

DOI: 10.7667/PSPC171287

基于直流偏磁风险指标的变电站选址

樊艳芳¹, 耿山², 巩晓玲³, 李自乾⁴

(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; 4. 国网甘肃电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 以哈密-郑州±800 kV 特高压直流(UHVDC)工程为背景, 为使 UHVDC 接地极周边的交流变电站尽可能在设计之初免受直流偏磁干扰的危害, 提出了基于直流偏磁风险指标对变电站选址。在复合高山土壤模型下考虑交流变电站极间耦合电阻计算直流电流分布, 进一步选择正常、过流站点。在此基础上结合单、双 UHVDC 接地极的感应电势分布, 分别建立等势线。依据电力系统的经济性采取就近原则: 对于正常站点周边的新建站点应建在等势线上; 对于过流站点周边的新建站点应与等势线径向分布, 并以增大电势差为依据, 适当地增加过流站点出线数量, 在最大程度上规避直流偏磁风险。

关键词: 特高压直接地极; 耦合电阻; 直流偏磁风险; 变电站选址; 等势线

Substation site selection considering the risk index of DC bias

FAN Yanfang¹, GENG Shan², GONG Xiaoling³, LI Ziqian⁴

(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; 4. Pingliang Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Pingliang 744000, China)

Abstract: Taking Hami Zhengzhou ±800 kV Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) project as background, in order to make AC substations in the vicinity of UHVDC grounding poles avoid the harm of DC bias interference at the beginning of the design, the location of substation taking into account DC bias risk index is proposed. Considering the substation AC coupling resistance, the DC current distribution is calculated under the complex alpine soil model. The normal and over current stations are further selected. On this basis, the equipotential lines are established respectively based on the induced potential distribution of single and double UHVDC grounding electrodes. According to the economy of the power system, the nearest principle is adopted: new sites around the normal site should be built on the equipotential line; the new sites around the over-current site should be radially distributed with equipotential lines, on the basis of increasing potential difference, appropriate flow outlet site number is increased to avoid the risk of DC bias at the maximum extent.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767023).

Key words: UHVDC grounding electrode; coupling resistance; DC bias risk; substation location; equipotential line

0 引言

随着华中与华东地区用电负荷与西北地区电能输送容量不断增大, 在煤电基地新疆建设多条特高压直流输电工程已成必然发展趋势, 现已投运±800 kV 天中直流, 在建±1 100 kV 昌吉直流, 拟规

划准东至四川、哈密北至重庆、伊犁至巴基斯坦等特高压直流工程^[1]。当 UHVDC 采取单级大地回路运行方式时, 直流与交流接地极、交流与交流接地极、直流与直流接地极之间产生耦合效应, 不同地理位置变电站产生感应电势, 不同站点之间出现电势差^[2], 变压器绕组窜入直流分量, 励磁电流产生畸变, 出现大量的谐波, 造成变压器震动加剧、噪声增大, 同时直流偏磁还影响继电保护误跳设备,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767023)

可能导致电容器退出系统，系统电压迅速下降，最终失去大部分负荷^[3-6]。

目前，国内外针对直流偏磁的相关问题，已有不少学者从不同角度进行了分析研究。文献[7]在多层水平土壤模型下采用经典镜像法和数值积分法求得直流电流在交流电网的分布规律；文献[8]基于场路耦合方法计算直流电流分布；针对发生直流偏磁以后所采取的抑制措施主要有：变压器中性线串隔直电容、中性点串联电阻、反向注入电流法等^[9-14]，较少从源头上通过规划变电站增加过流站点的出线数量引出过大的直流电流，规避直流偏磁风险。一般变电站站址的选择仅考虑地区负荷分布、投资成本、现有电网状况等指标^[15]，未计及直流偏磁风险指标对变电站选址的影响。综上所述，若将直流偏磁风险作为变电站选址的指标，不仅可满足日益增长的负荷要求，还可通过增加过流站点的出线数量规避直流偏磁风险。因此亟需在变电站选址设计之初引入直流偏磁风险指标对其进行深入地研究，为变电站长期的安全稳定可靠运行提供基本保证。

