

直流接地极近区新能源运行方式对直流偏磁分布影响研究

肖冕^{1,2,3}, 吴传奇^{1,2,3}, 李红兵⁴, 陈理⁴, 李劲彬^{1,2,3}, 阮羚^{1,2,3}

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430077; 2. 国家电网有限公司高压电气设备现场试验与评估技术实验室, 武汉 430077; 3. 湖北大地杂散电流与能源装备安全野外科学观测研究站, 武汉 430077; 4. 国网湖北省电力有限公司, 武汉 430040)

摘要: 湖北境内有多条直流外送通道, 运行以来多次发生单极闭锁, 直流偏磁的风险评估和防御治理问题突出。武汉特高压换流站的接地极位于随州广水岗上湾, 接地极近区新能源站分布密集、数量众多, 新能源接入电网方式对随州地区直流偏磁分布影响显著。文中开展随州地区新能源站多种接入电网方式下直流偏磁分析研究, 获得了不同运行工况下新能源站和枢纽变电站直流偏磁电流分布规律, 首次提出从优化电网调度运行方式的角度来治理直流偏磁问题。结果表明, 金山风电场、吉阳光伏场对随州永阳和景星供区直流偏磁分布的影响比其他新能源站显著。根据分析, 建议安排金山、吉阳、寿山新能源站通过永阳站接入主网, 乐城山、京桥新能源站通过景星站接入主网, 该运行工况下随州地区各新能源站和枢纽变电站整体直流偏磁风险最小。研究结论对于指导随州地区直流偏磁防御治理具有一定参考价值。

关键词: 特高压直流; 新能源; 运行方式; 直流偏磁; 影响规律

Study on the Influence of Operation Modes of Renewable Energy into the Power Grid Near Grounding Electrode of UHVDC Transmission on the Distribution of DC Bias Current

XIAO Mian^{1,2,3}, WU Chuanqi^{1,2,3}, LI Hongbing⁴, CHEN Li⁴, LI Jinbin^{1,2,3}, RUAN Ling^{1,2,3}

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. SGCC Laboratory of High-Voltage Electrical Equipment Field Testing and Evaluation Technology, Wuhan 430077, China; 3. Hubei Observation and Research Station of Earth Stray Currents and Energy Equipment Safety, Wuhan 430077, China; 4. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430040, China)

Abstract: There are many DC transmission channels in Hubei. The single pole blocking fault has occurred many times, and the risk of DC bias is prominent. The grounding electrode of Wuhan UHV station is located in Suizhou Guangshui where the new energy stations are numerous. The operation modes of renewable energy into the power grid have a significant impact on the DC bias in Suizhou. This paper carries out an analysis of the DC bias in Suizhou under a variety of operation modes, and obtains the DC bias current distribution. It is proposed for the first time to suppress the DC bias from the perspective of optimizing the power grid dispatching operation mode. The results show that the impact of Jinshan wind farm and Jiyang photovoltaic farm on the DC bias distribution of Suizhou Yongyang and Jingxing is more significant. According to the analysis, it is recommended to arrange Jinshan, Jiyang and Shoushan new energy stations to connect to the power grid through Yongyang station, and Lechengshan and Jingqiao new energy stations to connect to the power grid through Jingxing station, which minimizes the overall DC bias risk in Suizhou. The conclusion has certain reference value for guiding the DC bias suppression in Suizhou area.

Key words: UHVDC; renewable energy; operation modes; DC bias; influence law

0 引言

直流偏磁是中性点接地变压器的绕组中流过直流电流, 导致铁芯磁通出现饱和的现象^[1]。直流偏磁现象会严重影响变压器的正常工作, 造成变压器振动和噪声加剧、谐波增大等等^[2-5], 对居民日常生活以及电网的安全稳定运行产生较大危害^[6]。

直流偏磁的产生原因主要有 3 个方面: 一是太阳发生耀斑等剧烈活动时产生的地磁暴^[7-8]; 二是高压直流输电系统采用单极大地回线或双极不平衡方式运行时, 通过换流站接地极向大地注入巨大的直流电流, 影响大地电位梯度分布, 从而使得变电站内产生直流偏磁^[9-13]; 三是轨道交通等产生的直流杂散电流流入变压器绕组, 导致直流偏磁现象发生^[14-16]。随着特高压直流输电工程

的大力发展，直流偏磁的问题日益凸显，也越来越得到重视。

湖北电网作为三峡外送的起点和南北互供的枢纽，境内有多条直流外送通道，运行以来多次发生单极闭锁，所产生的直流偏磁问题对当地交流电网造成较大影响。 ± 800 kV 陕北武汉(简称陕武)特高压工程是湖北省首个特高压直流输电工程，额定输送功率为 8 000 MW，额定电流 5 kA。武汉特高压换流变电站是陕武直流输电工程的受端站，其接地极位于随州广水境内的岗上湾地区，当发生单极大地回线运行或两极不平衡工况时，随州岗上湾接地极对湖北电网的不利影响远超常规直流。

此外，随州广水属湖北省一级风能、太阳能可利用区，全市新能源站数量众多、分布密集^[17-18]，其接入地区电网的方式深刻影响区域电网的直流偏磁电流分布特性。然而，目前对直流偏磁的研究主要围绕直流偏磁的测量仿真、在线监测、风险评估和抑制措施等方面^[19-24]，缺乏新能源站接入主网运行方式对区域直流偏磁影响规律的分析研究，无法进一步指导随州地区直流偏磁风险防御。

