究,优化极址、防御直流偏磁危害、降低直流电流对交流系统的影响,从而提升交流电网安全稳定运行水平^[17-22]。

目前,针对直流接地极选址问题,国内外很多

收稿日期:2020-07-01; 修回日期:2020-08-27

基金项目:2017年度新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01C028)。

Project Supported by 2017 Xingjiang Autonomous Region Natural Science Foundation Project(2017D01C028).

学者从多方面进行了研究。文[23]中考虑电力系统网架结构和变电站距接地极的距离对直流偏磁的影响,提出优化选址的方案;文[24]中通过人工蜂群算法,以流入交流电网中直流量最小为目标函数,计算出对交流直流偏磁电网影响最小的直流接地极位置;文[25]中分析接地极周边电力系统,对接地极选址方法进行优化。针对接地极选址方法目前主要为降低交流电网直流偏磁影响的研究^[26-29],没有考虑复杂地貌条件对接地极选址的影响。

文中建立复合土壤模型,先分析断裂构造以及岩土类型对接地极选址的影响,并以此为依据对目标区域从总体上进行预选址,对预选址区域,采用网格化模式方法,对接地极优化选址问题进行深入研究。

1 直流接地极选址的方法

根据直流接地极极址选择的相关规定与工程经验,为了施工与运行的方便,直流接地极极址应处于地面平坦的位置,便于电极布置,且与换流站有足够的距离,但不宜过远,通常在10~70 km范围内比较合适,以便于接地极线路走线、施工和运行维护。一般直流接地极极址应远离人口稠密的城市以及地下有较多公共设施的地区,且附近无复杂和重要的地下金属设施。

可见,当前直流接地极选址过程中主要考虑接地极附近环境对极址的影响,但由于存在直流偏磁的问题,所以极址选择过程中还应涉及直流接地极极址对交流电网的影响分析。文中通过对目标区域进行预选址,再对预选址区域进行优化的方法,最终确定了直流接地极的位置。在预选址的过程中除了要考虑极址附近环境因素,还需着重评估断裂构造与岩土类型对选址的影响。在对预选极址优化过程中采用网格化模式方法,对预选极址进行优化,选址步骤如下:

1)考虑极址附近环境因素以及断裂构造与岩土类型对接地极选址的影响,对目标区域进行预选址。

2)对预选址区域采用网格化模式方法分析,将所选区域分成若干以5 km等间距的网格结构,并计算当每个网格的交点为直流接地极时,交流电网直流电流分布。

3)参照《高压直流接地极技术指导》^[30]判断变电站是否发生直流偏磁现象,并以发生直流偏磁站点最少为目标进行网格区域的筛选,对于发生直流偏磁站点数量相同的网格,通过再划分网格的方法,最终确定3个优化极址的区域。

4)以交流电网直流电流总量最低为目标,从总体上判断直流偏磁风险发生程度大小,确定最终的直流接地极极址。

2 考虑断裂构造与岩土类型的预选址方法

在预选址的过程中除了要考虑直流接地极对周围铁路与地下金属管道的影响外,还要考虑对交流电网地表电位的影响,其中断裂构造与岩土类型直接影响着接地极周围地表电位的分布。

2.1 直流接地极附近交流电网地表电位计算

地表电位的准确求解是交流电网直流分布的关键环节,现采用复合分层模型见图1。直流接地极深埋深度为 h ,电流为 I ,坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,待求点的位置为 (x, y, z) ; H, H_1 分别表示浅层土壤的厚度、垂直分层第一层的宽度; ρ_1, ρ_2, ρ_3 分别表示浅层土壤电阻率、深层岩石电阻率、垂直分层第二层的电阻率。

