

并联直流接地极抑制上海区域直流偏磁的方法研究

顾承昱¹, 司文荣¹, 郑旭¹, 赵文彬²

(1. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200437; 2. 华东电网有限公司, 上海 200002)

摘要:在对直流偏磁产生原因及安装于变压器中性点的直流抑制装置进行简述的基础上,考虑上海区域多直流落点和多接地极的特点,提出了用并联直流接地极去抑制上海区域直流偏磁的方法。根据设计单位资料,对并联用特高压奉贤接地极、华新换流站接地极以及南桥接地极建立了电极模型并获取了各500 kV变电站等效电阻。根据上海区域地质结构和土壤电阻率实测数据,建立了由浅沉积层、深沉积层、基岩层以及地幔至地心层组成的4层水平分层土壤模型。以近景年上海区域电网主要拓扑结构,对直流接地极单独运行、并联运行进行了地表电位和变压器中性点电流计算分析。其中地表电位计算分为上海区域地表电位和各变电站地表电位,而变压器中性点电流计算分有无接入小电阻两种工况。计算结果表明,在并联运行方式中,各变电站的地表电位和直流电流都得到了有效控制。

关键词:直流偏磁;直流接地极;并联;上海区域;地表电位;中性点电流

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)04-0065-10

DC Bias Suppression for Shanghai Region Using Parallel Connection of DC Grounding Electrodes

GU Cheng-yu¹, SI Wen-rong¹, ZHENG Xu¹, ZHAO Wen-bin²

(1. East China Electric Power Test & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200437, China;

2. East China Electric Power Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: The mechanism of DC bias and the DC bias suppression equipments at transformer neutral point are described. Considering the feature of many DC grounding electrodes in Shanghai region, a method for suppressing DC bias using parallel connection of DC grounding electrodes is proposed. The DC grounding electrodes in Fengxian, Huaxin and Nanqiao 500 kV substations are modeled, and equivalent resistances for each substation are obtained according to the primal construction data. And a four-layer horizontal soil model is established including superficial sedimentary deposit, deep sedimentary deposit, bedrock deposit and earth mantle deposit by considering the geologic frame and the measured resistivity of different soil layer in Shanghai region. The earth potential and DC bias current of transformers in Shanghai region are calculated and analyzed in the cases of independent operation and parallel-connection operation of the DC grounding electrodes with the topological structure of the existing Shanghai power grid. The results show that the earth potential and DC bias current of each 500 kV-level substations can be efficiently suppressed.

Key words: DC bias; DC grounding electrode; parallel connection; Shanghai region; earth potential; DC bias current

0 引言

特高压直流输电正常运行状态下直流线路工作在双极运行方式,直流电流通过两极的输电线构成回路。但在系统调试、检修或发生故障的情况下,高

压直流输电会采用单极大地回线的运行方式^[1]。单极大地回线运行时地中电场对电流流经范围环境会造成较大的影响^[2-4]。由于巨大的直流电流经直流接地极流入大地,因而会在造成较大范围内的地电位变化,这种地电位的变化,对周边的交流系统可能造成影响。尤其对于中性点接地的交流系统,将会

收稿日期:2011-11-20; 修回日期:2011-12-26

使处于不同直流电位的变电站经输电线路、变压器绕组构成直流回路^[5-8],直流电流会经变压器中性点侵入变压器绕组,引起变压器的直流偏磁^[9]。变压器出现直流偏磁后会出现噪声增大,振动加剧等现象,还可能发生过热,并造成交流电网的谐波畸变增大^[10]。

鉴于直流偏磁对变压器的影响较大,而上海电网的直流落点越来越多,这种影响还会进一步发展,为此研究如何减小单极大地回线运行对交流系统和周边环境的影响成为一个迫在眉睫的问题。虽然国内外已经研究出多种在变压器中性点安装的抑制直流的装置(见第1节),但是基本只对安装点的设备效果明显,同时有可能是直流电流转移到邻近变电站的设备,笔者将结合上海的实际情况从系统的角度提出一种全新的减小这种影响的方法:结合上海电网内目前多直流系统多接地极的特点,将各接地极并联。一方面使得直流入地电流得以分流,减小各接地极的绝对电位,另一方面使得上海电网在几个接地极附近的地表电位相对差值减小,从而可以使得电网内各变压器中性点的直流总体水平有所减小。

1 抑制变压器直流偏磁方法和接地极并联方法的提出

1.1 直流偏磁产生原因简述

根据经典电磁场理论,在均匀土壤和理想接地极假定条件下,直流电流流经大地时,会引起地表直流电位的变化,而地表的电位的变化与地下电流密度的分布有关,可以用两个电极的简单情况予以说明^[11],见图1。图1中的1、2号两个电极形状一般考虑为半球形,半径取为 r ,假定电流从1号电极流入,2号电极流出。在地表水平面上,电流密度的 Z 分量为零,据此可以推导得到任一点 A 上的电位,见式(1)。

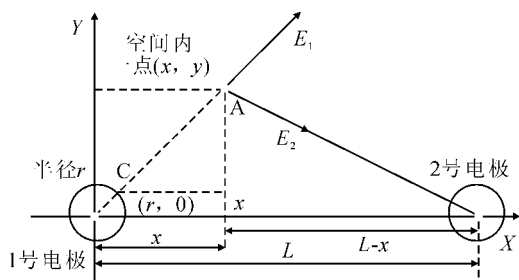


图1 地电位解析示意图

Fig. 1 Earth potential analytic diagram

$$P = \frac{I \times \rho}{2\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{(x+L)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L-x)^2 + y^2}} \right] \quad (1)$$

图2示意性地展示了直流系统单极大地回线运行时,地中电流密度的分布情况,显然地中直流的分布是一个电场的问题。由于直流系统的电流非常大,所以地电位受其影响的范围也较为广泛。

