

特高压直流对 500 kV 变压器直流偏磁的影响分析

张 曼¹, 许文超¹, 牛 涛¹, 朱鑫要²

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;
2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:直流系统单极运行时会在周边变压器中引起直流偏磁,以江苏苏北电网±800 kV 晋北—南京、±800 kV 锡盟—泰州、±800 kV 陇彬—徐州特高压直流工程为例,研究其对 500 kV 变电站直流偏磁的综合影响。兼顾各接地极附近土壤情况,采用综合水平多层土壤模型,建立了苏北电网直流系统模型,对单条或多条直流线路同时单极运行时附近变电站的偏磁电流进行仿真分析。结果表明:土壤电阻率越大,距离接地极同一位置处地电位越高;多条直流线路同时单极运行时主变偏磁电流数值等于各单条直流线路单极运行时代的数和;相邻变电站的抑制措施应综合考虑。

关键词:苏北电网;特高压直流;直流偏磁;抑制措施

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)06-0078-06

0 引言

特高压直流输电具有大容量、远距离、低损耗的优势,在我国电力系统中的应用越来越多。直流系统在调试、检修或发生故障时,会出现单极-大地回路的运行方式,直流接地极中将产生巨大的直流入地电流,在接地极周边形成直流电场,使得附近的变电站主变中性点接地系统中有直流电流通过,引起直流偏磁^[1]。直流偏磁会导致主变出现噪声增大、振动加剧、局部过热等现象,降低主变效率,缩短主变寿命;主变在饱和区域工作将产生大量谐波,造成交流电网的谐波畸变增大,受影响变电站低压侧可能因谐波放大导致谐波过流,从而造成电容器鼓肚、爆炸等事故^[2-4]。

江苏位于东部沿海,经济发达,负荷较大,有多个接地极落点江苏。苏北电网已建成±800 kV 晋北—南京和±800 kV 锡盟—泰州特高压直流工程,根据国家电网公司特高压直流发展规划,未来还将建成±800 kV 陇彬—徐州特高压直流工程^[5-8]。因此,研究苏北电网 3 条特高压直流输电对周边变电站直流偏磁的综合影响具有重要意义。

目前国内外针对直流偏磁已开展了多项研究:国外的研究以地磁感应电流引起的直流偏磁为主;国内的研究以直流输电单极运行引起的直流偏磁为主,集中在直流偏磁的产生机理、引起的励磁电流谐波含量、治理原则及措施等几个方面,研究对象包括±800 kV 锦—苏、±800 kV 天—中、±800 kV

溪—浙等特高压直流工程^[9-13]。以往的文献中没有针对江苏苏北电网 3 条特高压直流工程的研究,且大部分文献以单个直流接地极为例进行研究,采用单一的土壤模型,对多个直流接地极综合作用下直流偏磁大小的研究不多。因此文中结合江苏苏北 3 条特高压直流工程,根据实际情况采用综合水平多层土壤模型,建立了苏北电网直流系统模型;研究了苏北电网单条或多条直流输电线路同时单极运行时,对周边变压器直流偏磁的综合影响。

1 苏北直流工程概况

根据规划,未来江苏苏北电网将建成±800 kV 晋北—南京、±800 kV 锡盟—泰州和±800 kV 陇彬—徐州 3 条特高压直流工程,其接地极分别位于宿迁、泰州和徐州。基本参数如表 1 所示。

表 1 3 条直流工程基本参数

Table 1 Basic parameters of 3 DC engineering

线路名称	接地极	容量 /MW	额定电压 / kV	额定电流/A
晋北—南京	塔河	8000	±800	5000
锡盟—泰州	嵩仑村	10 000	±800	6250
陇彬—徐州	丰县	10 000	±800	6250

直流输电接地极的形状对靠近接地极处的地电位有一定影响,对远处的地电位影响不大。表 1 中 3 条直流工程的接地极均为双圆环结构,埋深为 3~3.5 m。

土壤模型是影响直流接地极附近地电位分布的重要因素之一。由于表 1 中 3 个接地极在地理位置上相距较远,均在 150 km 以上,采用一种土壤模型难以准确模拟各接地极附近的土壤情况^[14-16]。

收稿日期:2017-07-13;修回日期:2017-08-07

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51607092)