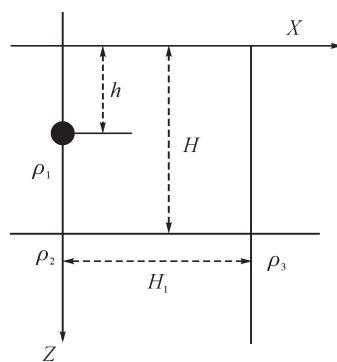


图1 复合土壤分层模型

Fig. 1 Compound soil layering model

在求解地表电位时,采用镜像法^[31],把水平分层模型下单个电源点的作用,变为多个电源点一起作用的结果,可得出复合土壤结构下地表电位的计算公式为

$$U = U_1 + k_1 U_2 \quad (1)$$

式(1)中, U_1 为垂直分层第1层电源点的作用,可由式(2)求得, U_2 为垂直分层第2层镜像电源的作用,将式(2)A中的 x_0 替换为 $(x_0 + 2H_2)$ 即可求得。

其中: k, k_1 均为反射率, $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, $k_1 = \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_3 + \rho_1}$,

$$A = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$$

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{A + (z - h)^2}} + \frac{1}{\sqrt{A + (z + h)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{A + (z - 2nH + h)^2}} + \frac{1}{\sqrt{A + (z - 2nH - h)^2}} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{A + (z + 2nH - h)^2}} + \frac{1}{\sqrt{A + (z + 2nH + h)^2}} \right] \right\} \quad (2)$$

2.2 断裂地质构造对预选址的影响

直接地极极址的地理位置与其周边地质条件不仅决定了接地极本体设计,还会对周边环境产生影响,如变电站的中性点直流电流是否超标,现分析考虑断裂地质构造时极址选择所需要考虑的参数。

将大地构造中断裂形态看作复合分层模型见图2。设直接地极为 P ,其深埋深度为 h ,电流为 I ,坐标为 (x_0,y_0,z_0) ; H 、 H_1 、 H_2 分别表示浅层土壤的厚度、直接地极距离断裂的距离、断裂的宽度; U_1 、 U_2 分别代表断裂前、后的地表电位; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别表示浅层土壤电阻率、深层岩石电阻率、断裂的电阻率。

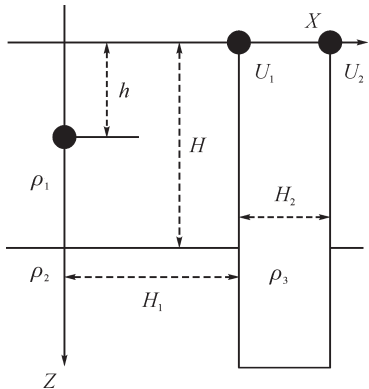


图2 考虑断裂地质构造的复合分层模型
Fig. 2 Composite stratification model considering fracture geological structure

在MATLAB中搭建仿真模型,先分析 H_1 对地表电位影响,当 $H=100\text{ m}$ 、 $H_2=2\text{ km}$ 时, H_1 分别取10、50、80 km, r 为测量点到接地极的距离。由图3可得,当 H_1 为10 km时,断裂前后地表电位(earth surface potential, ESP)差较大;当 H_1 为50、80 km时,断裂前后地表电位差较小,则当直接地极距离断裂较远时可以忽略其对地表电位的影响。

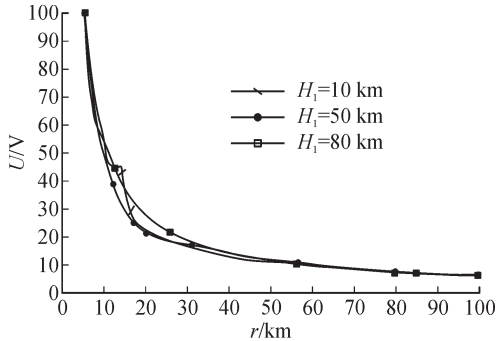


图3 断裂到直接地极不同距离ESP分布规律
Fig. 3 ESP distribution law of different distances from fracture to DC grounding pole

为了清晰的展示出 ΔU (断裂构造前后两点之间的电位差 $\Delta U=U_1-U_2$,见图2)随着 H_1 变化的结果,在不同 H_1 下 ΔU 的变化过程见图4。由图4可知,随着