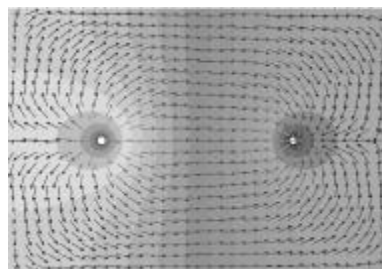


图2 电流在大地中形成回路时电流密度分布规律的示意图

Fig. 2 Diagram of density distribution of current in earth loop

上述工况下,由于各交流变电站的地电位不同,各变电站之间存在电位差,当变电站变压器中性点接地时,交流系统中便会有直流电流流过。因此,对于由输电线路和变压器的直流电阻构成的地上电阻网络,各变电站的地电位差相当于与其相连的电压源,见图3。图3示意性地给出了交流变电站受直流系统单极运行影响的基本原理,直流系统单极大地运行时,会有较大的直流电流注入大地,因而会在地下形成直流电场,受影响区域的变电站地电位将会升高。在地面以上,各变电站间通过架空线路和变压器等设备相互连接,由于连接回路的电阻较小,所以线路和变压器中会产生较大的直流,从而造成变压器偏磁。

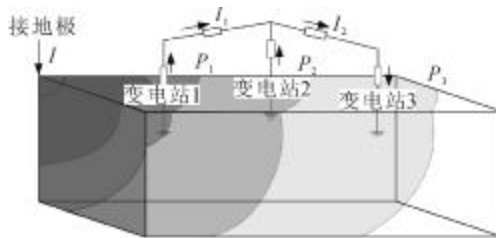


图3 地上电阻网络与地下电场的示意图

Fig. 3 Diagram of electric field under earth and resistance network above earth

显然,当直流系统单极大地运行时变电站地电位的变化与地下电流场的分布情况密切相关,而各站的直流电流大小则与变电站间输电线路的拓扑结构相关。所以对于直流偏磁的研究需要同时研究“场”和“路”两种类型的问题^[12]。

1.2 安装于变压器中性点的抑制直流装置

针对变压器直流偏磁问题,国内外已经有不少厂家研发出了直流抑制装置,其主要作用原理为在变压器中性点串联抑制装置,减少或阻断回路中的

直流成分,达到保护变压器的目的。根据抑制装置的作用原理,可以将这些装置采用的方法划分为电容隔直、反向注入法、电阻法 3 种方法。但这些装置都属于新型设备,运行经验较少,所以采用这些方案之前应当对装置可能带来的影响和潜在的风险进行充分估计。

电容型抑制装置是最早由魁北克水电局提出利用电容阻隔系统中流入的直流电流^[13]。有两种安装方式可以用于抑制系统中的直流电流,一种是将电容型抑制装置安装在线路上,另一种是安装在中性点。安装在输电线路能够起到很好的隔直作用,但是由于仅对安装了电容的线路起作用很不经济,而且需要较高的绝缘水平,所以在具体应用中通常考虑将电容隔直装置安装在变压器中性点处。北美地区发生较大规模的太阳能磁暴后,魁北克水电局就开始致力于隔直装置的开发,并对隔直方案进行了设计,其中一个方案见图 4。其针对魁北克水电局 Rassion/LG2 电站设计的,其中讨论了电容、避雷器不同的组合。

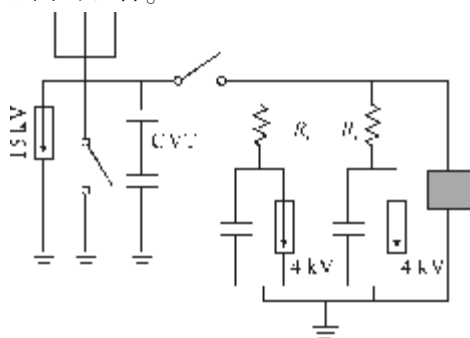


图 4 电容型抑制装置设计方案

Fig. 4 Design scheme of capacitance-type control equipment

电容型抑制装置能够很好的将直流电流隔绝,但是总会存在谐振的风险。在早期的实践中,采用了高压电容进行隔直,虽然取得了一定的效果,但是高压电容较为昂贵,极大地限制了该隔直装置的使用。之后又有公司开发了低压电容器组和保护设备并联的装置,此类装置虽然降低了成本,但是增加了系统的复杂性,同时也带来了风险。

变压器出现直流偏磁是由于直流通过其绕组造成的,因而可以利用外加电流的方法消除直流电流对变压器绕组的影响,此类装置原理性和试验性的方案在国内外均有报道,其基本原理见图 5^[14]。

图 5 给出了反向电流注入装置的原理,该装置需要在附近设置一个补偿接地极,并利用整流装置向变压器中性点注入直流以抵消偏磁电流。此类方法最大的难点在于,很难使直流发生装置跟随地中

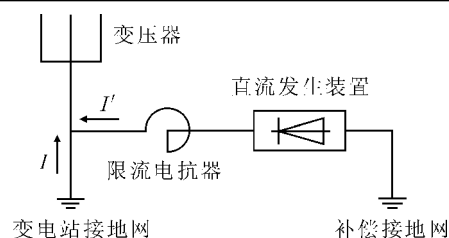


图 5 电流型抑制装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of current-type control equipment

直流大小的变化,有发生过度补偿的可能,并对设备运行带来不利影响。此类装置应用中需要注意:①建造良好的接地点,作为补偿接地极;②增加整流和滤波元件;③需注意补偿的电流大小,避免过度补偿。

电阻型直流抑制装置的思路较为简单,在回路中串联电阻后,流过变压器的直流电流就会减小,由于 500 kV 系统的直流电阻很小,所以仅仅需要一个很小的电阻就能达到良好的抑制效果^[15],其基本原理见图 6。从理论上而言小电阻只要机械和电气参数满足要求,就能够长期使用不需任何保护,但是从经济、占地等各方面权衡,可以考虑在小电阻两端并联保护球隙,从而能够减少瞬时电流对小电阻的冲击。