本文将在 Matlab/Simulink 仿真平台，根据新疆电网实际的地质条件，在复合高山土壤模型下考虑变电站接地网交流接地极之间的耦合电阻对变压器中性点直流电流的影响；在单、多接地极条件下建立正常、过流站点的等势线，考虑电力系统经济性以及基于直流偏磁风险指标的变电站选址。对于过流站点的产生，在满足电力需求的前提下从源头以电网规划的角度进行治理，提出治理措施规避直流偏磁风险。

1 直流偏磁计算

整个直流接地系统与交流系统可看作一个地下多导体电流场和一个地上纯电阻等效模型构成的复杂网络^[16-17]。

在复合高山土壤模型下通过镜像法与行波法计算地下部分即交直流接地极之间感应电势的分布^[15]；地上部分即交流系统各部分接地元件等效的电路模型，基于场路耦合原理建立交流电网直流电流分布模型。

1.1 耦合电阻

当特高压直流输电工程以单极大地回路运行时，数千安培的直流入地电流通过直流接地极注入大地，其中小部分电流通过接地极之间的耦合通道在交流系统中传播。

耦合效应在直流与交流接地极体现为感应电势分布，交流与交流接地极之间等效为耦合电阻大小，直流与直流接地极之间距离相差较远，耦合效应忽略不计。由于耦合电阻与接地体的表面积有着密切

的关系，利用等效表面积法^[18]可将任意形状的接地体近似等效成接地半球进行计算，因此在计算耦合电阻时可将变电站接地网等效成半球形接地极，半球形接地极之间的耦合电阻 $R_{I,II}$ 如式(1)所示。

$$R_{I,II} = \frac{\rho(\frac{L}{b} - 1)}{2\pi a} \tag{1}$$

式中： ρ 表示浅层土壤等效电阻率； L 表示交流接地极接地网之间的距离； b 表示带电半球的半径； a 表示导体半球的半径。

图 1 表示交直流接地极之间的效应分布，其中 U_1 、 U_2 分别表示交流接地网 I、II 的感应电势， R_{D1} 、 R_{D2} 分别表示交流接地网 I、II 的接地电阻。

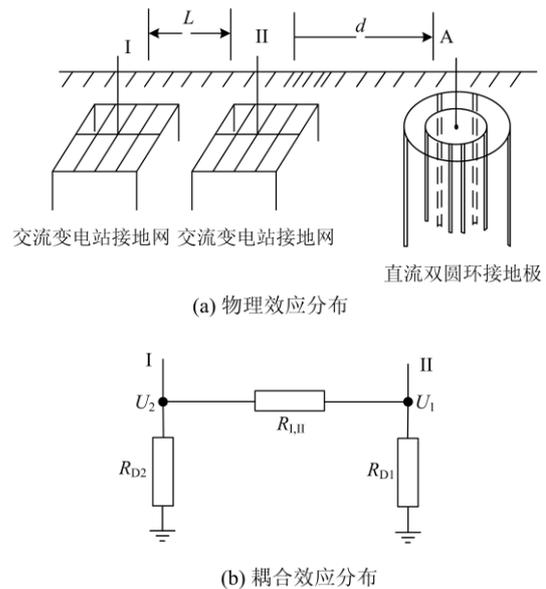
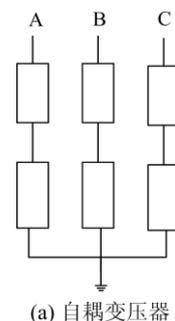


图 1 交直流接地极之间的效应分布

Fig. 1 Distribution of the effect between AC and DC electrode

1.2 节点法

通过上述地下模型中感应电势与耦合电阻的求解，地上变压器的等效电阻如图 2 所示。其中 750 kV 变电站主变均为中性点直接接地的自耦变压器，220 kV 变电站主变均为中性点直接接地的三绕组变压器。