文中开展随州地区多种运行工况下直流偏磁电流分布计算研究，分析新能源站接入电网运行方式对直流偏磁分布影响规律。相关研究结论，对于随州地区直流偏磁防御治理具有一定参考价值。

1 直流偏磁电流仿真等值电路模型

建模仿真和试验测量是获取直流偏磁电流分布的两种主要方法，其中试验测量手段存在一定局限性，一是试验仅在换流站投运前直流偏磁调试等有限时间段内才具备测量条件，二是试验不能灵活切换系统运行方式。文中通过建模仿真的方法开展研究，采用场路直接耦合法计算直流偏磁电流分布。

所谓场路直接耦合法，就是将地上的交流电网和地下的土壤部分进行耦合计算^[25-26]。交流电网的直流模型主要包括变压器、输电线路和接地网等。由于交流电网三相直流等值参数对称，仿真采用单相等效电路模型。

500 kV 单相自耦变压器直流偏磁等值计算模型见图 1(a)，500 kV 侧为主变串联绕组输出端，220 kV 侧为主变公共绕组输出端。220 kV 三相三

绕组变压器，直流偏磁等值计算模型见图 1(b)。110 kV 变电站主变中性点不接地，故建模时只考虑 110 kV 新能源站升压变，计算模型见图 1(c)。

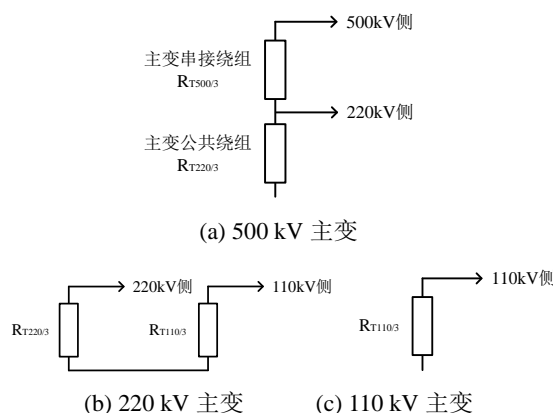


图 1 变压器直流偏磁等值计算模型

Fig. 1 Equivalent calculation model of DC bias for transformers

输电线路等值模型就是连接变电站母线的线路直流电阻。在直流偏磁电流计算时，仅需考虑 110 kV 及以上线路即可。变电站主变中性点通过接地网接地，计算时接地网直接等效为一个小电阻。感应的地表电位是通过深层大地电阻率分布模型来获取，对于由变压器和输电线路直流电阻构成的地上电阻网络，各变电站的地电位相当于与其相连的电压源。直流偏磁电流分布计算的电路模型见图 2。

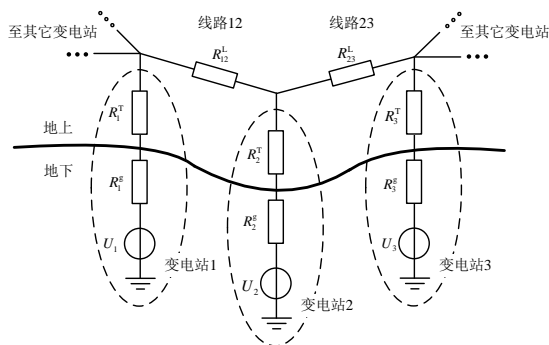


图 2 交流电网直流偏磁电流分布计算的电路模型

Fig. 2 Circuit model for the calculation of DC bias current distribution in AC grids

图 2 中， U_i 表示变电站地表电位等效电源电动势， R_i^g 表示变电站的接地电阻， R_i^T 表示变电站中性点接地变压器的等效直流电阻， R_{ij}^L 表示输电线路的直流电阻($i, j=1, 2, 3, \dots; i \neq j$)。通过求解图 2 电路模型所列电压和电流节点方程，可以获得交流系统直流偏磁电流分布。

2 接地极近区随州交流电网系统分析

Fig. 4 Diagram of the operation mode for the Suizhou system in a certain month (operation mode 0)

接地极近区的大地电位分布，沿接地极径向近似呈指数衰减趋势。考虑陕武直流 1.2 倍额定电流，即接地极入地电流 6 000 A 的最严苛工况，武汉特高压换流站接地极附近大地电位分布见图 5。同时，参考相关资料，110 kV 新能源站的接地电阻取值约 0.5 Ω，220 kV 和 500 kV 变电站的接地电阻取值范围为 0.05~0.3 Ω，变压器绕组直流电阻取值范围为 0.1~0.6 Ω。

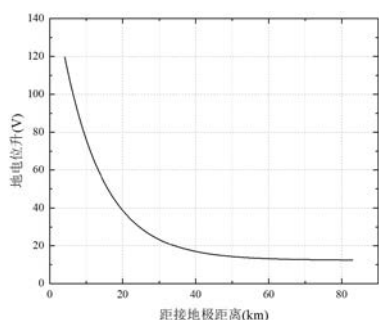


图 5 武汉换流站接地极近区大地电位升分布 (入地电流 6 000 A)

Fig. 5 Distribution of ground potential rise near the grounding electrode of Wuhan station (DC ground current is 6 000 A)