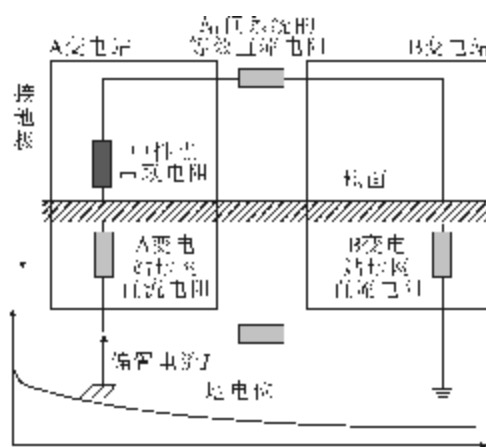


图 6 电阻型抑制装置原理图

Fig. 6 Schematic diagram of resistance-type control equipment

1.3 接地极并联方法的提出

在变压器中性点安装直流抑制装置,其实这种方法比较适合早期的简单电网:例如某地区只有一个直流接地极,而接地极附近只有少数 500 kV 和 220 kV 变电站,只有在这少数变电站的主变中性点安装抑制装置就可以在全网取得很好的效果。但是目前上海地区的情况正好相反,上海地区不是 1 个接地极,而是 3 个,每个接地极周边不是少数几个

变电站,而是很多 500 kV 和 220 kV 的变电站,在这种情况下,变压器中性点安装抑制装置的效果是比较有限的;其只能解决一时一地的问题,不能彻底消除整个电网的直流偏磁现象,抑制装置主要在安装的变压器取得较好的效果,同时有可能使得直流偏磁电流转移的相邻的变电站。测试发现当漕泾变电站安装中性点小电阻后,该变电站的主变的中性点直流分量从 20 A 迅速减少到 1 A 以下,而相邻的 220 kV 合兴变电站主变中性点的电阻由原来的 15 A 增加到 23 A 左右(归算到奉贤接地极电流 4 000 A 工况下)。

考虑到上海多直流落点和多接地极的特点,笔者提出一种接地极并联的方法,将上海的接地极并联,一方面使得直流入地电流得以分流,减小各接地极的绝对电位,另一方面使得上海电网在几个接地极附近的地表电位相对差值减小,从而可以使得电网内各变压器中性点的直流总体水平有所减小。

2 上海区域直流接地极并联计算模型建立

2.1 分析对象的地理位置

变电站和直流接地极的相对位置是直流偏磁计算的基础,上海电网 500 kV 变电站及直流接地极的相对位置的地理分布见图 7。

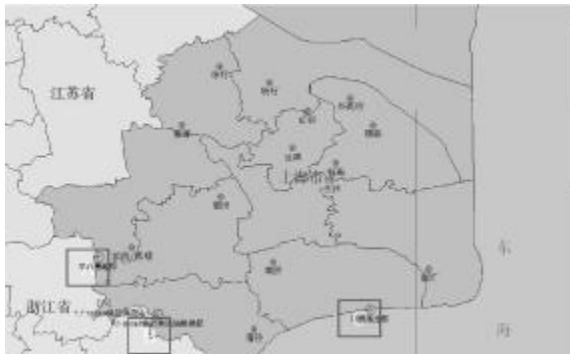


图 7 上海电网 500 kV 变电站和直流接地极地理位置分布
Fig. 7 Geographical position of 500 kV level stations and DC grounding electrodes in Shanghai region

图 7 绘出了上海远景年 500 kV 变电站的地理分布情况,其中虹杨站和枫泾换流站尚未投运,漕泾、南汇已于 2009 年投运。上海电网周边目前共设有 3 个主要直流系统的接地极,分别是 ± 500 kV 华新换流站接地极(A)、 ± 800 kV 奉贤换流站接地极(B)和 ± 500 kV 南桥枫泾换流站共用接地极(C)。3 个接地极中,只有南桥接地极位于海边,其余 2 个均在上海西南部与浙江省交界的地区。

2.2 接地极模型的确定

根据设计单位提供的资料,向家坝至上海

的 ± 800 kV 直流输电工程中,在首末 2 端的两个接地极均采用圆环电极,半径为 250 m,接地导体为直径 70 mm 的圆钢。电导率 $\sigma=1 \times 10^6$ S/m,磁导率 $\mu_r=200$ H/m。

在建模时进行了一定程度的简化,每个半圆环用 8 段直线段代替简化。由 8 根电缆从电流注入点连接到直线段和圆环的交点上。电缆为铜芯,单根截面积 240 mm²,在距离地面高度 0.1 m,从中心点直接连到圆环与圆环接地极的交点上^[16]。圆环接地极在地下 3 m,长轴方向为 X 轴,电流注入线段则用铜线,总截面积为 1 920 mm²,见图 8。

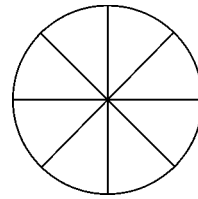


图 8 奉贤换流站接地极的建模

Fig. 8 Mode of grounding electrode of Feng-xian converter station

华新接地极为椭圆单环形接地极,环长 1 760 m,由 2 个直径 400 m 的半圆环与 2 段各 250 m 的直线段构成。接地导体为直径 75 mm 的高硅铬铁。取电导率 $\sigma=1 \times 10^6$ S/m,磁导率 $\mu_r=200$ H/m。在建模时,略做简化,每个半圆环用 8 段直线段代替简化。由 6 根电缆从电流注入点连接到直线段和圆环的交点上,电缆为铜芯,单根截面积 240 mm²,从中心点直接连到交点上。在距离地面高度 0.1 m,从中心点直接连到圆环与圆环接地极的交点上。圆环接地极在地下 3 m,长轴方向为 X 轴,电流注入线段则用铜线,总截面积为 1 920 mm²,见图 9。

