

· 运行分析 ·

±1100 kV 古泉换流站接地极对变压器直流偏磁的影响

刘从法¹, 殷飞², 周楠², 魏德军¹, 梁明¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:文中对±1100 kV 古泉换流站接地极周边变压器及变电站地网进行了直流偏磁影响研究,根据周边交流电网中变压器的直流偏磁电流分布进行分析,建立相应的直流电阻网络耦合模型,并结合变压器直流偏磁的耐受电流限值,提出相应的变压器直流偏磁治理范围及直流偏磁治理方案,为华东地区的接地极选址提供参考。

关键词:接地极电流;变压器;直流偏磁

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)03-0145-06

0 引言

在直流系统中,当直流入地电流或不平衡电流导入大地后,接地点附近电位相对会升高^[1]。当直流电流通过中性点接地的变压器串入交流系统后,过大的直流电流会使变压器发生直流偏磁^[2-3]。直流偏磁会导致变压器励磁电流畸变,偏磁严重时会产生大量谐波,使变压器损耗增加、温度升高、噪声增大等,甚至损坏变压器,危及到电网的安全稳定运行^[4-9]。

文中对古泉换流站接地极周围变压器以及变电站地网进行了研究,对直流单极大地运行在不同土壤模型的情况下,接地极入地电流对周边交流电网中变压器直流偏磁电流分布进行计算分析,并结合变压器直流偏磁的耐受电流限值,提出相应的变压器直流偏磁的治理范围及治理措施。

1 变压器直流偏磁影响计算模型的确立

1.1 计算方法

先获得接地极入地电流产生的地表电位分布,再根据交流线路的长度、线路走向、变电站接地电阻、变压器绕组的直流电阻等参数,计算得到变压器中性点的直流电流大小。直流系统入地电流串入交流系统如图1所示。

根据图1,进入变压器中性点的直流电流可用下式估算:

$$I_{BA} = \frac{V_B - V_A}{R_B + R_A + \frac{R_{TB} + R_{TA} + R_Z}{3}} \quad (1)$$

式中: V_A, V_B 分别为变电站A和变电站B的地表电位; R_A, R_B 分别为变电站A和变电站B的接地电阻;

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-02-12

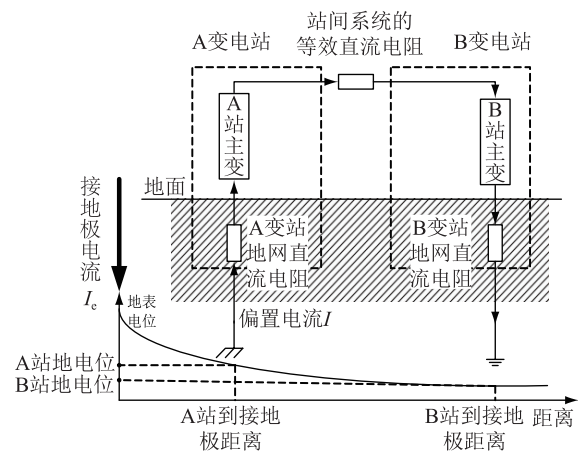


图1 直流入地电流串入交流系统示意

Fig.1 Schematic diagram of DC ground current series into AC system

R_{TA}, R_{TB} 分别为两变电站主变单相绕组直流电阻; R_Z 为两站之间输电线路单相导线直流电阻。

将直流接地极的地中电流场和交流电网的地上电阻网络进行耦合求解,即可建立直流接地极入地电流在周边变压器分布的场路耦合模型,并基于此原理建立广域尺度下直流电流分布计算。

1.2 影响变压器直流偏磁的主要因素

影响直流偏磁电流极值与分布的因素有直流感地极与电网的相对位置、大地电阻率、电网结构域参数和变压器类型等^[10-14]。

1.3 变压器直流偏磁耐受电流

当直流电流经接地极入地时,地中电流一部分经由变压器接地的中性点和交流输电线路流到另一端的变压器,并经该变压器的中性点入地产生直流磁通,使铁心磁化曲线不对称,加剧铁心饱和,导致变压器噪声增大,可引起变压器铁心、螺栓、外壳等处的过热,甚至造成变压器损坏^[15-17]。