(a) 自耦变压器

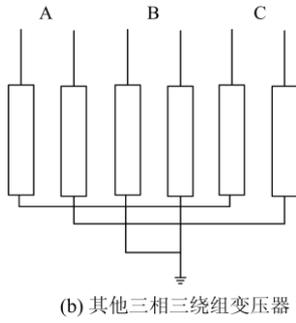


图 2 变压器等值直流电阻模型

Fig. 2 Transformer equivalent DC resistance model

输电线路模型的实质是三相线路组成的3条电阻支路。线路直流电阻的计算公式为

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (2)$$

式中： R 为线路一相电阻； ρ 为线路材料的电阻率； L 为输电线路距离； S 为输电线路一相线路的截面积。

设有 n 个变电站和发电厂， m 条母线，基于场路耦合原理应用节点电压法求解变压器直流电流^[19]为

$$\mathbf{I} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{U} \quad (3)$$

式中： \mathbf{I} 为直流接地极注入电流， $(n+m) \times 1$ 阶列向量； \mathbf{G} 为电导， $(n+m) \times (n+m)$ 矩阵； \mathbf{U} 为节点电压， $(n+m) \times 1$ 列向量。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： \mathbf{I}_1 为变压器节点注入电流列向量； \mathbf{I}_2 为母线节点注入电流列向量； U_1 为变电站接地极处感应电位； U_2 为母线节点电压。母线节点仅起联络作用，因此 $\mathbf{I}_2=0$ 。经推导得

$$\mathbf{I}_1 = G_{11} \cdot U_1 + G_{12} \cdot G_{22}^{-1} G_{21} \cdot U_1 \quad (5)$$

2 直流电流分布规律

本文基于Matlab/Simulink仿真软件，搭建如图3所示的哈密-郑州特高压直流输电工程送端天山侧岌岌台直流接地极周边的电网模型。在复合高山土壤模型下，当入地电流 $I=2.5$ kA 时考虑有(方式一)、无(方式二)变电站接地网交流接地极之间耦合电阻对直流电流分布的影响，与实测站点直流电流进行对比，如图4所示。

图4在复合高山土壤模型下针对750 kV与部分220 kV站点未考虑接地网之间耦合电阻所得直流电流与实测值相差较大，会因站点预测直流电流偏大或偏小影响对变压器直流偏磁是否发生的判断，可能使未发生站点加装抑制偏磁设备造成不必要的浪

费，也可能导致出现直流偏磁现象时，不能够及时有效地为其提供相应的抑制措施，造成变压器损坏。通过考虑变电站接地网交流接地极之间耦合电阻有助于提高部分站点直流电流的计算精度。

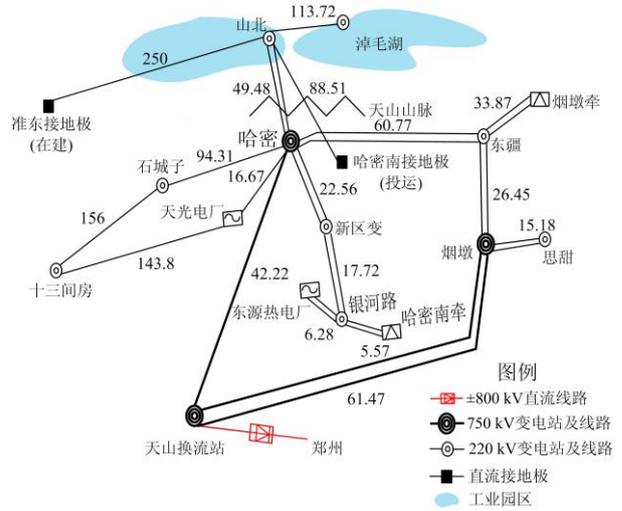


图 3 哈密地区局部电网构架

Fig. 3 Local power grid framework of Hami area

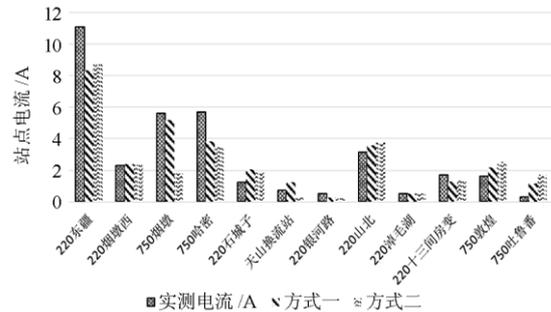


图 4 交流接地极间耦合电阻对电流分布的影响

Fig. 4 Influence of coupling resistance between AC electrodes on current distribution