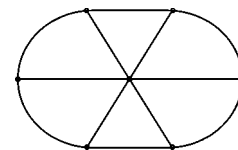


图 9 华新接地极的建模

Fig. 9 Mode of Hua-xin grounding electrode

南桥共用接地极地处海边,结构直线型,由于南桥接地极所处地方电阻率较低,其接地电阻为 0.018 Ω ,为了准确反应其接地电阻值,根据电等效的原理建立接地模型。

在接地极建模时尽可能采用变电站实测的接地电阻值作为建模依据^[17],对已经进行了接地设计的站采用设计数据进行等效,对于尚未建设的变电站则采用已建成的各 500 kV 变电站接地电阻平均值作为其等效依据。表 1 给出了上海区域内 17 个变电站的等效接地电阻。

表1 等效变电站接地电阻

Tab. 1 Equivalent ground resistances of each station

变电站	变电站接地电阻/ Ω
黄渡	0.038
泗泾	0.120
南桥	0.021
杨行	0.037
外高桥	0.120
目华	0.080
银河	0.120
顾路	0.060
杨高	0.030
徐行	0.010
干练	0.050
青浦	0.100
练塘	0.050
三林	0.064 (平均值)
世博	0.064 (平均值)
虹杨	0.064 (平均值)
练塘	0.064 (平均值)

2.3 土壤模型的确定

根据水文地质部门的文献记载,上海位于北纬 $31^{\circ}14'$,东经 $121^{\circ}29'$,地处长江三角洲东缘,在中国南北海岸线中点。上海的地貌景观的总体感觉是坦荡低平的平原,既没有高耸入云的山峦,也看不到陡峭深切的沟壑,地表高程一般只有4 m左右。一般情况下平原地区的表层土壤电阻率是相当低的,而上海地区不但地处平原,而且土质和地下水条件良好,所以表层土壤电阻率较低。

从地质学的观点分析,这种缺少大起大伏的地势特点表明上海是既古老又年轻的地区,其基底十分古老,是11亿年以前形成的古地块,大地构造上属扬子准地台江南过渡带,而上覆的松散沉积物却十分年轻,绝大部分为第四纪以来的沉积物,例如嘉定—马桥—漕泾冈身以东的陆地是6 000年以来泥沙淤积海岸线不断外推形成的。根据平原地貌所反映的沉积环境、沉积建造、物质组成等方面的不同特点,可以将上海地区划分为河口三角洲、东部滨海平原和西部湖沼平原3个地貌区。河口三角洲区位于上海东北部,包括长江口及崇明、长兴、横沙等砂岛的外延地带;东部滨海平原区,分布在冈身及其以东的沿江、沿海地区,由滨海平原和贝壳砂堤组合而成,地势高亢,地面高程多为4~5 m(吴淞高程);西部湖沼平原区分布于冈身以西的湖沼地区,是全市地势最低的地区,除少数蚀余残丘外,大部分地区地面高程低于3.5 m。

上海基岩(坚硬的岩石层)面上覆盖着自晚第三纪以来,以第四纪为主的疏松沉积物,除上海市西部和西南部剥蚀丘陵及其邻近地区,由于基岩隆起而使第四纪地层缺失或厚度变薄外,一般介于200~350 m之间。最厚可达470余米。由于整个沉积盆地由西南向东北倾斜,第四纪沉积厚度也呈向东北方向逐渐增厚的趋势。

基岩埋藏的深浅反映了基岩表面的起伏形态,决定了以后沉积于基岩面上疏松层的厚度,疏松层的富水性。上海地区基岩的起伏是东北低西南高,即嘉定、宝山、川沙、南汇、崇明的基岩埋藏较深,而青浦、金山、松江、奉贤较浅。并显示出由北而南3条基岩沟谷:第1条从江苏的盱直到上海的崇明,呈北东方向伸展,基岩埋深达-400 m;第2条从盱直到黄渡、宝山,呈北东方向伸展,埋深大都在-300 m;第3条枫泾—金山—吴泾—川沙或南汇,亦呈北东方向伸展,埋深-350~-250 m,基岩面上的疏松层含水量高,土壤电阻率数值较小,一般在 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 左右。

根据表2的测量数据,在计算建模中,表层的土壤电阻率取其平均值 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 作为典型值进行计算。对于较深的土壤结构,需根据大地物理模型确定,可取值范围变化较大,根据对华新接地极附近地表电位的测量结果,经过反复试算并与实际情况对比分析,不断完善土壤结构模型,确定了与上海地区的沉积层有其较厚的特点相适应的土分层模型,该项目将其作为上海地区土壤的典型电气模型,见表3。

表2 土壤电阻率实际测量数据

Tab. 2 Data of measured soil resistivity

测量点	测量距离/m	测量值/ $(\Omega \cdot \text{m})$	平均值/ $(\Omega \cdot \text{m})$
华新接地极 (松江区)	5	9.00	9.21
	10	10.05	
	20	11.20	
	40	6.58	
特高压接地极 (金山区)	5	9.05	11.00
	10	13.81	
	20	11.18	
	40	9.95	
南桥接地极 (奉贤区)	5	11.11	9.51
	10	8.25	
	15	9.19	

注:5、10、15、20 m等是指测量时接地极之间的距离。

实际计算时根据表3建立的土壤水平分层模型见图10^[18]。

2.4 电网拓扑模型的确定

变电站间的输电线路是直流电流流通的主要

表 3 文中采用的土壤分层模型

Tab. 3 Soil layered mode used in this paper

层数与名称	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	厚度/ m
1 浅沉积层	10	300
2 深沉积层	200	10 000
3 基岩层	15 000	10 000
4 地幔至地心层	150	数百公里以上

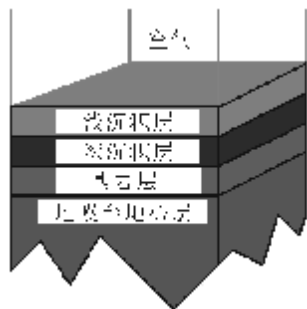


图 10 计算用土壤水平分层模型

Fig. 10 Four layered horizontal soil mode for calculation

通道, 由于 500 kV 站的主变压器多为直接接地运行方式, 因此当各变电站的直流地电位存在显著差异时, 各变电站主变和站间线路上会有直流电流通过。由于 500 kV 输电线路的直流电阻较小, 所以只要有较小的电位差就能够激起较大的直流电流。由于变电站接地电阻、站间线路直流电阻和主变绕组直流电阻存在差别, 因此各变电站变压器流过偏磁直流幅值各不相同, 因此必须基于上海电网的基本拓扑结构才能得到较为准确的直流分布情况, 笔者根据近景年规划构建的上海电网拓扑结构见图 11。在图 11 中拓扑图中还包括了变压器直流电阻和输电线路直流电阻。