因此文中兼顾了各接地极附近的实际土壤情况,采用综合水平多层土壤模型,该模型含有3个土壤块,分别对应3个接地极附近的土壤,其结构如图1所示,参数如表2所示。

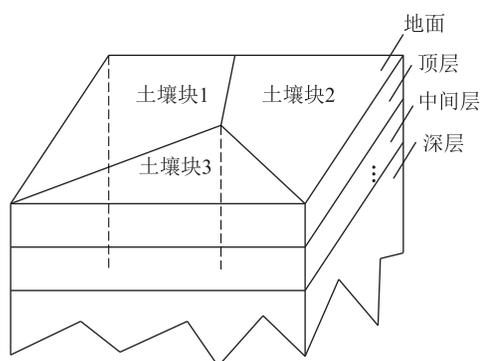


图1 综合水平多层土壤模型

Fig.1 Comprehensive horizontal multilayer soil model

表2 土壤模型参数

Table 2 Parameters of 3 soil model $\Omega \cdot m$			
接地极	层数	顶层土壤电阻率	深层土壤电阻率
塔河	15	26.5	209
嵩仑村	10	16	69.8
丰县	15	9	74

2 直流系统建模

2.1 交流输电系统中的直流分布

接地极直流电流入地后,在大地和交流电网中形成一个巨大的直流分布系统,包括地下电流场和地上电阻网络两个部分。地下电流场电位分布与大地土壤电阻率、直流接地极入地电流大小及方向有关;地上电阻网络由电厂及变电站接地电阻、变压器直流电阻和输电线路直流电阻构成。交流输电系统中直流电流的分布如图2所示,其中实线表示直流电流通路。

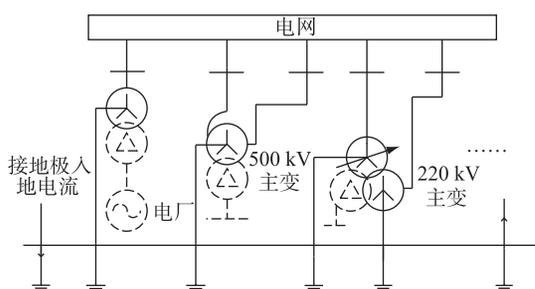


图2 交流输电系统中直流分布

Fig.2 DC current distribution in AC power system

由图2可知,接地极直流电流入地后,通过土壤的传递,在电厂升压变高压侧、220 kV及以上变电站主变高-中压侧、部分110 kV变电站主变高压侧、交流输电线路(含串联电容补偿的除外)等支路中

存在直流电流通路。

2.2 变电站接地网模型

接地网是变电站安全运行的重要保障,接地电阻的大小是衡量变电站接地网性能的主要指标之一。当有大电流入地时,接地电阻的大小直接决定了接地网电位的高低。在实际电力系统中,生产运行部门对降低接地网接地电阻、接触电压及跨步电压的要求越来越高^[17,18]。GB/T 50065—2011 交流电气装置的接地设计规范^[19]中规定接地网的接地电阻应满足:

$$R \leq \frac{2000}{I_g} \quad (1)$$

式中: R 为接地网的最大接地电阻,单位为 Ω ; I_g 为经接地网入地的最大接地故障不对称电流有效值,单位为A。

在不同的土壤模型中,同样结构的接地网接地电阻大小不同,对于水平双层土壤结构,水平接地网的接地电阻计算如下:

$$R = \frac{K(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}{2\sqrt{S}} \quad (2)$$

式中: S 为接地网总面积,单位为 m^2 ; ρ_1, ρ_2 分别为上、下层土壤电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$; K 为系数,可通过查曲线获得^[20]。

2.3 主变直流模型

目前江苏电网500 kV变电站主变大部分采用自耦变压器,直流电流仅在高、中压侧之间流通,在考虑主变直流模型时,可以将三相等效为单相,等效电路如图3所示。其中: A 为高压侧; a 为中压侧; R_1 为高压侧绕组直流电阻; R_2 为公共绕组直流电阻。

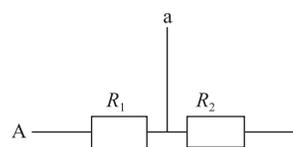


图3 500 kV自耦变压器直流电阻等效电路

Fig.3 DC resistance equivalent circuit of 500 kV auto-transformer

对于一个有2台自耦变压器并联运行的500 kV变电站,其等效模型如图4所示。其中: R_1, R_2 分别为2回500 kV出线的直流电阻; R_3, R_4 分别为2回220 kV出线的直流电阻; R_g 为变电站接地网直流电阻; $R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}$ 分别为2台500 kV主变的直流电阻。对于有多台自耦变压器并联或者分列运行的特高压变电站及500 kV变电站,其等效电路与此类似。