依据规定,根据变压器的容量和电压等级,计

算得到 500 kV 变压器三相绕组允许流过的直流电流为 7.79~10.41 A;220 kV 变压器三相绕组允许流过的直流电流为 5.91~9.93 A;110 kV 变压器三相绕组允许流过的直流电流为 3.48~8.82 A^[18-19]。

综上分析,并结合以往工程经验,因古泉换流站接地极地处华东地区,其对直流偏磁治理标准参考溪浙直流工程的治理标准执行。变压器型式分别为 500 kV,220 kV,110 kV 时,其治理标准值分别为 20 A,15 A 和 10 A。

2 实测土壤电阻率模型下的直流偏磁分布

2.1 极址土壤电阻率

根据地中电流场分布的基本原理,极址周边区域的电位分布主要由极址区域浅层的土壤电阻率决定。而远离极址的土壤中电位分布,主要与极址深层和周边大范围的土壤电阻率有关,浅层电阻率对其影响较小。相对于接地极本体尺寸而言,极址周边设施相对较远,属于广域范围的电场分布问题,在计算评估直流接地极入地电流对周边设施影响时,采用深层的土壤电阻率更为合适^[20-21]。

因此,古泉换流站接地极土壤分层采用表 1 所示的土壤模型。

表 1 古泉换流站接地极土壤结构计算模型

Tab.1 Soil structure calculation model of grounding electrode of Guquan converter station

层数	电阻率/m	厚度/m
1	134.8	1 311.8
2	172.7	500
3	116.4	980.8
4	191.1	923.5
5	392.1	1 420.5
6	432.6	2603
7	201.6	3 618.8
8	114.3	5 356.7
9	95	8 946.5
10	238.8	7 639.6
11	439.9	11 098.8
12	333.7	∞

2.2 接地极布置形状

本接地极目前为世界上电压等级最高的接地极,其系统条件为额定电流 5523 A,过负荷电流 5839 A,双极不平衡电流 10 A。

根据系统条件、土壤电阻率以及接地极区域地形条件等限制,古泉换流站接地极采用双环跑道型布置,内、外环直线段为 380 m,内环半径为 180 m,外环半径 215 m。内、外环埋深分别为 3.5 m,4.5 m。

电流通过导流电缆从中心设备区引向极环 4 个端部,再通过配电电缆、引流电缆连接至馈电棒上。

2.3 地电位分布计算

根据表 1 的实测土壤电阻率模型以及入地电流(取 2 h 最大过负荷电流 5839 A),计算得到接地极半径方向的地表电位分布如图 2—图 4 所示。

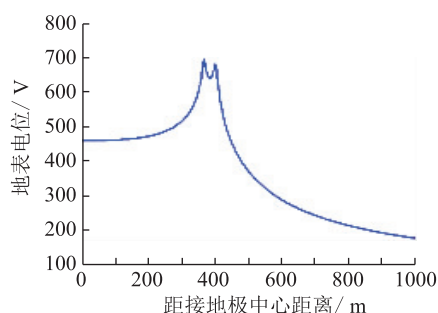


图 2 接地极 0~1000 m 地表电位分布

Fig.2 Ground potential distribution of 0 ~ 1000 m grounding electrode

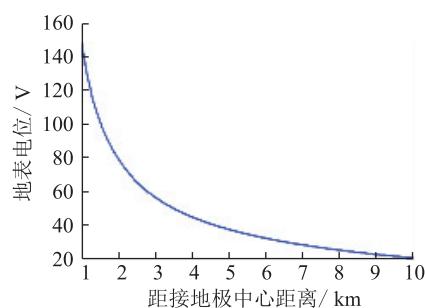


图 3 接地极 1~10 km 地表电位分布

Fig.3 Ground potential distribution of 1 ~ 10 km grounding electrode

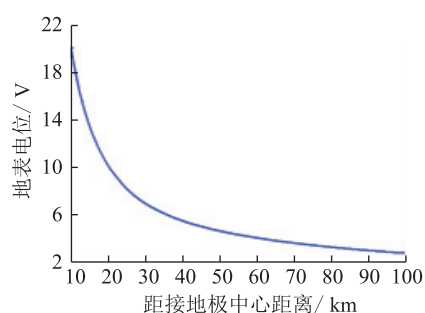


图 4 接地极 10~100 km 地表电位分布

Fig.4 Ground potential distribution of 10 ~ 100 km grounding electrode

评估直流接地极对附近变电站直流偏磁的影响时,计算应考虑的交流电网范围至少应包括地电位升大于 3 V 的区域。由古泉换流站接地极地表电位分布计算结果,在最大过负荷电流 5839 A 下,距离接地极 85 km 处的地表电位降为 3 V。将该接地极周围安徽省境内的宣城、黄山、池州、芜湖、铜陵地区的全部中性点有效接地(即 220 kV 及以上)变