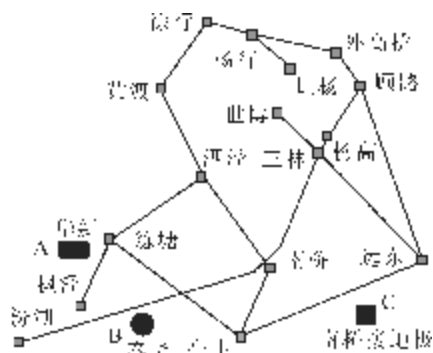


图 11 远景年上海区域电网主要拓扑结构

Fig. 11 Topological structure of current power grid of Shanghai region

2.5 计算工况

计算考虑以下工况(表 4):3 个接地极分别单独运行(方式 1-3),接地极并联运行平均分流(方式 4),接地极并联运行不均匀分流(方式 5-7)。

表 4 接地极分流方式

Tab. 4 Current distribution of grounding electrodes

电流分布	接地极 A/ A	接地极 B/ A	接地极 C/ A
方式 1	4 000	0	0
方式 2	0	4 000	0
方式 3	0	0	4 000
方式 4	1 333	1 333	1 333
方式 5	2 000	1 000	1 000
方式 6	1 000	2 000	1 000
方式 7	1 000	1 000	2 000

3 接地极并联对地表电位的改善效果分析

3.1 上海区域地电位分布

图 12 是各接地极单独运行时的上海区域地电位分布,图 12(a)-(c)分布对应表 4 中方式 1-3 接地极分流方式下上海区域地电位分布。图 12、13 中坐标以华新接地极为原点(0,0)归算。

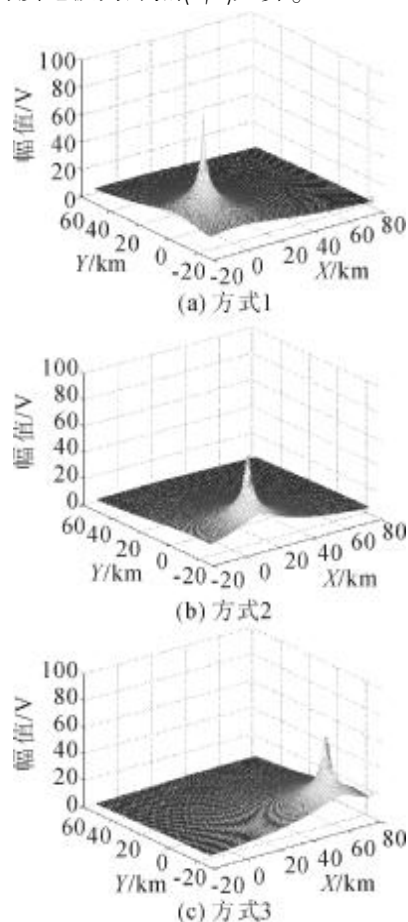


图 12 接地极单独运行时上海区域地电位分布

Fig. 12 Earth potential of Shanghai region with grounding electrodes independent

而图 13 是 3 个接地极并联运行时的上海区域地电位分布,图 13(a)是电流平均分布工况下(表 4 中方式 4),图 13(b)-(d)是 1 个接地极 2 000 A,另外

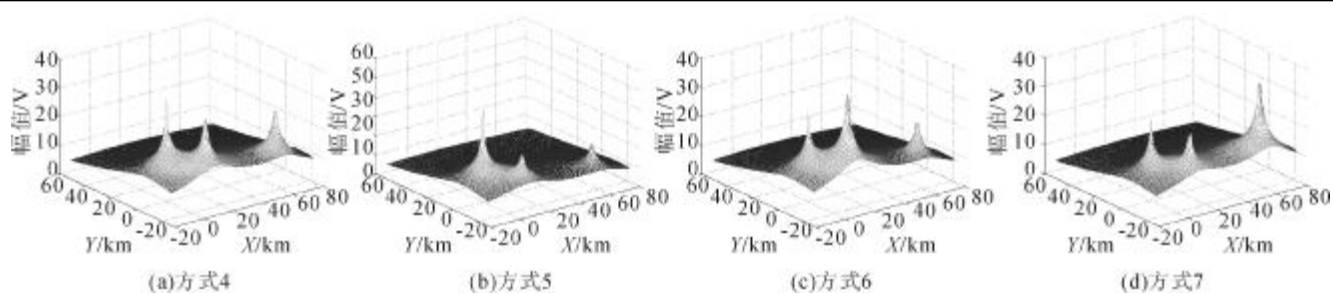


图 13 接地极并联运行时上海区域地电位分布

Fig. 13 Earth potential of Shanghai region with grounding electrodes parallel connection