计算得到各变电站以及永阳供区新能源站直流偏磁电流分布情况见表 2。从表 2 可以看到，金山、吉阳新能源站距接地极距离仅不到 6 km，直流偏磁问题严重。永阳站作为枢纽变电站，其主变 110 kV 侧汇集了较大直流偏磁电流。同时，主变 110 kV 侧直流偏磁电流会改变地网电位，进一步影响 220 kV 侧的直流偏磁分布。

表 2 景星站投运前随州地区直流偏磁分布(运行方式 0)
Table 2 DC bias distribution in Suizhou (operation mode 0)

电压等级/kV	站点名称	直流偏磁电流/A
500	编钟	9.57
220	永阳 220 kV 侧	-64.41
	永阳 110 kV 侧	-10.89
220	曾都	3.91
220	随州	8.07
220	岁丰	31.06
220	烈山	8.59
220	季梁	3.19
110	金山	-63.90

110	吉阳	-52.23
110	寿山	-9.09
110	京桥	22.10
110	乐城山	12.23
110	宝林	19.97
110	英姿寨	12.86
110	莲花村	8.60
110	牛脊山	5.42
110	中华山	38.04
110	花园	16.89

注：①电流方向从站内流入大地为正，从大地流入站内为负。

②接地极入地电流 6 kA。

直流偏磁现场测试已成为中国特高压直流输电工程直流调试项目之一，各直流输电工程在投运前均会开展直流偏磁测试和防治工作。在 2022 年武汉换流站直流调试期间，国网湖北电科院对随州 500 kV 编钟站、220 kV 随州站、220 kV 永阳站开展过接地极入地电流 1 kA 下直流偏磁现场测量试验工作^[27]。

试验期间，景星站尚未投运，永阳站也尚未加装直流偏磁抑制装置。将现场试验测量结果和运行方式 0 下的仿真计算结果对比，见表 3。结果表明，仿真评估和试验测量直流偏磁电流量级、规律均相同，也说明所建模型合理性。

表 3 景星站投运前直流偏磁仿真试验对比

Table 3 Comparison of DC bias between simulation and test

变电站	直流偏磁电流/A	
	仿真评估	试验测量 ^[27]
	(入地电流 1 kA)	(入地电流 1kA)
500 kV 编钟	1.59	2.13
220 kV 随州	1.35	1.98
220 kV 永阳	-10.74	-30.10

从表 3 可以看到，与编钟、随州站相比，永阳站直流偏磁电流大一个数量级，存在较大直流偏磁风险。武汉站直流调试试验期间，通过实时切换新能源站中性点接地方式来降低直流偏磁风险，实现了永阳站直流偏磁就地评估和预防，所提直流偏磁治理方案被工程采纳。永阳站 1 号主变 220 kV 和 110 kV 侧分别安装电容型隔直装置和 5 Ω 电阻型隔直装置，见图 6。文中后续的仿真建模中，永阳站均考虑了相应的隔直装置。



图6 永阳站隔直装置现场安装图

Fig. 6 DC Blocking devices at Yongyang Station

4 新能源入网方式对直流偏磁影响规律

4.1 新能源站接入电网运行方式

从图3可以看到,随州永阳和景星供区分布有乐城山、京桥、吉阳、寿山、金山、花园、宝林、英姿寨、莲花村、牛脊山、中华山等11座新能源站。景星站投运以后,随州地区新能源站存在多种入网运行方式。永阳站和景星站均为随州地区新能源站接入主网的重要枢纽变电站。其中,金山、吉阳、寿山、京桥、乐城山5座新能源站可以通过改变线路通道来选择通过永阳站或者景星站及其相连的110kV站接入主网220kV系统,而英姿寨等6座新能源站始终通过永阳站及其相连的110kV站接入主网220kV系统。

注意到,上述新能源站接入主网220kV枢纽变电站的线路通道是耦合相关的,不能完全独立地在永阳站和景星站之间切换。比如,吉阳和寿山站同时和110kV旭升站连接,故分析新能源站入网运行方式时将吉阳和寿山两座新能源站一起考虑。再如,当乐城山站接入永阳站时,京桥、吉阳、寿山站不可能独立从永阳站转移接入景星站。

综上,文中重点分析5种新能源站接入电网运行方式下的直流偏磁电流分布规律,将乐城山、京桥、吉阳及寿山、金山几座新能源站,依次从永阳站转移至景星站,见表4。

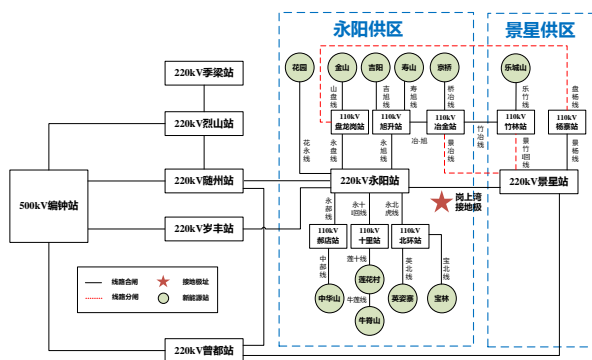
表4 5种新能源站接入枢纽变电站运行方式

Table 4 Five operation modes of new energy stations

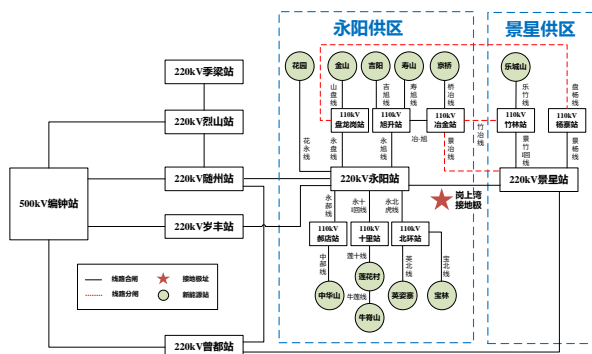
新能源站	接入220kV枢纽变电站				
	运行方式1	运行方式2	运行方式3	运行方式4	运行方式5
金山	永阳	永阳	永阳	永阳	景星
吉阳+寿山	永阳	永阳	永阳	景星	景星