电站、电厂,以及安庆、马鞍山、合肥、六安等地区与之有电气连接的部分中性点有效接地(即 220 kV 及以上)变电站、电厂纳入计算范围之中。接地极附近的交流电网分布如图 5 所示。

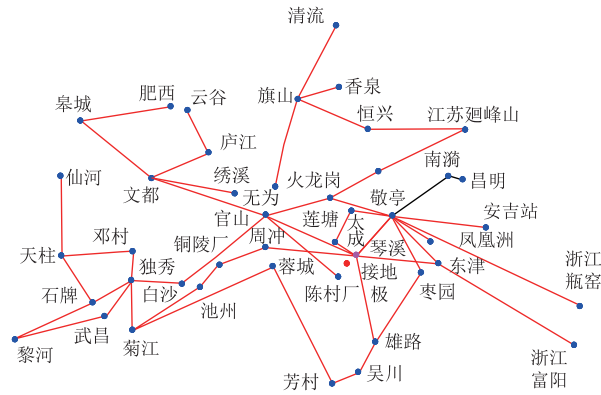


图 5 古泉换流站接地极对附近交流电网影响计算模型
Fig.5 Calculation model of influence of grounding electrode of Guquan converter station on adjacent AC power grid

2.4 直流偏磁电流计算

通过建立古泉换流站接地极对附近交流电网影响计算模型,计算得到各变电站入地总电流如图 6 和图 7 所示。可以看出,距离接地极较近处的中性点总入地电流相对较高,较远处的总入地电流相对较低,但入地电流大小与距离并不直接成正比,还取决于该方向上的线路参数。

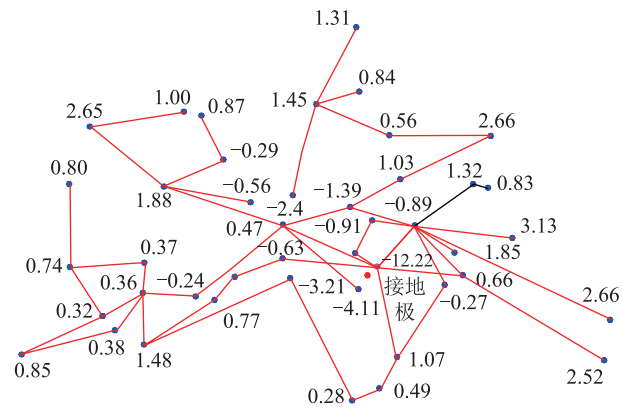


图 6 各站变压器入地总电流
Fig.6 Total current into ground of transformer in each station

由于极址土壤电阻率相对较低,古泉换流站接地极对周边变压器的影响整体较小。该土壤模型下无超标站点。仅 220 kV 琴溪站等效直流偏磁电流为 -12.22 A,接近治理标准。

3 其他对比土壤模型下的直流偏磁分布

3.1 对比土壤模型的选取

实际上由于地质、地形等因素的影响,大地深

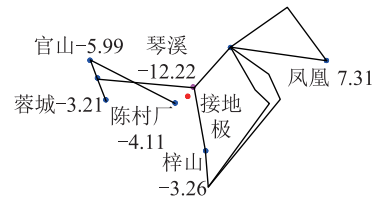


图 7 接地极附近各站变压器入地总电流

Fig.7 Total current into ground of transformer in each station near grounding electrode

层电阻率的分布可能在各向都存在一定的差异性。如果仅考虑古泉换流站接地极极址本身的深层大地电阻率进行直流偏磁的评估,有可能会造成对交流电网影响的预估不足。因此,为提高接地极入地电流对直流偏磁的敏感性,有必要在古泉换流站接地极土壤模型的基础上,改变深层土壤电阻率的分布,加大土壤电阻率倍数。根据以往工程经验,取 3 倍土壤模型和 5 倍土壤模型进行计算。研究其对直流偏磁电流分布的影响程度,对比土壤模型如表 2 所示,为了研究的需要,对土壤模型的定义如下:

(1) 3 倍土壤模型:将表 1 中的土壤模型第 1~6 浅层(约 8 km)的土壤电阻率保持不变,第 7~12 深层的电阻率增大至原来的 3 倍。

(2) 5 倍土壤模型:将表 1 中的土壤模型第 1~6 浅层(约 8 km)的土壤电阻率保持不变,第 7~12 深层的电阻率增大至原来的 5 倍。

表 2 为 3 种土壤模型对比,其中 ρ 为土壤电阻率, h 为地表深度。

表 2 对比土壤模型选取
Tab.2 Selection of contrast soil model

层数	实测土壤电阻率模型		3 倍模型		5 倍模型	
	$\rho / (\Omega \cdot m)$	h / m	$\rho / (\Omega \cdot m)$	h / m	$\rho / (\Omega \cdot m)$	h / m
1	134.8	1 311.8	134.8	1 311.8	134.8	1 311.8
2	172.7	500	172.7	500	172.7	500
3	116.4	980.8	116.4	980.8	116.4	980.8
4	191.1	923.5	191.1	923.5	191.1	923.5
5	392.1	1 420.5	392.1	1 420.5	392.1	1 420.5
6	432.6	2603	432.6	2603	432.6	2603
7	201.6	3 618.8	604.8	3 618.8	1008	3 618.8
8	114.3	5 356.7	342.9	5 356.7	571.5	5 356.7
9	95	8 946.5	285	8 946.5	475	8 946.5
10	238.8	7 639.6	716.4	7 639.6	1194	7 639.6
11	439.9	11 098	1 319.7	11 099	2 199.5	11 098
12	333.7	∞	1 001.1	∞	1 668.5	∞

3.2 3 倍土壤模型下的计算结果

采用表 2 所示的 3 倍土壤模型进行直流偏磁计算,得到各变电站入地总电流如图 8 所示。

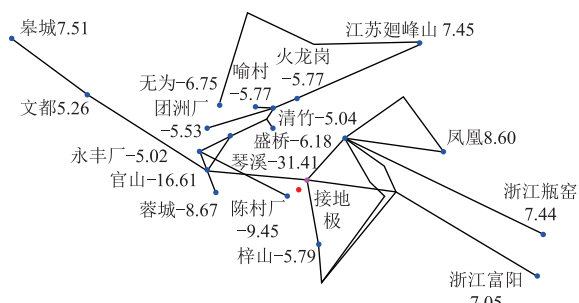


图 8 3 倍土壤模型下的直流偏磁电流分布

Fig.8 Dc bias current distribution under triple soil model

由计算结果可知,相对于实测土壤电阻率模型,3 倍土壤模型下接地极的直流偏磁影响范围和大小显著增加,仅 220 kV 琴溪站超标。

3.3 5 倍土壤模型下的计算结果

采用表 2 所示的 5 倍土壤模型,计算得到各变电站入地总电流如图 9 所示。

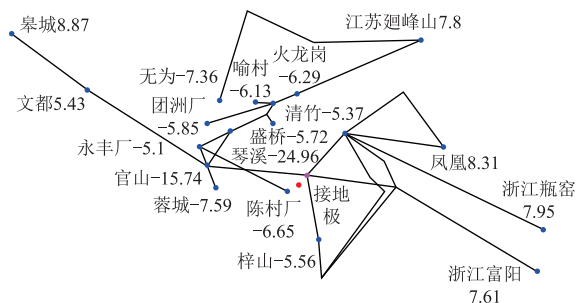


图 9 5 倍土壤模型下的直流偏磁电流分布

Fig.9 Dc bias current distribution under 5 multiple soil model

由计算结果可知,相对实测土壤电阻率模型,在 5 倍土壤模型下,亦仅 220 kV 琴溪站超标。

4 直流偏磁治理方案

直流偏磁的治理方案有串阻限流法、电容隔直法、反向电流注入法、电位补偿法等,目前前两者工程应用相对成熟。鉴于串阻限流法存在残余直流,结合溪浙等工程的治理经验,优先选用隔直治理。