3 变电站选址分析研究

随着三塘湖、淖毛湖工业园的开发建设，为满足该片区供电的可靠性以及日后哈密巴里坤县和伊吾县逐渐增长的负荷要求，在其周边区域内规划新建变电站已成为发展的必然趋势，以山北、淖毛湖变电站为例进行选址分析研究。

3.1 单流直接接地极对变电站选址影响

当天中直流以额定电流 $I_{\text{天中}}=5$ kA 单级大地回路运行时，山北、淖毛湖变电站感应电势分别为 $U_{\text{山北}}=3.7313$ V、 $U_{\text{淖毛湖}}=3.6817$ V，变压器中性点直流电流分别为 $I_{\text{山北}}=9.437$ A、 $I_{\text{淖毛湖}}=1.0281$ A。根据电力行业标准 DL/T437-2012《高压直流接地极技术导则》^[20]，

在上述直流电流分布中山北变电站中性点直流电流超过允许值(5.9 A), 淖毛湖变电站绕组直流电流在允许值范围之内, 则称淖毛湖变电站为正常站点, 山北变电站为过流站点。

3.1.1 正常站点周边变电站选址研究

由于接地极电流场内不同位置变电站之间的电势差是造成偏磁电流的根本原因。若直流接地极周边的正常站点全部位于相同的等势线上, 则正常站点与新建站点之间不会有偏磁电流流过。依据文献[17]在复合高山土壤模型下通过镜像法与行波法计算交直流接地极之间的感应电势, 并基于 Matlab 软件筛选与正常站点感应电势相近的新建站址。图 5 表示正常站点周边实际地理地形并依据经纬度拟合的等势线。

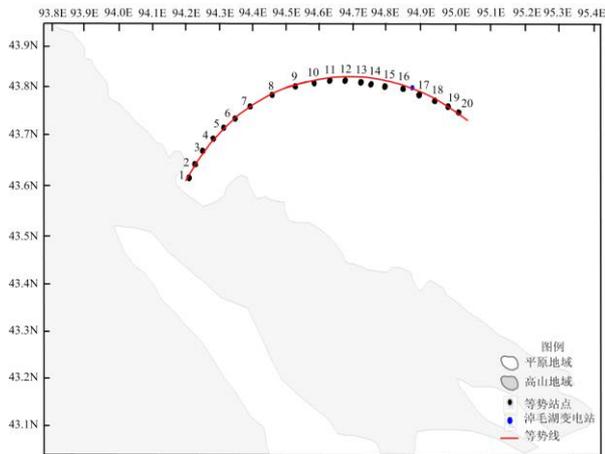


图 5 单直流接地极正常站点等势线

Fig. 5 Single DC electrode normal site equipotential line

由图5可知, 正常站点等势点拟合的等势线基本可看作以直流接地极为中心的同心圆。由于电势差直接导致偏磁电流, 将新建站点靠近正常站点的等势线, 减小已建和新建站点之间的电势差, 使流过站点之间的线路直流电流降低, 从而规避直流偏磁风险。

3.1.2 过流站点周边变电站选址研究

同理可得, 图 6 表示过流站点周边实际地理地形, 并依据经纬度拟合等势线。

由图6可知, 在高山附近过流站点等势点拟合的等势线基本可看作一条曲线。由于感应电势与交直流接地极之间的距离成反比, 电势差还与线路直流电流走向有关, 则新建站点应在等势线左侧与过流站点径向分布, 有利于电流分散使过流站点引出过大的直流电流。等势点1至8位于平原上, 左侧区域可新建站点; 等势点9至20位于高山上, 存在施工困难等问题, 则在此左侧区域不易新建站点。