2个接地极 1 000 A 的情况(表 4 中方式 5-7)。

通过对各图的比较可以看出,接地极并联分流后,接地极的地电位升高绝对值下降,接地极周边的电位下降得更加平缓。

3.2 上海区域各变电站直流电位计算结果

前面对接地极并联运行前后对上海地区的整体电位进行分析,下面对各变电站地表直流电位进行分析。计算结果见图 14、15。

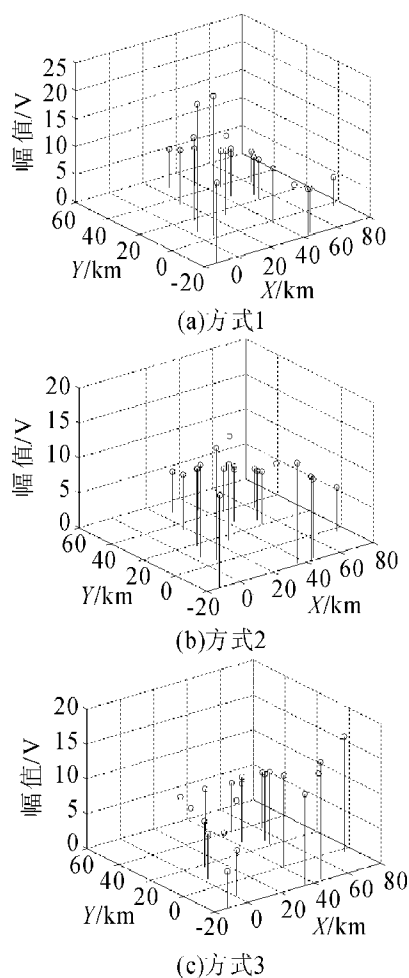


图 14 接地极单独运行时上海区域各变电站地电位分布

Fig. 14 Earth potential of each station in Shanghai region with grounding electrodes independent

为了比较清晰的看出各变电站的地表电位分

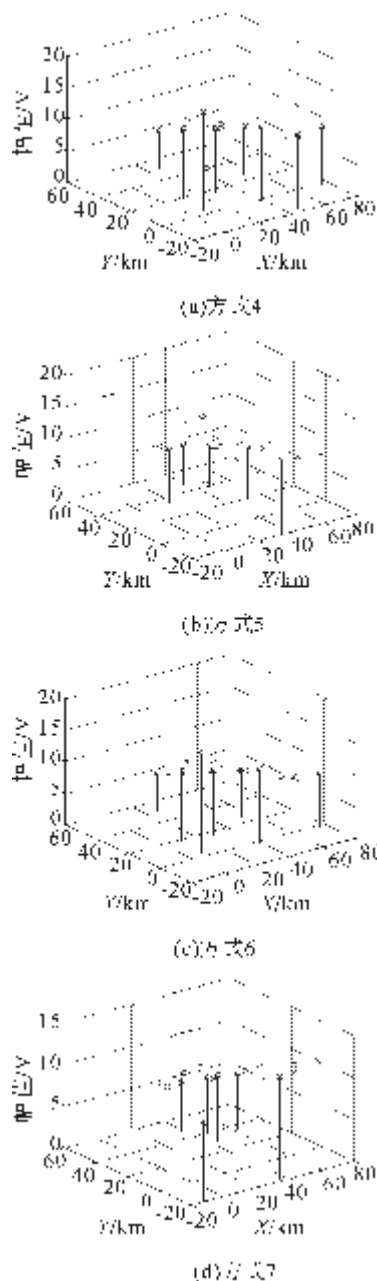


图 15 接地极并联运行时上海区域各变电站地电位分布

Fig. 15 Earth potential of each station in Shanghai region with grounding electrodes parallel connection

布规律,下面进行几种方式的比对;不同接地极单独运行,接地极并联前后和不同并联方式的比对。

首先,可以看出3个直流接地极中,对周边变电站电位的影响程度是不一致的,其中影响最大的华新接地极(方式1),其次是奉贤特高压接地极(方式2),最小的是南桥接地极(方式3)。

其次,将华新单独运行(方式1)和两种并联方式(方式4和方式7)进行了比较,可以看出在接地极并联后,各变电站电位的均匀性有了明显的提高。

最后,从图15(d)中可以看出,各种并联方式中以方式7的效果最好,这时南桥接地极电流2 000 A、奉贤和华新各1 000 A,分析原因主要是南桥接地极周边的变电站的距离都相对较远。

4 接地极并联对变压器中性点电流的改善效果分析

在上面的分析中,可以看出直流接地极的并联可以使得上海区域的电位分布更加均匀,这样不论地面的交流网络如何布置,接地极并联以后都应该

使上海电网内的变压器中性点直流电流也变得更加均匀,为了验证分析这种效果,对以下2种网络方式进行计算:①所有变压器都不接入中性点抑制装置;②根据现在电网实际情况,在500 kV 亭卫变电站的主变中性点分别接入3 Ω 的电阻,在500 kV 练塘变电站的主变中性点分别接入2.1 Ω 的电阻。

4.1 中性点没有其他限制措施条件下

从图16、17中可以看出,在上海电网没有小电阻的条件下,各直流接地极单极运行受影响的变电站有所不同:华新换流站单极运行影响最大的是练塘变电站,总的直流电流为113 A左右,该变电站目前有2台变压器,每相直流电流约19 A。奉贤特高压单极运行时影响最大的枫泾变电站,总的直流电流为37 A左右,该变电站目前有4台变压器,每相直流电流约2 A。南桥或枫泾单极运行时影响最大的远东变电站,总的直流电流约43 A左右,该变电站目前有2台变压器,每相直流电流约7 A。

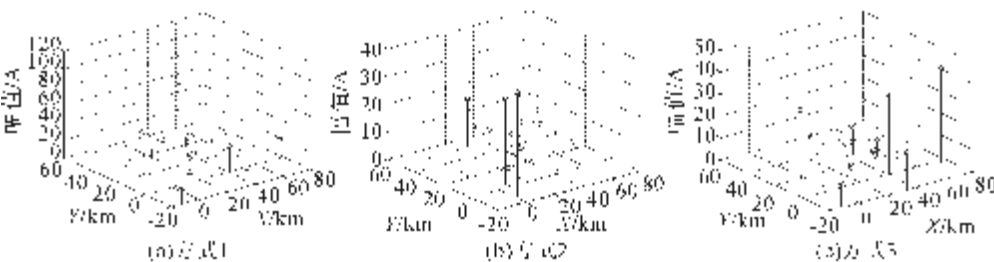


图16 接地极单独运行时变电站直流电流值(无措施)

Fig. 16 DC bias current values of each station with grounding electrodes independent and no small resistance