H_1 的增大 ΔU 在不断减小,在直接地极附近30 km区域内,不同 H_1 对应的 ΔU 值变化较大,并且原点(接地极)附近 ΔU 随 H_1 的增大而减小得最为明显;30 km区域外,不同 H_1 对 ΔU 的值影响很小,此时曲线趋于平缓。由此可见,当断裂位置距接地极距离大于30 km时,则可以忽略断裂构造对地表电位分布的影响。因此预选极址应尽可能的远离断裂构造,避免地表电位差过大使变压器遭受直流偏磁干扰。

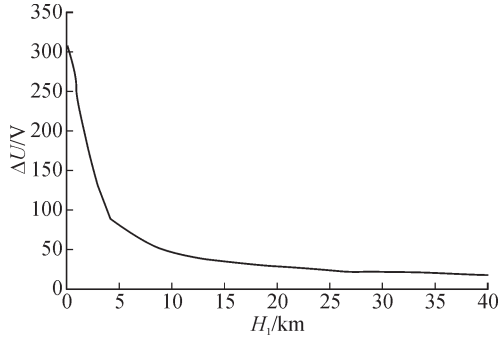


图4 断裂前后地表电位差分布规律
Fig. 4 Distribution law of surface potential difference before and after fracture

2.3 土壤岩石类型对预选址的影响

极址附近的岩土类型影响地表电位的分布范围与下降速率,土壤与岩石类型直接决定了浅层土壤电阻率与深层岩石电阻率,其中土壤类型影响极址地表电位的分布范围,岩石类型影响地表电位下降速率与入地电流的散流分布等参数,二者均对直接地极选址起到关键作用。其中土壤类型及其近似电阻率与岩石类型及其近似电阻率见表1、2。

表1 土壤类型及其近似电阻率	
Table 1 Soil classification and its approximate resistivity	
土壤类型	土壤电阻率近似值/(Ω·m)
沙质土壤	10 000
壤质土壤	100
粘质土壤	60

表2 岩石类型及其近似电阻率	
Table 2 Rock type and its approximate resistivity	
岩石类型	岩石电阻率近似值/(Ω·m)
灰色砾石、砂砾	10 ³ ~2.5×10 ³
粉砂岩、泥岩	10~10 ²
砂岩、砾岩	10~10 ⁴
淡黄色亚砂土、砾石	10 ³ ~5.0×10 ⁵
碱长花岗岩	6.0×10 ² ~10 ⁵
石英砂砾、细砂	10 ³ ~10 ⁵
晶屑凝灰岩、玄武岩	10 ² ~10 ⁵
石英闪长岩	5.0×10 ⁴ ~10 ⁵

现分析 ρ_1 、 ρ_2 深层与浅层岩土电阻率对ESP的

影响,取 $H=100\text{ m}$ 、 $H_1=9\text{ km}$ 、 $H_2=3\text{ km}$ 、 $x_0=y_0=z_0=0$, r 为测量点到接地极的距离。由图5可得,(a)图中 ρ_1 越小,ESP下降速率越缓慢,并且在 9 km 断裂垂直界面处, ρ_1 越大,断裂前后的地表电位差越大;(b)图中 ρ_2 越小,ESP下降速率越快,且 ρ_2 变化对所处断裂环境中ESP影响较小。