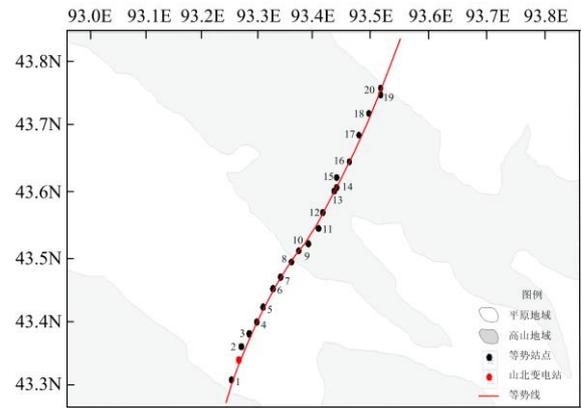


图 6 单直流接地极过流站点等势线

Fig. 6 Single DC electrode overflow site equipotential line

由于在高山附近过流站点等势点趋近于一条曲线, 各等势站点距离过流站点的距离各不相同, 实际上感应电势与直流接地极距离成反比, 输电线路直流电阻与站点之间的距离成正比, 且输电线路距离和线路直流电阻也是影响偏磁电流的因素。单直流接地极周边新建变电站站址选择及其对过流站点直流电流的影响如表 1 所示。

表 1 单直流接地极周边新建站址对过流站点直流电流的影响

Table 1 Impact of new site on the DC current of overflow site around single DC electrode

变电站	经度	纬度	L/km	R/ Ω	U/V	$I_{山北}/A$
新建 A	93.561 0	43.423 7	5.779 5	0.635 7	3.443 4	7.525
新建 B	93.544 3	43.937 6	5.891 4	0.648 1	3.415 5	7.516
新建 C	93.514 6	43.451 0	10.601 9	1.166 2	3.238 8	7.72
新建 D	93.453 7	43.468 1	15.710 0	1.728 1	2.991 5	7.719
新建 E	93.398 4	43.478 4	20.139 1	2.215 3	2.786 2	7.953
新建 F	93.611 8	43.582 9	21.358 5	2.349 4	3.414 5	7.968
新建 G	93.361 7	43.518 0	24.980 8	2.747 9	2.659 7	8.066
新建 H	93.295 0	43.519 6	29.666 1	3.263 3	2.454 7	8.133
新建 I	93.417 4	43.622 7	30.386 5	1.823 2	2.795	7.751
新建 J	93.353 4	43.652 3	36.009 9	2.160 6	2.615 7	7.831
新建 K	93.248 3	43.642 1	40.804 5	2.448 3	2.368 4	7.863
新建 L	93.200 2	43.666 8	45.512 2	2.730 7	2.273 7	7.928
新建 M	92.877 9	43.604 1	64.188 1	3.851 3	1.769 3	8.092
新建 N	92.814 8	43.637 3	70.290 1	4.217 4	1.767 2	8.162
新建 O	92.731 0	43.613 5	75.672 4	4.540 3	1.726 9	8.21
新建 P	92.671 7	43.637 8	81.069 6	4.864 2	1.745 5	8.264
新建 Q	92.587 6	43.601 6	86.333 5	5.180 0	1.744 3	8.288

表 1 中新建 A 至新建 H 为 110 kV 变电站, 新建 I 至新建 Q 为 220 kV 变电站。当输电线路距离或感应电势基本保持不变时, 如新建 A 与新建 G 或

新建 D 与新建 G、新建 E 与新建 H、新建 F 与新建 I, 220 kV 对过流站点直流电流大小的影响程度较大。在 65 km 以内随着输电线路长度不断增加, 新建站点感应电势逐渐减小, 对过流站点直流电流大小的影响程度也逐渐减小; 在 65 km 以外, 随着输电线路长度不断增加, 在单直流接地极下新建站点的感应电势为 1.7 V 左右, 分布趋于平缓, 各个新建站点感应电势基本保持不变。

由此, 在距离过流站点 30 km 内与 30 km 外分别新建一座距离其更近的 110 kV 与 220 kV 站点, 不仅满足了负荷增长的需求, 达到了电力系统经济性要求, 还可有效规避直流偏磁风险。