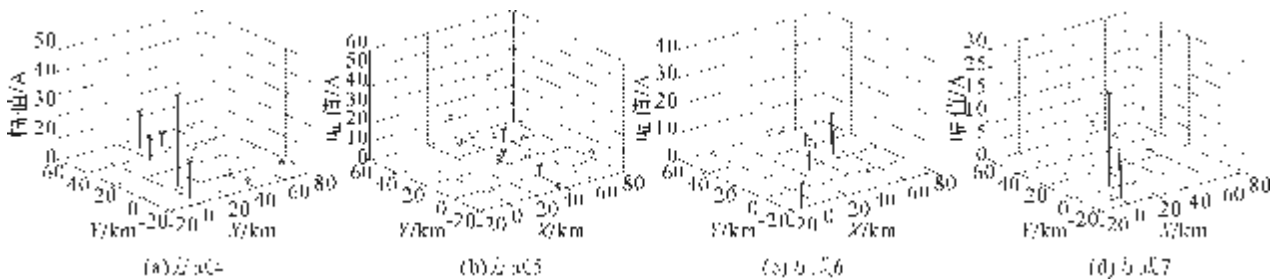


图17 接地极并联运行时变电站直流电流值(无措施)

Fig. 17 DC bias current values of each station with grounding electrodes parallel connection and no small resistance

通过接地极并联运行上述情况得到明显改善,在并联运行方式7(南桥接地极分流2 000 A,其他接地极各1 000 A的并联方式)下,上海电网变电站中直流电流最大的仅为25 A,并没有并联情况下华新单极运行的最大值113 A小了4倍以上,按该变电站2台变压器分配,每相电流约6 A,基本可以满足变压器短时运行直流限值的要求。

4.2 中性点接小电阻

图18、19为亭卫和练塘的小电阻投入运行的网络方式,这时亭卫和练塘的变电站直流电流明显

得到抑制,亭卫变在各直流接地极单极运行时总直流电流为0.19、1.25、0.82 A,练塘变在各直流接地极单极运行时总直流电流为7.42、2.29、1.28 A。而邻近的枫泾站的直流电流有所增加。

对于这种网络运行方式,接地极并联后也使各变电站的电流得到抑制和平衡。在接地极独立运行时,上海电网中枫泾变电站的直流电流最大约59 A,而通过并联分流,在运行方式7(南桥接地极分流2 000 A,其他接地极各1 000 A的并联方式)下,电网中直流分量最大的变电站也是枫泾换流站,但是已经降低

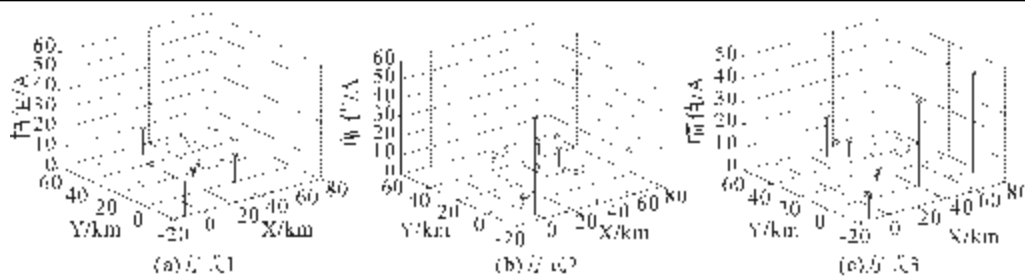


图 18 接地极单独运行时变电站直流电流值(接入小电阻)

Fig. 18 DC bias current values of each station with grounding electrodes independent and small resistance

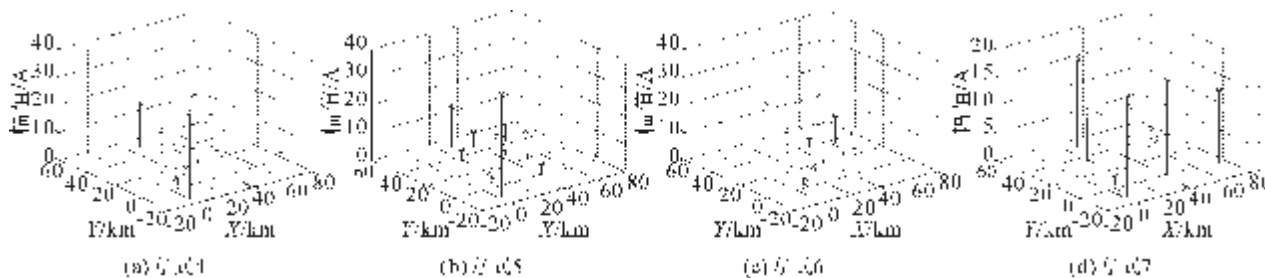


图 19 接地极并联运行时变电站直流电流值(接入小电阻)

Fig. 19 DC bias current values of each station with grounding electrodes parallel connection and small resistance

到 18 A, 减小了 3 倍以上。

并联运行中, 当南桥接地极分配较多电流时, 对各变电站的直流电流抑制和均衡效果最好, 这是有两方面的原因: ①前面计算的网络中华新、奉贤的换流站接地极周边的变电站距离较近, 而南桥周边的变电站距离相对较远, 因而同样的电流流入南桥接地极时对电网的影响相对较小; ②奉贤、华新两个接地极距离都位于上海西部和浙江交界处, 两个接地极分流后有一定的叠加效应, 而南桥接地极和其他两个接地极距离较远, 因而在该接地极电流和另外 2 个接地极之和相等时的并联效果最好。

5 结语

通过对接地极并联分流前后上海区域整体地表电位的计算分析, 可以得出: 接地极的地电位升高绝对值下降; 接地极周边的电位下降得更加平缓。接地极并联分流前后各变电站地表电位的计算结果表明: 3 个直流接地极对周边变电站电位的影响程度是不一致的, 其中影响最大的华新接地极, 其次是奉贤特高压接地极, 影响最小的是南桥接地极, 且接地极并联后, 各变电站电位的均匀性有了明显的提高。