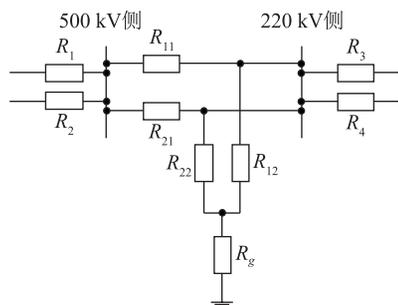


图4 2台自耦变压器并联运行的变电站等效电路

Fig.4 DC resistance equivalent circuit of a substation with two transformers operated in parallel

2.4 输电网络直流模型

电力系统采用三相交流输电,对于输电线路直流电阻而言,三相之间为并联关系;220 kV及以上电压等级输电线路一般采用分裂导线,各分裂导线之间为并联关系;若输电线路是双回或者多回,则多回路之间为并联关系,因此输电线路直流电阻可以等效为多回路并联模型。

假设两个变电站之间有 n_2 回输电线路,导线分裂数目为 n_1 ,每根导线每千米的直流电阻为 $r \Omega$,则这两个变电站之间的线路的直流电阻为:

$$r_{\text{eq}} = \frac{r}{3n_1n_2} \quad (3)$$

常见的3种截面的导线直流电阻如表3所示。

表3 导线直流电阻

Table 3 DC resistance of transmission line

截面	直流电阻/ Ω
630	0.046 33
400	0.072 32
300	0.096 14

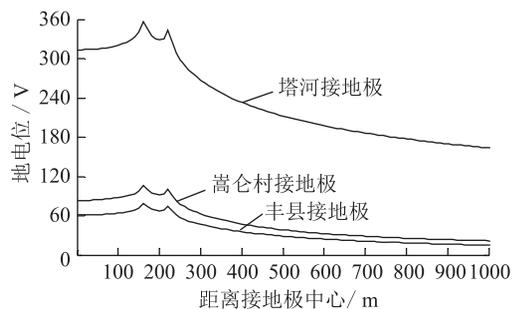
3 计算及分析

3.1 地电位分布特性

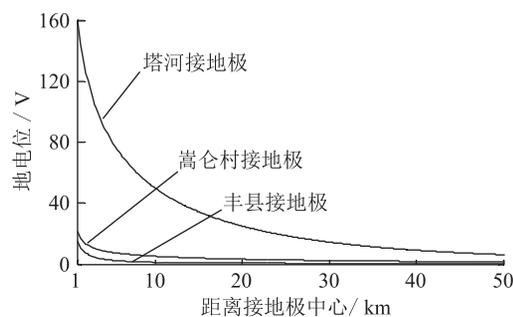
以额定电流作为直流线路单极运行时接地极的入地电流,3个接地极附近的地电位分布特性如图5所示,其他入地电流情况和地电位大小,可按比例折算。由图5可知,接地极极环上方地表电位最高,离开接地极后地表电位逐渐下降,且下降速度逐渐变慢;距离接地极不同位置处地电位结果如表4所示,可知距离接地极20 km以外,地电位下降已达到90%以上。比较3种土壤模型下地电位的分布特性可知,土壤电阻率越大,距离接地极同一位置处地电位越高;土壤电阻率越小,地电位衰减越快。

3.2 变压器中性点偏磁电流

直流线路在调试、检修或发生故障时将单极运行,考虑如下4种运行方式。方式1:仅晋北直流单



(a) 距离接地极中心0~1000 m



(b) 距离接地极中心1~50 km

图5 地电位分布曲线

Fig.5 Earth surface potential curves

表4 地电位衰减百分比

Table 4 Decreasing percentage of earth surface potential %

位置	距离/km			
	1	5	10	20
塔河接地极	54.2	77.5	86.0	93.0
嵩仑村接地极	79.7	92.7	95.1	96.9
丰县接地极	81.0	96.7	98.4	99.1