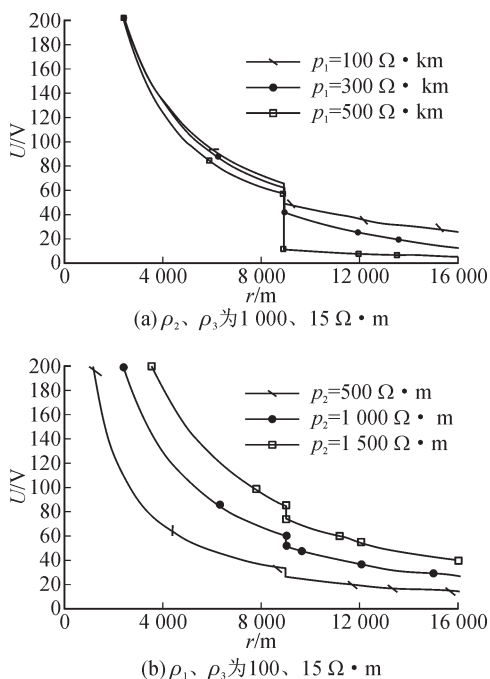


图5 不同土壤电阻率对应ESP分布规律

Fig. 5 Different soil resistivity corresponding to ESP distribution

由此可见,预选址选择时,浅层土壤电阻率应尽可能选择低阻区域(如地下分布为壤质土壤或粘质土壤区域),深层岩石电阻率应选择高阻区域,尽可能减小数以千计的入地电流对周边环境的影响。

3 直流偏磁站点数量最少的优化预选址方法

在极址选择过程中包括发现极址、极址论证与优化两个阶段。在发现极址第一阶段中岩土类型及地质的构造占据主导,其决定了接地极对周边环境的影响程度;在极址论证与优化第二阶段中评估入地电流对环境的影响,包括极址所在交流电网区域内偏磁站点的多少以及区域内直流电流总量的大小。

从优化直流接地极极址的角度出发来降低预选址对交流电网的直流偏磁影响,其中涉及到直流接地极对所在区域内交流电网接地极地表电位和直流电流分布的影响。在MATLAB/Simulink中搭建哈密地区电力系统网架结构,编写直流偏磁评估软件,可在有特高压直流接地极时,以最少的偏磁站点数量为目标优化预选极址,计算直流电流的结果中黑色表示正常,红色表示超标,软件操作流程见图6。

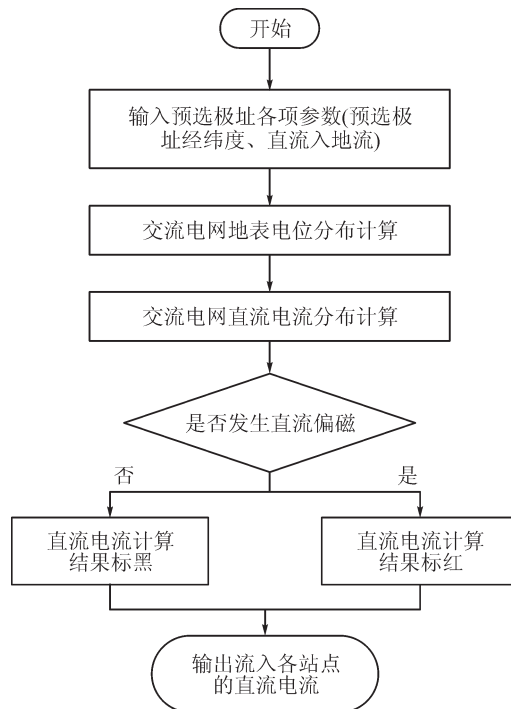


图6 直流偏磁磁软评估软件操作流程

Fig. 6 DC bias magnetic soft evaluation software operation flow chart

在选址过程中根据《高压直流接地极选址规定》,需要在选定极址的 5 km 范围内进行水文质地考察,即可采用网格点模式方法见图7。将所选区域分成若干以 5 km 等间距的网格结构,把地理位置信息表示成一系列按行排列的同一大小的网格单元。通过计算每个网格的交点的覆盖性能(即计算当该交点为直流接地极时,流入附近交流电网变压器中性点的直流电量),在一定范围内进行统计。通过对比每个交点所引发附近交流变压器发生直流偏磁的数量,以发生直流偏磁站点数量最少为目标进行网格区域的筛选。对于发生直流偏磁站点数量相同的网格,通过再划分网格的方法,对比每个小网格的覆盖性能,确定优化极址区域。