根据上述计算,实测土壤电阻率模型下,无站超标,但 220 kV 琴溪站直流偏磁接近超标。若深层电阻率按实测土壤电阻率模型的 3、5 倍考虑,仅有 220 kV 琴溪站 1 个站超标。因此,对琴溪站采用加装隔直装置进行偏磁治理。

5 结论

通过对古泉换流站接地极对其周边中性点有效接地的变电站、输电线路进行建模,对其变压器直流偏磁电流的分布及其抑制措施开展了计算分析,结论如下:

(1) 在实测土壤电阻率模型下,由于极址深层土壤电阻率较低,古泉换流站接地极对周边变压器的影响整体较小,仅 220 kV 琴溪站等效直流偏磁电流为 -12.22 A,接近治理标准。

(2) 深层土壤电阻率对直流偏磁的影响较大。若深层电阻率按灵敏性更高的 3、5 倍考虑,仅有 220 kV 琴溪站 1 个站超标,可对其采用加装隔直装置的方案来进行偏磁处理。

(3) 由于大地深层电阻率的分布各向存在差异性,横向深层的电阻率的分布也会对计算结果产生影响。

(4) 采用的土壤模型计算结果为工程建设提供了参考,但考虑到土壤模型与实际土壤的差异,直流偏磁电流实际值应以接地极投运后的实测值为准。

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] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technologies [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 王学峰,余小菲,周俊宇. 交直流混合电力系统中交流变压器中性点直流电流的研究[J]. 电网技术,2008,32(12):96-98.
WANG Xuefeng, YU Xiaofei, ZHOU Junyu. Study on the DC current of neutral point of transformer in AC and DC mixed power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12):96-98.
- [4] 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,2006,32(9):117-120.
HUANGFU Cheng, RUAN Jiangjun, ZHANG Yu, et al. DC magnetic bias induced current effects on transformer and restricting methods[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9):117-120.
- [5] 黄道春,魏远航,钟连宏,等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术,2007,31(8):6-12.
HUANG Daochun, WEI Yuanhang, ZHONG Lianhong, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8):6-12.
- [6] 黄莉,孙淑莲. 基于电压偏移量的直流微电网分层控制策略仿真研究[J]. 浙江电力,2016,35(5):7-12.
HUANG Li, SUN Shulian. Simulation of DC microgrid

- hierarchical control strategy based on voltage deviation[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(5): 7-12.
- [7] 吴俊, 方芳, 赵晓明. 柔性直流输电舟洋换流站无源 HVDC 启动试验中典型故障分析[J]. 浙江电力, 2016, 35(1): 6-9.
- WU Jun, FANG Fang, ZHAO Xiaoming. Analysis on typical faults in passive HVDC startup tests in Zhouyang VSC-HVDC converter station[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(1): 6-9.
- [8] 马玉龙, 肖湘宇, 姜旭, 等. 用于抵制大型电力变压器直流偏磁接地电阻优化配置[J]. 电网技术, 2006, 30(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, 30(3): 62-65.
- [9] 张曼, 许文超, 牛涛, 等. 特高压直流对 500 kV 变压器直流偏磁的影响分析[J]. 电机工程技术, 2017, 36(6): 78-83.
- ZHANG Man, XU Wenchao, NIU Tao, et al. Influence of HVDC systems on 500 kV transformer DC magnetic bias[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 78-83.
- [10] 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.
- [11] 李泓志, 崔翔, 卢铁兵, 等. 变压器直流偏磁电路-磁路模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 119-125.
- LI Hongzhi, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Electric circuit and magnetic circuit combined model of DC biased power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 119-125.
- [12] 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 Weiyan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electric Engineering, 2016, 35(2): 39-42.
- [13] 何金良, 张波, 曾嵘, 等. 1000 kV 特高压变电站接地系统的设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 7-12.
- HE Jinliang, ZHANG Bo, ZENG Rong, et al. Grounding system design of 1000 kV ultra-high voltage substation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 7-12.
- [14] 谢成, 金涌涛, 胡叶舟, 等. 基于相关系数分析的配电网单相接地故障研判方法与试验研究[J]. 浙江电力, 2017, 36(3): 17-23.
- XIE Cheng, JIN Yongtao, HU Yezhou, et al. Diagnosis and experimental research on single-phase-to-earth fault of distribution networks based on correlation [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(3): 17-23.
- [15] 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.
- [16] 赵志刚, 刘福贵, 张俊杰, 等. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.
- ZHAO Zhigang, LIU Fugui, ZHANG Junjie, et al. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5224—2014 高压直流输电大地返回系统设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- National Development and Reform Commission. DL/T 5224—2014 Technical rule of the design of HVDC earth return system[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [19] 国家能源局. DL/T 437—2012 高压接地直流极技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 1-14.
- National Energy Administration. DL/T437—2012 technical guide of HVDC earth electrode system[S]. Beijing: China Power Press, 2012: 1-14.
- [20] 刘曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 8-13.
- LIU Qu, LI Licheng, ZHENG Jianchao. DC currents distribution in HVDC systems of monopolar operation with ground return in complex soil structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 8-13.
- [21] 魏敏敏, 曹保江, 任志超, 等. 地形结构及参数对特高压直流地电流散流特性的影响分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 414-420.
- WEI Minmin, CAO Baojiang, REN Zhichao, et al. Influence of terrain structure and parameter on the divergence character of UHVDC grounding current [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 414-420.