极运行;方式2:仅锡盟直流单极运行;方式3:仅陇彬直流单极运行;方式4:3条直流线路同时单极运行。一般情况下,方式4出现的概率较小。

根据电路叠加原理,多条直流线路同时单极运行时在大地某处产生的地电位应该等于各个直流线路单独单极运行时的地电位代数和,对应方式主变偏磁电流也应满足叠加关系。以500 kV XW等4个变电站为观察对象,其与3个接地极的位置关系如图6所示,计算结果如表5所示,表中电流值的正、负表示方向,正方向表示电流入地。

表5 偏磁电流计算结果

Table 5 Results of DC magnetic bias currents A

变电站	方式1	方式2	方式3	方式4	叠加
AL	5.357	1.420	0.998	7.775	7.776
SS	6.110	4.596	1.704	12.417	12.409
LH	2.189	4.213	2.241	8.649	8.643
XW	3.005	18.075	1.841	22.926	22.921

注:表中第一列为变电站名称缩写,下同。

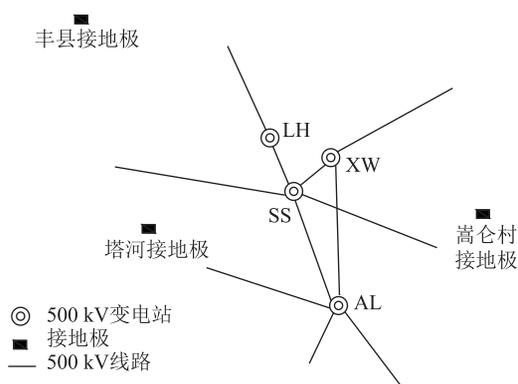


图6 接地极与相关变电站位置

Fig.6 Location of grounding electrodes and substations

表5中,叠加表示方式1、2、3的代数和,方式4与叠加结果的差值很小,误差不超过0.1%,验证了前述叠加原理。对于其他任意两种直流线路同时单极运行的情况,根据表中结果进行代数叠加即可。由表可知,陇彬直流对表中几个变电站的直流偏磁影响较小,这是由于陇彬直流丰县接地极附近土壤电阻率较小,且距离这几个变电站较远,均在150 km以上,因此产生的偏磁电流较小。

4 抑制措施

DL/T 437—2012 高压直流接地极技术导则^[21]中规定,变压器每相绕组允许直流电流暂定为:单相变压器为额定电流的0.3%;三相五柱变压器为额定电流的0.5%;三相三柱变压器为额定电流的0.7%。

对于常用500 kV三单相变压器或三相五柱变压器,其三相绕组总允许直流电流限值计算如表6所示,表中的计算结果为每相绕组允许直流电流的3倍。

表6 常用500 kV主变直流偏磁限值
Table 6 Limits of DC magnetic bias currents of commonly used 500 kV transformers

变压器类型	容量/(MV·A)	直流限值/A
三单相	1000	10.39
	750	7.79
三相五柱	1000	17.32
	750	12.99

根据表5计算结果,XW变电站在方式2及方式4两种情况下偏磁电流均超过18 A,需要加装抑制装置。根据以往的研究,抑制偏磁电流的方法有反向注入电流法、电容隔直法、电阻抑制法^[22,23],文中采用电阻抑制法,考虑在XW主变加装1 Ω小电阻,加装之后偏磁电流计算结果如表7所示。可知,XW主变加装1 Ω小电阻后,偏磁电流明显下降,减

小了约87%,但其他几个变电站的偏磁电流有所增大,最大增大了约13%。

因此,在采用小电阻抑制偏磁电流时要考虑对周边变电站的影响,如果造成周边变电站偏磁电流增大过大,超过了变压器的承受能力,则也需要加装小电阻进行抑制。

表7 加小电阻后偏磁电流计算结果

Table 7 Results of DC magnetic bias currents with series-resistance in XW substation A

变电站	方式2	方式4
AL	1.524	7.907
SS	5.162	13.136
LH	4.729	9.305
XW	2.219	2.815

5 结论

文中结合江苏苏北3条特高压直流工程,兼顾各接地极附近的实际土壤情况,采用综合水平多层土壤模型,建立了苏北电网直流系统模型,主要结论如下:

(1) 地电位分布与土壤电阻率密切相关,土壤电阻率越大,距离接地极同一位置处地电位越高。对于多直流接地极且各接地极相距较远的系统,可采用土壤分块模型,兼顾各接地极附近土壤情况。