京桥	永阳	永阳	景星	景星	景星
乐城山	永阳	景星	景星	景星	景星

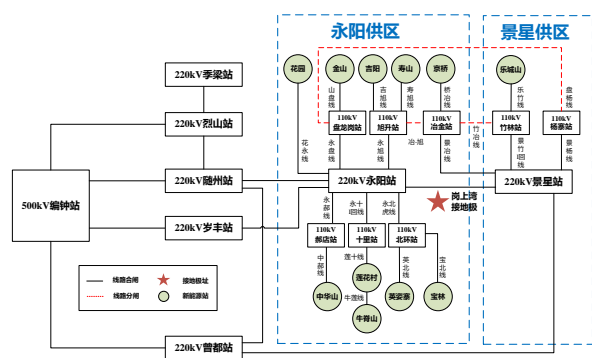
运行方式1~5见图7。图7(a)运行方式1中,乐城山、京桥、寿山和吉阳、金山均接入永阳供区。图7(b)在运行方式1的基础上,断开竹冶线,合上景竹I回线,将乐城山风电场由永阳转移到景星供区,即运行方式2。图7(c)进一步,断开冶一旭线,合上景冶线,将京桥风电场由永阳转移到景星供区,即运行方式3。图7(d)再进一步,断开永旭线,合上冶一旭线,将吉阳+寿山站由永阳转移到景星供区,即运行方式4。图7(e)最后,断开永盘线,合上盘杨线,将金山站由永阳转移到景星供区,即运行方式5。



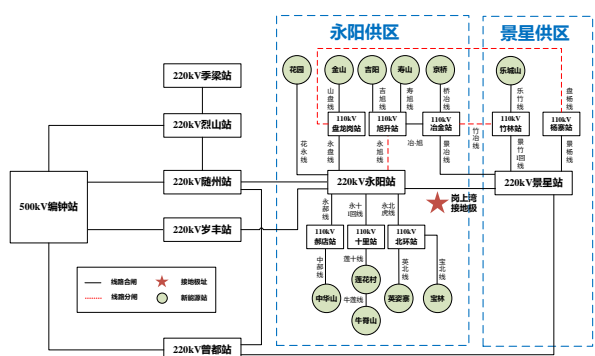
(a) 运行方式1



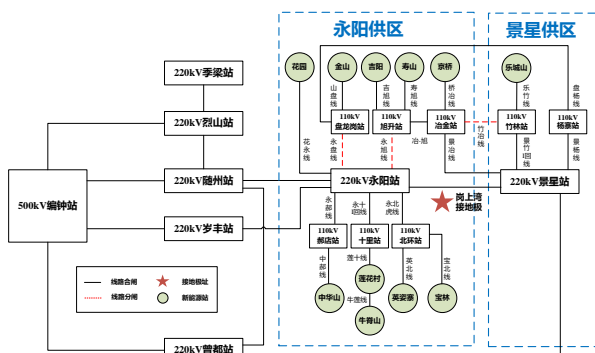
(b) 运行方式2



(c) 运行方式3



(d) 运行方式 4



(e) 运行方式 5

图 7 新能源站接入电网运行方式

Fig. 7 Operation modes of new energy stations connected to the power grid

下面分别分析讨论在上述 5 种新能源站入网运行方式下，随州地区 110 kV 新能源站、220 kV 枢纽变电站直流偏磁电流分布规律。考虑陕武直流 1.2 倍额定电流，即接地极入地电流 6 kA 的最严苛工况。

4.2 110 kV 新能源站直流偏磁电流分布规律

仿真获得 110 kV 新能源站五种入网运行方式下的直流偏磁电流分布，见表 5。

表 5 110 kV 新能源站直流偏磁电流

Table 5 DC bias current at 110 kV new energy stations

新 能 源 站	直流偏磁电流/A				
	运行 方式 1	运行 方式 2	运行 方式 3	运行 方式 4	运行 方式 5
金山	-64.89	-64.46	-61.80	-71.78	-51.15
吉阳	-52.65	-51.04	-41.34	-42.76	-40.88
寿山	-9.47	-8.02	0.69	-0.59	1.10
京桥	21.92	29.21	4.99	22.85	29.01
乐城山	12.15	9.12	8.24	12.75	20.08
宝林	19.36	19.63	21.26	15.13	0.79
英婆寨	12.51	12.67	13.60	10.08	1.82

莲花村	8.32	8.44	9.21	6.33	-0.41
牛脊山	5.29	5.35	5.69	4.43	1.47
中华山	36.99	37.45	40.25	29.74	5.18
花园	16.44	16.64	17.85	13.31	2.67