作者简介:



刘从法

刘从法(1979—),男,硕士,工程师,从事特高压直接地极、输电线路设计工作(E-mail: lcong@126.com);

殷飞(1990—),男,本科,工程师,从事输电线路建设管理工作;

周楠(1990—),男,本科,工程师,从事输电线路建设管理工作。

Impact on DC Bias Magnetic of the Power Transformers by Grounding Electrode Current of ± 1100 kV Guquan Converter Station

LIU Congfa¹, YIN Fei², ZHOU Nan², WEI Dejun¹, LIANG Ming¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, China; 2. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830002, China)

Abstract: This paper studies the influence of DC bias on transformer and substation grounding grid around the grounding pole of ± 1100 kV Guquan converter station. The DC bias current distribution of transformer in the surrounding AC power grid is analyzed, and the corresponding DC resistance network coupling model is established. At the same time, on the basis of the above research, combined with the withstand current limit of transformer DC bias, the corresponding DC bias control range and DC bias control scheme are proposed, and the reference for the location of grounding electrode in east China is provided.

Key words: grounding electrode current; transformer; DC bias magnetic

(编辑 方 晶)

(上接第 101 页)

Research on Access Engineering Exploration Test System of Power Wireless Private Network Communication Terminal

CAO Jing¹, BIAN Yuxiang², FENG Bao², LI Cheng¹, DING Shichang¹, TAN Jun¹, ZHU Xuanpei³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Information Communication Branch, Nanjing 210024, China;
2. NARI Group Co., Ltd. Information and Communication Technology Branch, Nanjing 210003, China;
3. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: At present, the power wireless private network communication terminal access to the engineering exploration process usually adopts manual recording and camera recording methods to record the data of the engineering exploration, which leads to the difficulty of data sorting and high error rate in the future. In order to improve the processing efficiency of engineering exploration data, taking the construction of Jiangsu power wireless network as an example, this paper analyzes the characteristics of power service demand, expounds the present situation of power wireless network construction and terminal access engineering exploration, designs the comprehensive and practical testing system of engineering exploration, develops the corresponding "YiGongKan" APP software and the back-stage data management system. APP software can upload the engineering exploration data remotely, and the back-stage data management system can modify and delete the engineering exploration data. The APP software and the back-stage data management system truly realize the no-paper process engineering exploration process, accelerating the informatization construction of engineering exploration.

Key words: power wireless private network; terminal access engineering exploration; index system; APP

(编辑 方 晶)

(上接第 133 页)

A Calculating Method for Loss and Junction Temperature of IGBT Based on MMC

YIN Guanxian, ZHU Minglian, XIE Yeyuan, JIANG Tiangu

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The electrical stress of high voltage and high current is the characteristics of the sub module base on MMC. And IGBT is the key component of MMC module. A calculating method for loss and junction temperature of IGBT base on MMC is very important to the heat design and type selection of IGBT in MMC engineering application. Firstly, the stress of the module under steady state operation of MMC is analyzed. Secondly, a method for calculating the IGBT loss and junction temperature of MMC module is given with current and sub module switching and junction temperature estimation model. Finally, the calculation method is verified in the back to back test system. The proposed method is proved to be effective and feasible.

Key words: UPFC; MMC; loss; junction temperature

(编辑 杨卫星)