(2) 多条直流线路同时单极运行时在某主变中性点产生的偏磁电流等于各直流线路分别单极运行时的代数和。

(3) 采用小电阻抑制直流偏磁时,有可能造成周边变电站偏磁电流增大,如果因此超过了变压器的承受能力,需综合考虑抑制措施。

(4) 针对苏北3条直流工程投运后对XW等变电站偏磁电流的影响,文中的计算结果提供了很好的参考,但考虑到土壤模型与实际土壤的误差及计算软件的缺陷等,主变偏磁电流实际值应以投运后的实测值为准,对于尚未投运的变电站,建议预留直流偏磁抑制装置的安装场地。

参考文献:

- [1] 杨永明,刘行谋,陈涛,等. 特高压直流输电接地极附近的土壤结构对变压器直流偏磁的影响[J]. 电网技术,2012,36(7):26-32.
YANG Yongming, LIU Xingmou, CHEN Tao, et al. Impact of soil structure adjacent to ground electrodes of UHVDC power transmission lines on DC bias of power transformers[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 26-32.
- [2] 杨林,汪惟源,万振东,等. “十三五”江苏电网网架评估研究[J]. 电网与清洁能源,2016,32(7):71-75.
YANG Lin, WANG Weiyuan, WAN Zhendong, et al. Research

- on the performance evaluation of Jiangsu power grid structure in the 13th Five-Year[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7):71-75.
- [3] 何俊佳,叶会生,林福昌,等. 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 Junjia, YE Huisheng, LIN Fuchang, et al. 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.
- [4] 蒯狄正,万 达,邹 云. 直流偏磁对变压器的影响[J]. 中国电力, 2004,37(8):41-43.
KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Impacts of long-time DC biasing magnetism on transformers[J]. Electric Power, 2004,37(8):41-43.
- [5] 杜志刚,牛 林,赵建国. 发展特高压交流输电,建设坚强的国家电网[J]. 电力自动化设备, 2007,27(5):1-5.
DU Zhigang, NIU Lin, ZHAO Jianguo. Developing UHV AC transmission and constructing strong state power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(5):1-5.
- [6] 谢珍建,王海潜,杨 林,等. 特高压交流背景下的江苏电网无功电压控制分析[J]. 华东电力, 2014, 42(7):1310-1315.
XIE Zhenjian, WANG Haiqian, YANG Lin, et al. Reactive voltage control of UHV AC/DC Jiangsu power system[J]. East China Electric Power, 2014,42(7):1310-1315.
- [7] 朱鑫要,汪惟源,汪成根. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程, 2016,35(2):39-42.
ZHU Xinyao, WANG Weiyuan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu power grid [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2016,35(2):39-42.
- [8] 文继锋,张晓宇,程 骁,等. 换流变压器直流偏磁与饱和保护[J]. 江苏电机工程, 2013,32(2):28-30.
WEN Jifeng, ZHANG Xiaoyu, CHENG Xiao, et al. DC bias and saturation protection of converter transformer [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2013,32(2):28-30.
- [9] 王 建,马勤勇,常喜强,等. ± 800 kV 天—中直流对哈密电网变压器直流偏磁的影响[J]. 四川电力技术, 2014,37(4):46-52.
WANG Jian, MA Qinyong, CHANG Xiqiang, et al. Impacts on DC magnetic bias of transformers in Hami power grid of ± 800 kV Tian—Zhong HVDC project [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014,37(4):46-52.
- [10] 吴 鹏,田 猛,陆云才,等. 锦—苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响[J]. 江苏电机工程, 2014,33(1):5-8.
WU Peng, TIAN Meng, LUN Yuncai, et al. Impacts of Jin—Su HVDC project on transformer DC magnetic bias in Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electric Engineering, 2014,33(1):5-8.
- [11] 顾承昱,司文荣,郑 旭,等. 并联直流接地极抑制上海区域直流偏磁的方法研究[J]. 高压电器, 2012,48(4):65-74.
GU Chengyu, SI Wenrong, ZHENG Xu, et al. DC bias suppression for Shanghai region using parallel connection of DC grounding electrodes [J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(4):65-74.
- [12] 邱 璆,吴广宁,任志超,等. 变压器中性点串小电阻抑制直流偏磁的研究[J]. 华东电力, 2012,40(5):812-816.
QIU Qiu, WU Guangning, REN Zhichao, et al. Transformer Neutral series low resistance designed against DC magnetic bias[J]. East China Electric Power, 2012,40(5):812-816.
- [13] 郝治国,余 洋,张保会,等. 高压直流输电单极大地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. Earth surface potential distribution of HVDC operation under monopole ground return mode [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(6):10-14.
- [14] 张一坤,吴广宁,任志超,等. 土壤结构对直流入地电流分流特性的影响研究[J]. 现代电力, 2012,29(2):56-60.
ZHANG Yikun, WU Guangning, REN Zhichao, et al. The influence of soil structure on bifurcated characteristics of DC grounding current[J]. Modern Electric Power, 2012,29(2):56-60.
- [15] 阮 玲,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.
- [16] 何俊佳,叶会生,林福昌,等. 土壤结构对流入变压器中性点直流电流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007,27(36):14-18.
HE Junjia, YE Huisheng, LIN Fuchang, et al. Influence of soil structure on direct current flowing into neutral point of power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(36):14-18.
- [17] 李 谦,文习山,肖磊石. 土壤特性对变电站接地网特性参数影响的数值分析[J]. 高电压技术, 2013,39(11):2656-2663.
LI Qian, WEN Xishan, XIAO Leishi. Numerical analysis of influence of soil characteristics on characteristics parameters of substation grounding grid [J]. High Voltage Engineering, 2013,39(11):2656-2663.
- [18] 杨庆刚. 江苏电网接地问题探讨[J]. 江苏电机工程, 2015,34(2):82-84.
YANG Qinggang. Analysis on the grounding issues in Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electric Engineering, 2015,34(2):82-84.
- [19] GB/T 50065—2011 交流电气装置的接地设计规范[S].
GB/T 50065—2011 Code for design of AC electric installations earthing[S].