注：① 电流方向从站内流入大地为正，从大地流入站内为负。

② 接地极入地电流 6 kA。

从运行方式 1~5，110 kV 乐城山风电场、京桥风电场、吉阳光伏场及寿山风电场、金山风电场，依次从永阳转移至景星；而其他新能源站接入方式没有变化，始终通过 220 kV 永阳站接入主网。乐城山、京桥、吉阳、寿山和金山新能源站直流偏磁电流变化规律见图 8。

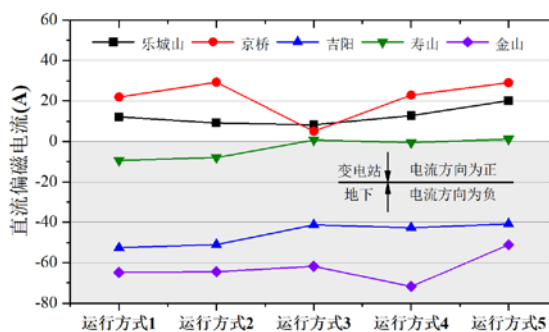


图 8 5 种入网方式下新能源站直流偏磁电流变化

Fig. 8 Variations of the DC bias current at new energy stations under five operation modes

直流输电系统以大地为回路运行时，巨大的电流由直流感地极流入大地，这些电流在地中形成的电流场在很大范围内造成地电位明显的差异，接地极近区大地电位分布沿接地极径向呈指数衰减。距离接地极较近站的地电位较高，直流偏磁受接地极的影响占主导，电流从大地流入站内；距离接地极较远站的地电位较低，直流偏磁受相连站点的影响占主导，电流从相连站点流经本站，再流入大地。

各新能源站和枢纽站地电位分布和电流方向示意图见图 9。下面具体分析新能源站入网运行方式变化的影响。

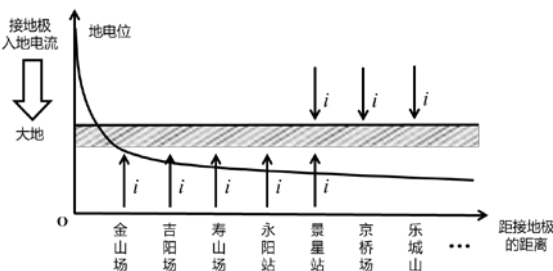


图 9 新能源站和枢纽站地电位分布和电流方向示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ground potential distribution and current direction at stations

4.2.1 运行方式 1→2

从运行方式 1 到 2, 将乐城山风电场的入网枢纽站从永阳转移至景星。可以看到, 乐城山站直流偏磁电流稍微减小。

结合图 2 可知, 改变新能源站入网运行方式, 改变了新能源站到枢纽变电站所经线路通道总等效直流电阻 R 以及两站间的地电位差 ΔU , 两者共同影响新能源站直流偏磁电流大小 $\Delta U/R$ 。与运行方式 1 相比, 运行方式 2 中乐城山站入网线路通道更短, 总等效直流电阻 R 更小。然而, 乐城山站和景星枢纽站间的地电位差 ΔU 比运行方式 1 下更低。因此, 运行方式 2 乐城山站内直流偏磁反而减小。

对于乐城山站, 改变其入网运行方式后, 乐城山站与相邻枢纽变电站间的地电位差 ΔU 是影响其直流偏磁的主导因素, 线路通道的影响不大。

4.2.2 运行方式 2→3

从运行方式 2 到 3, 将京桥风电场的入网枢纽站从永阳转移至景星。可以看到, 运行方式 3 与运行方式 2 相比, 京桥、吉阳、寿山站电流均显著减小, 其他新能源站变化不大。

注意到, 京桥站与寿山、吉阳站接入枢纽变电站的线路通路相互耦合。在运行方式 2 中, 京桥风电场接入永阳站时, 会经过 110 kV 旭升站, 进而与寿山、吉阳站相连。在运行方式 3 中, 京桥风电场与寿山、吉阳站没有直接的 110 kV 电气连接。

和乐城山站规律一样, 运行方式 3 下, 京桥风电场站和枢纽变电站间的地电位差减小且占主导作用, 使得京桥站直流偏磁电流显著减小, 同时减小了从吉阳、寿山站流入相连站点的电流。

4.2.3 运行方式 3→4

从运行方式 3 到 4, 将吉阳、寿山站的入网枢纽站从永阳转移至景星。可以看到, 吉阳、寿山站直流偏磁电流变化不大, 且吉阳站的直流偏磁始终在 -40 A 水平以上。同时, 接入景星站的乐城山、京桥站电流显著增加, 而接入永阳站的中华山、宝林站等电流显著减小。金山站虽然和永阳站相连, 但金山站直流偏磁反而增加。

4.2.4 运行方式 4→5

从运行方式 4 到 5, 将金山站的入网枢纽站

从永阳转移至景星。可以看到, 金山站直流偏磁电流减小, 但仍在 -50 A 水平以上。接入景星站的乐城山、京桥站电流显著增加, 接入永阳站的中华山、宝林等其他新能源站流入大地的电流显著减小。

综上所述, 一方面, 金山、吉阳站直流偏磁始终维持在较大水平, 其接入电网方式对周边新能源站直流偏磁电流的分布影响较大。另一方面, 上述 5 种新能源站接入电网方式中, 运行方式 3 工况下各新能源站总体直流偏磁电流最小。因此, 优先选择乐城山、京桥通过景星站接入主网, 吉阳、寿山、金山通过永阳站接入主网。