而通过对直流接地极独立或并联运行和两种网络方式(中性点小电阻投入和退出)的各变电站直流电流的分析和比对, 可以得出: 合适的接地极并联分流方式, 可以使得变电站直流电流得到有效的均衡和抑制, 特别是一些原来直流电流较大的变

站, 其直流电流可以减小 3~4 倍。即使在中性点的小电阻不投运的情况下, 各变电站的直流电流都得到了控制, 基本满足变压器短时运行直流限值的要求。

此外, 从文中的计算结果来说: 各种并联方式中, 以南桥接地极分流 50%, 另外 2 个接地极各分流 25% 的效果较好。

参考文献:

- [1] 王官洁, 任震. 高压直流输电技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
WANG Guan-jie, REN Zhen. HVDC transmission technology [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997.
- [2] 董晓辉, 杜忠东, 徐勇. 直流接地极入地电流对交流变压器的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 134-138.
DONG Xiao-hui, DU Zhong-dong, XU Yong. Influence of DC current flowing through the earthing electrode on transformers in ac power grid caused[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 134-138.
- [3] 胡毅, 李景录. 直流接地极电流对中性点接地变压器的影响[J]. 变压器, 1998, 36(1): 15-17.
HU Yi, LI Jing-lu. Effect of DC earthed pol current on the neutral earthed transformer[J]. Transformer, 1998, 36(1): 15-17.
- [4] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 9-14.
WANG Ming-xin, ZHANG Qiang. Analysis on influence of ground electrode current in HVDC on ac power network[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 9-14.
- [5] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 57-59.

- ZENG Lian-sheng. Impact of HVDC ground electrode current on the adjacent power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 57-59.
- [6] 冯远程, 吴忠明. 地中直流对交流变压器的影响与防范[J]. 华东电力, 2008, 36(7): 56-58.
- FENG Yuan-cheng, WU Zhong-ming. Impacts of HVDC ground return current on AC transformers and relevant counter measures[J]. East China Electric Power, 2008, 36(7): 56-58.
- [7] 黄曾华. 华新换流站直接地极对中性点接地变压器的影响[J]. 电力建设, 2008, 29(3): 16-17.
- HUANG Zeng-hua. Effects of Huaxin converter station DC grounding pole on neutral ground transformers[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(3): 16-17.
- [8] 何俊佳, 林福昌, 李化. HVDC 单极大地运行时土壤结构对地电位和地中电流分布的影响[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 26-31.
- HE Jun-jia, LIN Fu-chang, LI Hua. Influence of soil structure on surface potential and ground currents distribution while HVDC mono-polar operation with ground return[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 26-31.
- [9] 刘曲, 郑健超, 李立涅. 直流接地极入地电流对交流变压器的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 643-646.
- LIU Qu, ZHENG Jian-chao, LI Li-cheng. Influential factors distribution of DC currents flowing through neutrals of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 643-646.
- [10] 曹林, 赵杰, 何金良. 三相三柱变压器对偏磁电流的耐受特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 71-74.
- CAO Lin, ZHAO Jie, HE Jin-liang. Research on the withstand performance of three-phase three-limb power transformer under DC current biasing[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 71-74.
- [11] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.
- XIE Guang-run. Grounding technology for power system[M]. Beijing: Water and Electric Power Press, 1989.
- [12] 王升. HVDC 地电流对变压器的影响及其抑制措施[D]. 武汉: 华中科技大学博士论文, 2010.
- WANG Sheng. Influence of HVDC ground electrode current on grounding transformer and its restraining measure[D]. Wuhan: Degree of Doctor of Philosophy in Engineering of Huazhong University of Science and technology, 2010.
- [13] 华东电力试验研究院有限公司. 2008 年接地项目报告[R]. 上海: 华东电力试验研究院有限公司输配电部, 2010.
- ECEPTRI. The 2008 annual concluding report of grounding of ECEPTRI[R]. Shanghai: Distribution and Transmission Department of ECEPTRI, 2008.
- [14] 华东电力试验研究院有限公司. 2009 年接地项目总结报告[R]. 上海: 华东电力试验研究院有限公司输配电部, 2009.
- ECEPTRI. The 2009 annual concluding report of grounding of ECEPTRI[R]. Shanghai: Distribution and Transmission Department of ECEPTRI, 2009.
- [15] 华东电力试验研究院有限公司. 2010 年接地项目总结报告[R]. 上海: 华东电力试验研究院有限公司输配电部, 2010.
- ECEPTRI. The 2010 annual concluding report of grounding of ECEPTRI[R]. Shanghai: Distribution and Transmission Department of ECEPTRI, 2010.
- [16] 杜忠东, 王建武, 刘熙. UHVDC 圆环接地极接地性能分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 146-148.
- DU Zhong-dong, WANG Jian-wu, LIU Xi. Analysis on performance of UHVDC cirque grounding-electrode[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 146-148.
- [17] DL/T 475—2006. 接地装置特性参数测量导则[S].
- DL/T 475—2006. Guide for measurement of grounding connection parameters[S].
- [18] DAWALIBI F. Behavior of grounding system in multilayer soils, a parametric analysis[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(1): 1505-1508.
- 顾承昱(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事防雷接地技术研究工作。
- 司文荣(1981—), 男, 博士, 工程师, 从事高电压试验技术研究工作。
- 郑旭(1963—), 男, 硕士, 首席工程师, 从事输电技术研究工作。
- 赵文彬(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 从事线路运行技术管理工作。

简 讯

世界最大跨海柔性直流输电工程将在大连开工

世界上容量最大跨海柔性直流输电工程将在大连开工建设, 工程容量 1 000 MV·A, 全长约 50.2 km, 预计投资 51 亿元人民币, 2、3 年内建设完成。

该工程被称为大连市区供电的第二条“生命线”, 采用具有世界一流水平的柔性直流输电技术从海上“引电”, 新建一条大连市区与东北大陆相连的高级电网通道。