3.2 双直流接地极对变电站选址的影响

当天中直流和昌吉直流分别以额定电流 $I_{\text{天中}}=5 \text{ kA}$ 、 $I_{\text{昌吉}}=5.455 \text{ kA}$ 同极性(正极)单级大地回路运行时, 根据电路叠加原理, 图 7 表示双直流接地极感应电势分布规律。山北、淖毛湖变电站感应电势分别为 $U_{\text{山北}}=6.7376 \text{ V}$ 、 $U_{\text{淖毛湖}}=6.483 \text{ V}$, 变压器中性点直流电流分别为 $I_{\text{山北}}=7.561 \text{ A}$ 、 $I_{\text{淖毛湖}}=0.8828 \text{ A}$ 。

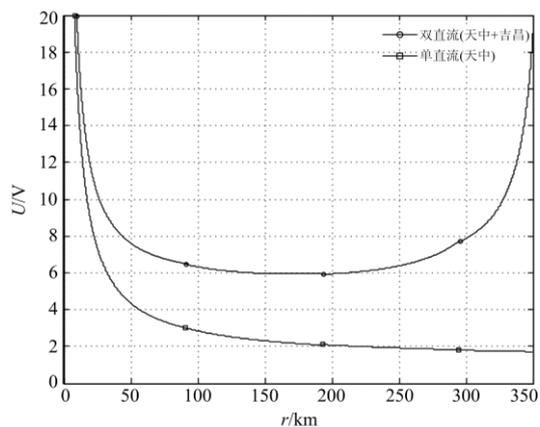


图 7 双直流接地极感应电势分布规律

Fig. 7 Distribution law of induction potential of double DC electrode

3.2.1 正常站点周边变电站选址研究

同理可得, 图 8 表示过流站点周边实际地理地形, 并依据经纬度拟合等势线。

由图 8 可知, 通过准东直流接地极对感应电势的叠加, 正常站点等势点拟合的等势线由一条圆弧变成两条圆弧。考虑电力系统的经济性, 将新建站点靠近正常站点等势线圆弧 M, 减小与正常站点之间的输电线路距离, 降低投资成本。

3.2.2 过流站点周边变电站选址研究

同理可得, 图 9 表示过流站点周边实际地理地形, 并依据经纬度拟合等势线。

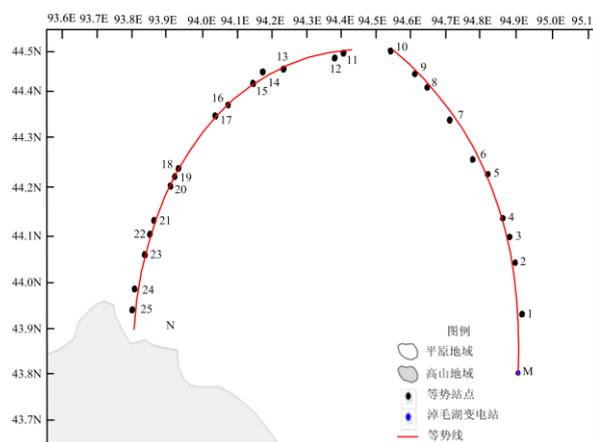


图 8 双直流接地极正常站点等势线

Fig. 8 Double DC electrode normal site equipotential line

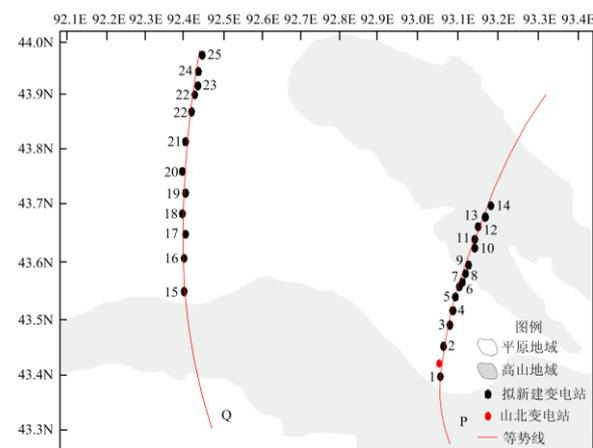


图 9 双直流接地极过流站点等势线

Fig. 9 Double DC electrode overflow site equipotential line

由图 9 可知, 通过准东直流接地极对感应电势的叠加, 过流站点等势点拟合的等势线由一条曲线变成两条曲线, 新建站点应位于等势线 P 左侧和等势线 Q 右侧的区域内且与过流站点径向分布, 有利于电流分散使过流站点引出过大的直流电流。