4.3 220 kV 枢纽变电站直流偏磁电流分布规律

仿真获得 220 kV 及以上电压等级变电站在 5 种入网运行方式下的直流偏磁分布, 见表 6。

表 6 220 kV 及以上枢纽变电站直流偏磁电流

Table 6 DC bias current at 220 kV and above substations

枢纽 变电站	直流偏磁电流/A				
	运行 方式 1	运行 方式 2	运行 方式 3	运行 方式 4	运行 方式 5
编钟	3.43	3.36	3.33	3.49	3.74
永阳 220 kV	—	—	—	—	—
永阳 110 kV	-5.97	-5.89	-5.40	-7.23	-11.51
景星 220 kV	-16.85	-16.25	-15.98	-17.35	-19.57
景星 110 kV	0.00	-9.12	-13.24	7.75	41.83
曾都	2.49	2.36	2.29	2.62	3.14
随州	0.59	0.49	0.45	0.67	1.01
岁丰	5.39	5.18	5.09	5.58	6.39
烈山	2.88	2.81	2.78	2.93	3.17
季梁	2.05	2.04	2.03	2.06	2.11

注: ①电流方向从站内流入大地为正, 从大地流入站内为负。

②接地极入地电流 6 kA。

运行方式 0 和运行方式 1 对比, 可以看到, 永阳站考虑隔直装置后, 永阳站直流偏磁受到显著削弱。其中, 永阳站主变 220 kV 侧中性点加装了电容型隔直装置, 直流偏磁电流完全得到抑制; 110 kV 侧中性点加装了电阻型隔直装置, 直流偏磁电流得到一定程度的削弱。同时, 与永阳站直接相连的 500 kV 编钟和 220 kV 随州、岁丰等变电站直流偏磁也显著降低, 未直接与永阳站连接的 220 kV 季梁、曾都站等变化不大。

从运行方式 1 到运行方式 5, 可以看到, 曾都、随州、岁丰、烈山、季梁等 220 kV 变电站直

流偏磁电流受新能源站入网运行方式的影响不大，且直流偏磁电流均在允许值范围内。这是由于运行方式 1~5，主要影响永阳站和景星站 110 kV 侧系统，110 kV 侧直流偏磁电流会影响地电网，进一步影响 220 kV 侧直流偏磁分布，但永阳站内 220 kV 侧采用电容型隔直装置，完全隔绝了 220 kV 侧的直流电流通路，故 220 kV 曾都、随州、岁丰、烈山、季梁等变电站直流偏磁电流变化不大。

下面重点讨论 220 kV 景星和永阳枢纽变电站直流偏磁电流的变化规律，见图 10。其中永阳站 220 kV 侧安装了隔直装置，完全阻断了直流回路。

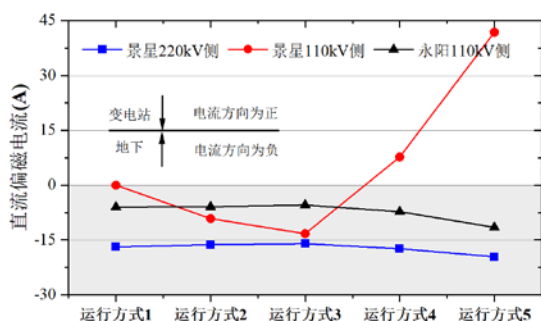


图 10 5 种入网方式下景星和永阳站直流偏磁电流变化
Fig. 10 Variations of the DC bias current at Jingxing and Yongyang stations under five operation modes

对于景星变电站，随着新能源站逐渐接入，220 kV 侧直流偏磁电流变化不明显，110 kV 侧直流偏磁电流受影响较大。可以看到，景星变 110 kV 侧，运行方式 1~3，直流偏磁电流幅值逐渐增加，电流从大地流入站内。运行方式 4~5，电流方向发生改变，从相邻站流入本站，再流入大地，幅值显著增加，最大可以达到 42 A 左右。从 4.2 节看到，吉阳和金山两座新能源站距离接地极较近，直流偏磁电流较大，电流从大地流入站内。运行方式 4 和 5 中，吉阳和金山站依次通过景星站接入主网，进而改变了景星站 110 kV 侧直流偏磁电流方向，并使其幅值显著增加。

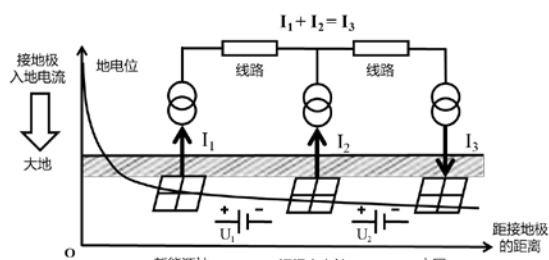
对于永阳变电站，运行方式 1~3，乐城山、京桥站分别从永阳转移至景星，110 kV 侧直流偏磁电流变化不大。运行方式 4~5 下，吉阳+寿山、金山站分别从永阳转移到景星，永阳站 110 kV 侧直流偏磁电流有所增大，电流从大地流入站内。结合前面分析可知，吉阳、金山两座新能源站接入电网方式对枢纽站直流偏磁的影响较其他新能