4 实例分析

文中以哈密地区天山换流站直流接地极为例,分析减少发生直流偏磁站点数量的选址优化方法。哈密地区部分电网结构见图7。

4.1 哈密地区预选极址

在发现极址的第一阶段中结合第2节与《高压直流接地极极址选择规定》判断预选极址的位置。

在哈密南区域内哈罗铁路、兰新铁路和西气东输一至五线的管道分别途径哈密南的西南、西北、东南地区,直流接地极会给铁路带来电磁干扰,且会使管道产生电化学腐蚀。

哈密西南、东南地区内构造复杂,褶皱、断裂构

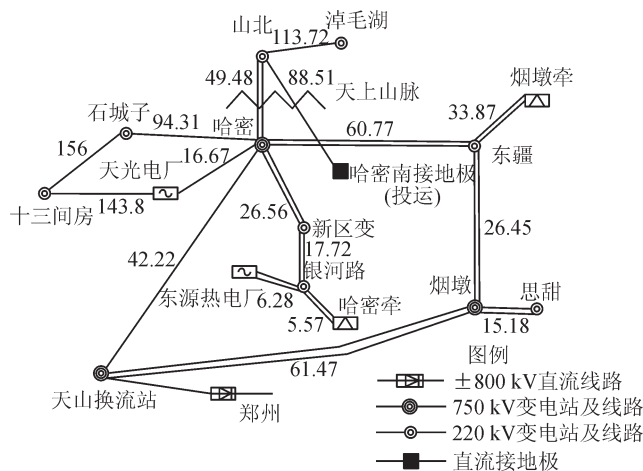


图7 哈密地区部分电网结构

Fig. 7 Part of the grid structure in Hami

造较多易造成地表电位差较大,变电站容易发生直流偏磁现象,同时西南地区有野骆驼保护区。

哈密西北地区,人口过于稠密,同时该地区内有众多220 kV变电站,直流接地极距离变电站过近,易出现站点中性点直流电流偏大,即直流接地极不宜在以上地区建设。

哈密东北地区交通便利,便于接地极线路通过架空导线接到极址塔,且地质良好,土层表面仅有第四系黄土,粘质沙土等,其具有良好的保温保水性,保证土壤热参数的稳定,因此预选极址应选择在哈密的东北区域,哈密地区部分电网结构见图7。

4.2 哈密地区预选址优化

依据第3节,采用网格化模式方法,把所选区域分化成若干5 km等间距的网格结构,计算哈密网架结构中变压器中性点直流电流,判断发生直流偏磁站点的数量,确定优化极址的区域见图8。

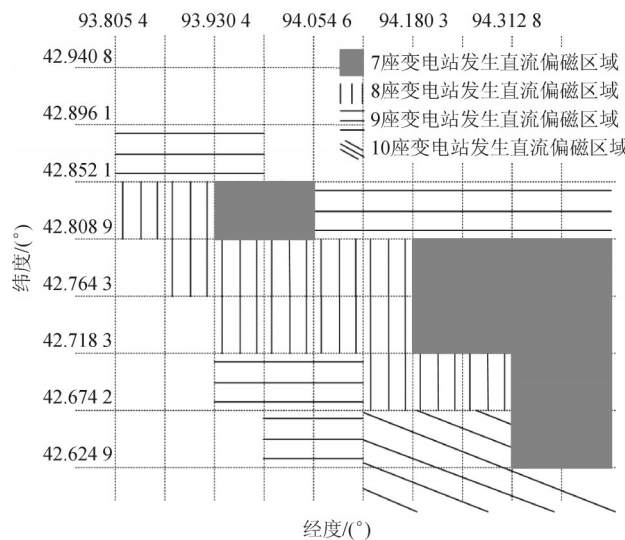


图8 哈密地区极址选择整体区域

Fig. 8 Pole location selection in hami region as a whole region

图8中,黑色、竖线、横线、斜线区域分别代表7、8、9、10座变电站发生直流偏磁现象,遵循以发生直流偏磁站点数量最少为哈密地区进行特高压直流感地极选址,即只有在7座站点发生直流偏磁的区域内选定,将有7座发生直流偏磁现象的区域再通过网格法分为若干1 km等间距的网格结构,计算每个网格点为直流接地极时,哈密电网各变电站直流量的总量,通过对比得到3个预选址方案。预选择方案见表3,哈密网架结构直流电流分布见表4。