同 3.1.2 节, 为在相同的感应电势下考虑电力系统经济性使新建站点距离过流站点距离更近, 使其引出足够大的直流电流从而规避直流偏磁风险, 新建站点如表 2 所示。

表 2 中新建 A 至新建 N 为 220 kV 变电站。当输电线路距离基本保持不变时, 新建站点感应电势越小、与过流站点电势差越大对山北变电站直流电流影响越大, 如新建 B 与新建 C、新建 D 与新建 E、新建 F 与新建 G、新建 H 与新建 I、新建 J 与新建 K、新建 L 与新建 M。随着输电线路长度不断增加, 双直流接地极之间在一定程度感应电势呈相对增加的趋势, 当新建站点感应电势基本保持不变时, 对

过流站点直流电流大小的影响程度逐渐减小,如新建 B 与新建 D、新建 E 与新建 F、新建 G 与新建 I、新建 H 与新建 K、新建 L 与新建 N。新建站点应在两条曲状等势线的中间区域内,当感应电势相同时选择距离最短站址径向分布。

表 2 双直接地极周边新建站址对过流站点直流电流影响
Table 2 Impact of new site on the DC current of overflow site around double DC electrode

变电站	经度	纬度	L/km	R/ Ω	U/V	$I_{\text{山北}}/A$
新建 A	93.196 8	43.721 9	50.028 6	3.001 7	2.315 3	5.406 8
新建 B	93.190 2	43.777 1	55.030 3	3.301 8	2.615 8	5.613 4
新建 C	93.000 7	43.616 3	55.693 0	3.341 6	2.071 6	5.479 4
新建 D	92.969 3	43.656 0	60.000 3	3.600 0	2.500 5	5.688 6
新建 E	93.168 2	43.825 0	60.328 1	3.619 7	2.886 8	5.795 5
新建 F	92.969 9	43.748 0	65.568 7	3.934 1	2.914 5	5.897 1
新建 G	93.168 4	43.886 1	65.882 6	3.953 0	3.380 7	6.016 6
新建 H	92.882 7	43.729 7	70.177 9	4.210 7	3.811 4	6.182 5
新建 I	93.061 1	43.880 4	70.496 9	4.229 8	3.379 6	6.085 9
新建 J	92.878 5	43.809 6	75.568 3	4.534 1	4.219 5	6.342 5
新建 K	92.975 0	43.885 2	75.481 6	4.528 9	3.848 8	6.258 9
新建 L	92.749 9	43.747 1	80.358 7	4.821 5	5.466 8	6.660 4
新建 M	92.828 0	43.830 9	80.225 8	4.813 5	4.850 1	6.527 7
新建 N	92.749 6	43.837 3	85.731 4	5.143 9	5.711 2	6.751 2

由此,在距离过流站点 65 km 内新建一座距离其更近的 220 kV 站点、距离过流站点 65~85 km 新建两座距离其更近的 220 kV 站点,可有效规避直流偏磁风险。

4 结论

本文结合新疆电网实际运行情况,以天中直流为例,计及直流偏磁风险指标对正常、过流站点周边新建站点的选址进行研究。具体结论如下:

1) 在复合高山土壤模型下考虑变电站接地网交流接地极之间的耦合电阻,有助于提高部分站点直流电流的计算精度。

2) 在特高压直流接地极周边正常站点拟合的等势线看作以直流接地极为中心的同心圆,新建站点应靠近所求站点的等势线;位于高山附近过流站点拟合的等势线看作以直流接地极为边界的曲线,新建站点应与靠近直流接地极的一侧径向分布。

3) 考虑到特高压直流输电工程的逐步投运与外送负荷的不断增长,基于直流偏磁风险指标可为直流接地极周边区域新建变电站站址的选择提供一定的参考意见,进而还可为过流站点提供过直流电流的疏导通道,规避直流偏磁风险。