源站更大。

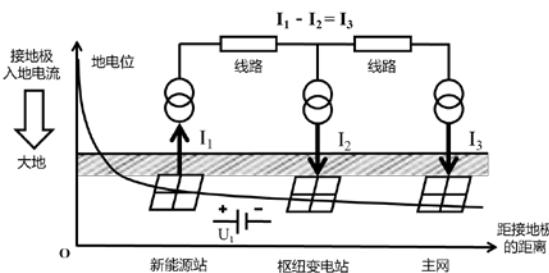
注意到，对比运行方式 4 和 5，金山新能源站从永阳转移至景星后，永阳和景星站直流偏磁电流均会增加。由此可知，枢纽变电站直流偏磁电流大小和接入该站的新能源站数量不一定正相关。将新能源站从枢纽变电站切走，也可能导致枢纽站直流偏磁加剧。具体规律如下：

1)对于永阳站，金山风电场和永阳枢纽站距离接地极都很近，直流偏磁电流都是从大地流入站内，均等效为源端，见图 11(a)。当金山风电场从永阳站转移走，会使得永阳站为主网相邻站提供更大电流，永阳站内直流偏磁加剧。

2)对于景星站，金山风电场比景星枢纽站距接地极更近，两者电流方向相反，前者等效为源端，后者等效为受端，见图 11(b)。当金山风电场转移至景星站，会使得景星站直流偏磁加剧。



(a) 新能源站和枢纽站电流同向



(b) 新能源站和枢纽站电流反向

图 11 新能源站对枢纽变电站直流偏磁影响示意图
Fig. 11 Schematic diagram of the influence of the new energy station on DC bias at substation

总体上，接入电网运行方式 2 和 3 下，220 kV 永阳和景星枢纽站总体直流偏磁电流最小。

5 结论

文中针对武汉特高压换流站接地极近区，随州新能源站多种接入电网方式下的直流偏磁分布情况开展仿真研究。首次提出在新能源站密集地区，通过优化电网调度运行方式来降低直流偏磁风险，给出了随州地区新能源站相对最优的运行

方式。主要结论如下：

1)分析了不同入网拓扑下新能源站和枢纽变电站直流偏磁的分布规律。结果表明，新能源站与枢纽站间的地电位关系、站点间的线路通道两者共同影响直流偏磁分布，一般前者占主导作用。

2)分析表明，金山、吉阳、寿山新能源站直流偏磁主要受接地极的影响，电流从大地流入站内。乐城山、京桥新能源站直流偏磁主要受相邻站点的影响，电流从相邻站点经过本站，再流入大地。金山、吉阳站接入电网方式对永阳、景星枢纽站直流偏磁的影响比其他新能源站显著。

3)根据分析，优先推荐采用运行方式3安排随州地区新能源站接入主网系统。即金山、吉阳、寿山新能源站通过永阳站接入主网，乐城山、京桥新能源站通过景星站接入主网，该工况下各新能源站和枢纽站总体直流偏磁风险最小。

参考文献：

- [1] 童 轶, 祝全乐, 贺 立, 等. 直流偏磁对换流变压器运行影响分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2206-2213.
TONG Yi, ZHU Quanle, HE Li, et al. Analysis on DC bias impact on converter transformers operation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2206-2213.
- [2] 宋奇珂, 王丰华. 大型变压器直流偏磁下电磁振动特征研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 129-139.
SONG Qike, WANG Fenghua. Research on electromagnetic vibration features of large-scaled transformer under DC bias[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 129-139.
- [3] 李晓辉, 刘海娟, 吴传奇, 等. 陕湖直流岗上湾接地极周边 220kV 变压器直流偏磁噪声的试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 111-118.
LI Xiaohui, LIU Haijuan, WU Chuanqi, et al. Experimental study on 220 kV transformer DC bias noise around the grounding Pole in gangshangwan of Shaanxi-Hubei HVDC project[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 111-118.
- [4] 韩玉莹, 姚田彪, 孙其凯, 等. 直流偏磁对变压器运行噪声的影响分析[J]. 变压器, 2022, 59(6): 65-69.
HAN Yuying, YAO Tianbiao, SUN Qikai, et al. Analysis on influence of DC bias on transformer operation noise[J]. Transformer, 2022, 59(6): 65-69.
- [5] 刘苏贤. 谐波和直流偏磁对换流变压器振动特性影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
LIU Suxian. Study on the influence of harmonic and DC bias on the vibration characteristics of converter transformer[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [6] 马书民. 直流偏磁对电网影响的差异性分析及治理策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
MA Shumin. Differential analysis and suppression strategy research of DC bias on power grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [7] 王泽忠, 司 远, 刘连光. 地磁暴对电力系统稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1780-1788.
WANG Zezhong, SI Yuan, LIU Lianguang. Influence of geomagnetic storms on the stability of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1780-1788.
- [8] 杨培宏, 刘连光, 刘春明, 等. 地磁暴引起电网电压波动抑制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1707-1714.
YANG Peihong, LIU Lianguang, LIU Chunming, et al. Strategy for restraining voltage fluctuation in power network caused by geomagnetic storm[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1707-1714.
- [9] 鞠善忠. 特高压直流输电单极运行变压器直流偏磁分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
JU Shanzhong. Analysis of transformer DC magnetic bias due to monopole operation of ultra-high voltage DC transmission[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [10] 刘 焯, 傅晨钊, 赵文彬, 等. 直流接地极运行方式调整过程对变压器直流偏磁影响的研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 110-116.
LIU Ye, FU Chenzhao, ZHAO Wenbin, et al. Study on influence of operation mode adjustment of DC grounding pole on DC magnetic bias of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 110-116.
- [11] 李学鹏, 李庆军, 薛 峰, 等. 青豫直流工程入地电流对青海地区交流电网直流偏磁的影响[J]. 广东电力, 2021, 34(10): 83-88.
LI Xuepeng, LI Qingjun, XUE Feng, et al. Influence of grounding current of qingyu DC Project on DC bias of AC grid in Qinghai region[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(10): 83-88.
- [12] 董曼玲, 姚 帅, 郭 磊, 等. 天山-中州特高压直流输电工程投运后河南电网主变直流偏磁分析及抑制[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 611-618.