表3 哈密直流感地极选址方案

Table 3 Hami DC grounding pole location scheme

选址方案	经纬度/(°)	距换流站距离/km
方案1	94.181 5,42.734 7	60.9
方案2	94.292 2,42.763 8	66.9
方案3	94.080 7,42.833 8	57.4

表4 哈密网架结构直流电流分布

Table 4 Hami grid structure DC current distribution A

变电站	方案1	方案2	方案3
220东疆	11.263	9.862	9.850
110骆驼圈子	3.744	7.015	-1.272
110兴业	1.543	1.287	-1.204
220烟墩西	7.323	7.401	8.368
750烟墩	6.091	5.592	6.508
思甜开关站	-0.028	0.066	-0.495
烟墩牵引220	-2.953	-2.303	-2.515
750哈密	12.216	10.702	12.826
220石城子	7.834	8.458	7.984
哈密南牵220	0.927	0.777	0.776
220东源电厂	-0.177	-0.278	0.058
天山换流站	2.459	1.999	3.428
220银河路	-1.169	-1.067	-0.965
110黄山东	-0.572	-0.467	-1.067
天光电厂	0.273	0.421	4.070
220新区	0.361	0.428	1.868
220山北	-6.860	-6.832	-8.758
110雅矿	-8.705	-2.348	-9.650
220淖毛湖	-0.309	-0.253	-0.287
110白山泉	-1.176	-0.789	-0.955
220十三间房	-1.899	-1.721	-2.033
750敦煌	-4.446	-3.878	-4.480
750沙洲	-5.764	-5.301	-5.517
750吐鲁番	-3.141	-2.857	-3.210
750乌北	-2.074	-1.918	-2.123
哈密牵引220	1.061	1.048	1.599
红旗牵220	0.297	0.353	0.649
思甜牵引220	-9.100	-8.281	-7.694
总量	103.765	93.702	110.209

以交流电网直流电量总量最低为目标,从总体上判断直流偏磁风险发生程度大小。哈密网架结构直流电流分布由表4可知,上述3个方案均导致交流电网局部直流偏磁危害,但方案2中交流电网直流电流量最低,从总体上降低直流偏磁风险,因此应选择方案2为直流接地极址,即天山换流站附近的直流接地极址应为(94.292 2,42.763 8)。

5 结论

文中结合哈密天山换流站直流接地极的工程经验,在预选址过程中考虑断裂构造、土壤和岩石类型对接地极选址的影响,在优化过程中采用直流偏磁站点数量最优方法,得出以下结论:

1)预选址方法中预选极址应尽可能的远离断裂构造,避免地表电位差过大使变电站遭受直流偏磁影响,且极址不宜选择在地质复杂的地域内。

2)预选极址选择时岩土类型直接决定了电阻率,影响极址的地表电位分布,极址应选择在地表为壤质与粘质土壤以及地下分布为高阻类岩石区域。

3)虽然在优化预选址阶段以直流偏磁站点数量最优为优化目的,但部分站点任会遭到直流偏磁影响,因此,后续研究应着重研究抑制直流偏磁的措施,使变压器免受直流偏磁的影响,保证电网安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 巩晓玲,樊艳芳,钟显,等.±800 kV天中特高压直流送端系统安全稳定分析[J]. 高压电器,2017,53(8):43-48.
GONG Xiaoling, FAN Yanfang, ZHONG Xian, et al. Analysis on security and stability of ±800 kV Tianzhong UHVDC sending end [J]. High voltage Apparatus, 2017, 53(8): 43-48.
- [3] 胥建文,李明洋,李书连,等.特高压变压器直流偏磁涡流损耗计算分析[J]. 高压电器,2018,54(6):150-157.
XU Jianwen, LI Mingyang, LI Shulian, et al. Computation of eddy current Loss of structural parts for UHV autotransformer transformer under DC magnetic bias[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 150-157.
- [4] 樊艳芳,耿山,巩晓玲,等.基于直流偏磁风险指标的变电站选址[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(19):59-65.
FAN Yanfang, GENG Shan, GONG Xiaoling, et al. Substation site selection considering the risk index of DC bias[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19):59-65.
- [5] 徐春侠.论高压直流接地极周边新建变电站需要注意的问题[J]. 广东输电与变电技术,2009(2):52-54.
XU Chunxia. Attentive problem on new built substation around HVDC earthing electrode[J]. Guangdong Transmission & Substation Technology, 2009(2): 52-54.
- [6] 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.
- [7] 孙提,文习山,童庆望.变压器直流偏磁研究综述[J]. 湖北电力,2015,39(12):24-31.
SUN Zhi, WEN Xishan, TONG Qingwang. Research summary of transformer DC bias[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(12):24-31.
- [8] 郭满生,程志光.大型电力变压器直流偏磁研究综述[J]. 电气制造,2006(3):52-54.
GUO Mansheng, CHENG Zhiguang. Review of DC bias of large power transformers[J]. Electrical manufacturing, 2006(3): 52-54.
- [9] 杜建平,李书连,栾兰,等.直流偏磁下400 kV单相电力变压器励磁特性的试验研究[J]. 变压器,2017,54(1):50-53.
DU Jianping, LI Shulian, LUAN Lan, et al. Experimental study on excitation characteristics of 400 kV single-phase power transformer under DC bias[J]. Transformer, 2017, 54(1): 50-53.
- [10] 林湘宁,杨国稳,翁汉琰,等.直流偏磁下变压器无功消耗增多对系统电压的影响分析[J]. 高电压技术,2016,42(1):272-278.
LIN Xiangning, YANG Guowen, WENG Hanli, et al. Analysis of the voltage impact by transformer reactive power consumption on increased under DC bias[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(1): 272-278.
- [11] 朱叶叶,汲胜昌,张凡,等.电力变压器振动产生机理及影响因素研究[J]. 西安交通大学学报,2015,49(6):115-125.
ZHU Yeye, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6):115-125.
- [12] 吴建云,国兴超,罗美玲,等.逆变侧换流变压器网侧接地故障对差动保护影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(17):170-178.
WU Jianyun, GUO Xingchao, LUO Meiling, et al. Analysis of influence of grounding fault of the network side of an inverter-side converter transformer on differential protection [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 170-178.
- [13] 石磊,周浩,陆兆沿,等.变压器保护子机的信息环网异常解决方案[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(22):176-181.