- [20] NB/T 5091—2015 水力发电厂接地设计技术导则[S].
NB/T 5091—2015 Earthing design guide for hydropower station[S].
- [21] DL/T437—2012 高压直接地极技术导则[S].
DL/T437—2012 Technical guide for HVDC earth electrode system[S].
- [22] 童能高,陈洁. 抑制主变压器中性点入地直流电流的几种措施[J]. 广东电力,2009,22(10):13-15.
TONG Nenggao, CHEN Jie. Several measures for suppressing direct current in neutral point of main transformer[J]. Guangdong Electric Power,2009,22(10):13-15.
- [23] 朱艺颖,蒋卫平,曾昭华,等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):1-7.
ZHU Yiyang, JIANG Weiping, ZENG Zhaohua, et al. Studying on measures of restraining DC current through transformer neutrals[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(13):1-7.

作者简介:



张曼

张曼(1991—),女,河南周口人,硕士,工程师,从事电网规划设计、电力系统电磁暂态仿真分析、柔性交流输电技术工作(E-mail: zhangman@jspdi.com.cn);

许文超(1979—),女,江苏盐城人,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计、输变电工程设计、电力系统电磁暂态仿真工作(E-mail: xuwenchao@jspdi.com.cn);

牛涛(1984—),男,陕西咸阳人,硕士,工程师,从事输变电工程设计、电力系统电磁暂态仿真、微电网方面的研究工作(E-mail: niutao@jspdi.com.cn);

朱鑫要(1987—),男,河南开封人,博士,工程师,从事电力系统稳定控制及规划研究。

Influence of HVDC Systems on 500 kV Transformer DC Magnetic Bias

ZHANG Man¹, XU Wenchao¹, NIU Tao¹, ZHU Xinyao²

(1. China Energy Engineering Group Co. Ltd. Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: DC magnetic bias current will be caused in transformers when HVDC systems operating in mono-pole situation. The combined influence on DC magnetic bias of 500 kV transformers is researched, taking ± 800 kV Jinbei-Nanjing, Ximeng-Taizhou and Longbin-Xuzhou in northern Jiangsu for example. A comprehensive horizontal multilayer soil model is adopted, considering different soil conditions adjacent to different ground electrodes, based on which the DC system model of northern Jiangsu is built. The DC magnetic bias currents in substations nearby are analyzed when one or more in three HVDC power transmission lines are operated in monopole operation mode. Simulation results show that the greater the soil resistivity, the higher the earth surface potential; when multi HVDC lines are operated in monopole mode simultaneously, the value of DC current is equal to algebraic sum of the DC current of each HVDC line solely operated in monopole mode; the restraining measures of adjacent transformers should be considered comprehensively.

Key words: Northern Jiangsu power grid; HVDC; DC magnetic bias current; restrain measures

(编辑 方晶)