- DONG Manling, YAO Shuai, GUO Lei, et al. DC bias analysis and suppression of transformers in Henan power grid after Tianshan-Zhongzhou UHVDC transmission project commissioning[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 611-618.
- [13]蔡汉生, 胡上茂, 刘刚, 等. 牛从直流源接地极入地电流对周边变压器直流偏磁的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 11-15.
- CAI Hansheng, HU Shangmao, LIU Gang, et al. Influence of wengyuan DC grounding electrode current of Niuzhai-Conghua HVDC project on DC bias of adjacent power transformers[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 11-15.
- [14]吴天逸, 冯楠, 高凯, 等. 轨道交通影响下上海电网直流偏磁多参量监测及治理研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 84-91.
- WU Tianyi, FENG Nan, GAO Kai, et al. Research on multi parameters monitoring and suppression of DC bias in Shanghai power grid under influence of rail Transit[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 84-91.
- [15]黄华, 陈璐, 吴天逸, 等. 城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4524-4533.
- HUANG Hua, CHEN Lu, WU Tianyi, et al. Influence of dynamic operation of urban rail Transit on DC magnetic bias of AC power grid transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4524-4533.
- [16]阮羚, 唐泽洋, 张波, 等. 城市轨道交通杂散电流与电网直流偏磁电流耦合关系与检测的研究展望[J]. 湖北电力, 2021, 45(2): 33-48.
- RUAN Ling, TANG Zeyang, ZHANG Bo, et al. Research and prospect of detection and coupling relationship between stray current in urban rail Transit and grid DC bias magnetic current[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(2): 33-48.
- [17]杨瑶, 朱厚焱. 新能源与区域电网发展协调性诊断及建议[J]. 农村电气化, 2022(5): 87-88.
- YANG Yao, ZHU Houyi. Diagnosis and suggestions on the coordination between new energy and regional power grid development[J]. Rural Electrification, 2022(5): 87-88.
- [18]匡志鸿, 郑毅. 随州: 风力光伏发电领跑全省[J]. 湖北电力, 2015(11): 23-25.
- KUANG Zhihong, ZHENG Yi. Suizhou: leading the province in wind and solar power Generation[J]. Hubei Electric Power, 2015(11): 23-25.
- [19]党存禄, 马雄文. 基于复杂网络理论的变电站直流偏磁治理研究[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 193-198.
- DANG Cunlu, MA Xiongwen. Research on DC bias control of substation based on complex network theory[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 193-198.
- [20]程新翔, 喻锐, 曾祥君, 等. 地铁杂散电流引起变压器直流偏磁抑制方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1700-1710.
- CHENG Xinxiang, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Restraining method of transformer DC bias caused by metro stray currents[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1700-1710.
- [21]郭苏鑫, 王泽忠, 梁书原. 三相五柱变压器负载直流偏磁计算分析[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 113-121.
- GUO Suxin, WANG Zezhong, LIANG Shuyuan. Calculation and analysis of load DC magnetic bias of three-phase five-column transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 113-121.
- [22]徐碧川, 潘卓洪, 童涛, 等. 跨网入侵直流偏磁风险的分析与治理[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 84-92.
- XU Bichuan, PAN Zhuohong, TONG Tao, et al. Analysis and mitigation of cross-grid DC bias problem[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 84-92.
- [23]全江涛, 童歆, 文习山, 等. 复杂运行工况下变压器直流偏磁的抑制[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2464-2472.
- QUAN Jiangtao, TONG Xin, WEN Xishan, et al. Mitigation of transformer DC bias in complicated operation conditions[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2464-2472.
- [24]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.
- [25]骆俊. 特高压直流输电受端电网直流偏磁分析及抑制[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- LUO Jun. Analysis and suppression of DC bias of UHVDC receiving-end power grid[D]. Hangzhou:

Zhejiang University, 2019.

[26]阮江军, 徐闻婕, 丁志锋, 等. 基于场路直接耦合模型的交流电网直流偏磁电流分布研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1333-1340.

RUAN Jiangjun, XU Wenjie, DING Zhifeng, et al. Study of DC-bias current distribution in AC power system based on direct field-circuit coupled model[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1333-1340.

[27]吴传奇, 李晓辉, 阮 羚, 等. 特高压直流接地极近区新能源接入电网的直流偏磁评测与抑制[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4172-4180.

WU Chuanqi, LI Xiaohui, RUAN Ling, et al. DC bias evaluation and suppression of power grid with renewable energy near grounding electrode of UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4172-4180.

肖 冕(1994—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合、高电压试验技术等(E-mail: xiaomian1994@foxmail.com)。