- SHI Lei, ZHOU Hao, LU Zhaoyan, et al. Information ring network anomaly solution for transformer sub-protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22):176-181.
- [14] 吴梓亮, 曾耿晖, 李一泉, 等. 基于双门槛值的变压器 Hausdorff 距离快速保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18):128-135.
- WU Ziliang, ZENG Genghui, LI Yiquan, et al. A novel criterion for fast protection of transformer based on Hausdorff distance and double threshold (1. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Key[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18):128-135]
- [15] 寇晓适, 钱诗林, 蔡永平, 等. 城市变电站主要设备噪声特性与直流偏磁分析[J]. 高压电器, 2018, 54(8):133-138.
- KOU Xiaoshi, QIAN Shilin, CAI Yongping, et al. Analysis of noise characteristics and DC bias of major equipment in urban substations[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 133-138.
- [16] 师泯夏, 吴 邦, 靳宇晖, 等. 直流偏磁对变压器影响研究综述[J]. 高压电器, 2018, 54(7):20-36.
- SHI Mingxia, WU Bang, JIN Yuhui, et al. Research summary on the impacts of DC magnetic bias on transformer [J]. High Voltage Appliances, 2018, 54(7): 20-36.
- [17] 皇甫成, 阮江军, 张 宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施[J]. 高电压技术, 2006(9):117-120.
- HUANG Fucheng, RUAN Jiangjun, ZHANG Yu, et al. DC magnetic bias induced current effects on transformer and restricting methods[J]. High Voltage Engineering, 2006(9):117-120.
- [18] 马玉龙, 肖湘宁, 姜 旭, 等. 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置[J]. 电网技术, 2006(3):62-65.
- MA Yulong, XIAO Xiangning, JIANG Xu, et al. Optimized grounding resistance configuration against DC magnetic bias of capacity power transformer[J]. Power Grid Technology, 2006(3): 62-65.
- [19] 张哲任, 徐 政, 徐雨哲, 等. 高压直流输电基本测试系统[J]. 广东电力, 2018, 31(9):2-12.
- ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Yuzhe, et al. Basic test systems for HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9):2-12.
- [20] 程 鑫, 杨 燕, 徐 蔚, 等. 多直流馈入电网规划方案评价指标体系[J]. 广东电力, 2018, 31(10):117-126.
- CHENG Xin, YANG Yan, XU Wei, et al. Evaluation index system of multi-infeed DC power grid planning schemes [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 117-126.
- [21] 吴经锋, 杨传凯, 褚 磊, 等. 站用直流系统充电机状态评价研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(1):88-92.
- WU Jingfeng, YANG Chuankai, CHU Lei, et al. Study on condition assessment of substation DC system charger[J]. Smart Power, 2018, 46(1):88-92.
- [22] 张 天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2):87-92.
- ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in china[J]. Smart Power, 2018, 46(2):87-92
- [23] 周 挺, 胡 金. 降低接地极直流偏磁影响的接地极选址优化研究[J]. 智能电网, 2017, 5(4):351-355.
- ZHOU Ting, HU Jin. Optimization research on HVDC electrode site selection for reducing the DC magnetic bias effect upon the power system[J]. Smart Power Grid, 2017, 5(4):351-355.
- [24] 王浩屹, 饶 雪, 常 湧. 基于人工蜂群算法的直流接地极优化选址[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1):173-175.
- WANG Haoyi, RAO Xue, CHANG Yong. Location optimization of DC grounding electrode based on artificial colony algorithm[J]. Hydropower Energy Science, 2016, 34(1): 173-175.
- [25] 胡 金, 邵 毅, 戚 乐, 等. 接地极选址方法研究[J]. 电力勘测设计, 2018(s2):58-63.
- HU Jin, SHAO Yi, QI Le, et al. Research on location method of earth electrode[J]. Electric Power Survey and Design, 2018(s2): 58-63.
- [26] 杜 峰, 张 英. 直流偏磁对变压器的影响及抑制措施[J]. 变压器, 2008(7):11-13.
- DU Feng, ZHANG Ying. Influence of DC bias to transformer and its suppression measures[J]. Transformer, 2008(7): 11-13.
- [27] 王洪亮. 高压直流输电单极大地回线方式运行时接地极电流的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- WANG Hongliang. Research on ground electrode current of high voltage direct current system in ground return status [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2007.
- [28] 赵国鑫. 郑州±800千伏特高压直流换流站选址研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- ZHAO Guoxin. Research on Zhenzhou ± 800 kV UHVDC converter station site selection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [29] 蒋 伟. UHVDC 输电引起变压器直流偏磁及其抑制措施的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- JIANG Wei. Research on transformer DC bias due to UHVDC monopole operation and its restraining[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [30] 高压直流接地极技术指导:DL/T 437—2012[S]. 2012.
- High voltage DC grounding technical guidance:DL/T 437—2012[S]. 2012.
- [31] 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 UHVDC system with ground return[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.

曾 富(1994—),男,硕士研究生,从事特高压直流输电研究(E-mail:844230356@qq.com)。

樊艳芳(1971—),女,副教授,硕士生导师,从事电力系统稳定与控制、微电网控制技术研究(通讯作者)。

耿 山(1993—),男,硕士研究生,从事特高压直流输电研究。