参考文献

- [1] 李易峰, 赵津. 新疆: 打通能源大动脉[J]. 国家电网, 2016, 12(8): 98-100.
LI Yifeng, ZHAO Jin. Xinjiang: open the artery of energy[J]. State Grid, 2016, 12(8): 98-100.
- [2] 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.
- [3] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北 500 kV 电网短路电流问题及限流措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.
AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to 500 kV network in Beijing-Tianjin Area and Northern Hebei[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李泓志, 崔翔, 刘东升, 等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
LI Hongzhi, CUI Xiang, LIU Dongsheng, et al. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [7] 杨万开, 印永华, 曾南超, 等. 天中特高压直流输电工程系统试验方案[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 349-355.
YANG Wankai, YIN Yonghua, ZENG Nanchao, et al. System commissioning test program of ± 800 kV UHVDC transmission project from Tianshan to Zhongzhou[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 349-355.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 梅桂华, 梁文进, 刘艳村, 等. 变压器直流偏磁电流阻容抑制装置的开发应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2581-2585.
MEI Guihua, LIANG Wenjin, LIU Yancun, et al. Development of the DC current blocking device in capacitor-resistor for transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2581-2585.
- [11] 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, 50(3): 62-65.
MA Yulong, XIAO Xiangning, JIANG Xu, et al. Optimized grounding resistance configuration against DC magnetic bias of large capacity power transformer[J]. Power System Technology, 2006, 50(3): 62-65.
- [12] 赵志刚, 赵新丽, 程志光, 等. HVDC 中电力变压器直流偏磁屏蔽效应研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 45-52.
ZHAO Zhigang, ZHAO Xinli, CHENG Zhiguang, et al. Research on the shielding effects of power transformer under DC-biased condition in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 45-52.
- [13] 王振浩, 佟昕, 齐伟夫. 电容隔直可控开断桥法抑制变压器直流偏磁[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 120-126.
WANG Zhenhao, TONG Xin, QI Weifu. Blocking DC capacitor controllable opening and broken bridge suppression in transformer DC magnetic bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 120-126.
- [14] 潘卓洪, 梅桂华, 张露, 等. 抑制变压器直流偏磁的电流注入法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 88-91, 108.
PAN Zhuohong, MEI Guihua, ZHANG Lu, et al. A current injection method to restrain transformer DC bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 88-91, 108.
- [15] 李燕青, 谢庆, 王岭, 等. 云理论在配电网变电站选址定容中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 672-677.
LI Yanqing, XIE Qing, WANG Ling, et al. Application of cloud theory to optimal planning of substation locating and sizing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 672-677.
- [16] 段炼, 江安烽, 傅正财, 等. 多直流感地系统单极运行对沪西特高压变电站直流偏磁的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 132-137.
DUAN Lian, JIANG Anfeng, FU Zhengcai, et al. Impact of multiple HVDC system monopolar operation on DC magnetic biasing in West Shanghai UHVAC Substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 132-137.
- [17] 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.
- [18] 刘志民, 刘希高, 杜毅博, 等. 电法测量接地电阻计算方法及影响因素仿真分析[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(2): 96-100, 105.
LIU Zhimin, LIU Xigao, DU Yibo, et al. Calculation method and analysis of influence factors of the grounding resistance in electrical measurement[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(2): 96-100, 105.
- [19] 潘超, 王泽忠, 李海龙, 等. 基于瞬态场路耦合模型的变压器直流偏磁计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 174-181.
PAN Chao, WANG Zezhong, LI Hailong, et al. DC-bias calculation for single phase transformers based on transient field-circuit coupled model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 174-181.
- [20] 高压直流接地极技术导则: DL/T437—2012[S].
HVDC grounding electrode technology guidelines: DL/T437—2012[S].

收稿日期: 2017-08-27; 修回日期: 2017-12-10

作者简介:

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新能源并网技术及电力系统保护与控制研究; E-mail: 410849062@qq.com

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

巩晓玲(1989—), 女, 硕士, 研究方向为高压直流输电稳定与控制。E-mail: 835672389@qq.com

(编辑 魏小丽)