

# 高压直流接地极单极运行对变压器脉动冲击

周加斌<sup>1</sup>, 陈玉峰<sup>1</sup>, 顾朝亮<sup>1</sup>, 雍军<sup>1</sup>, 赵文彬<sup>2</sup>, 姜朋亮<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003;

2. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 讨论了直流接地极双极转单极大方式运行时, 偏磁电流对近区变压器励磁特性的影响。基于场路耦合原理建立了变压器直流偏磁联合仿真模型, 分析了接地极单极大方式运行对交流电网以及变压器励磁特性的作用机理。通过仿真模型分析, 结果表明: 直流接地极双极转单极大方式运行时, 流过交流电网的偏磁电流为随时间变化的脉动型直流电流, 其侵入变压器绕组造成了励磁电流也发生脉动变化, 随着脉动直流幅值的增加, 变压器励磁电流峰-谷间差值也逐渐增大。在直流接地极运行方式调整时, 建立的仿真模型可以对交流电网直流偏磁水平监测和变压器励磁特性评估提供一定依据。

**关键词:** 接地极; 变压器; 励磁特性; 直流偏磁; 脉动直流

**中图分类号:** TM89 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22620

## Pulsation Impact of HVDC Ground Pole Monopole Operation on Transformer

ZHOU Jiabin<sup>1</sup>, CHEN Yufeng<sup>1</sup>, GU Zhaoliang<sup>1</sup>, YONG Jun<sup>1</sup>, ZHAO Wenbin<sup>2</sup>, JIANG Pengliang<sup>2</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, Shandong, China;

2. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of

Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The influence of magnetic bias current on the excitation characteristics of near-field transformers in the DC grounding electrode from bipolar to unipolar earth mode was discussed. Based on the principle of field-circuit coupling, the DC magnetic bias co-simulation model of transformer was established and analyzed the action mechanism of grounding electrode unipolar earth mode on AC power network and transformer excitation characteristics. Through analysis of the simulation model, the results show that when the DC grounding pole from bipolar to unipolar earth mode, magnetic bias current flowing through the AC power grid is pulsating DC current that varies with time, its intrusion into transformer winding causes the excitation current of transformer winding fluctuation change, with the increase of pulse DC amplitude, between transformer excitation current peak and valley difference also gradually increased. When the operation mode of DC grounding electrode is adjusted, the simulation model can provide certain basis for the level monitoring of AC power network DC magnetic bias level and the evaluation of transformer excitation characteristics.

**Key words:** grounding electrode; transformer; excitation characteristic; DC bias; pulsating DC

我国现已建成多条高压和特高压直流输电工程, 直流输电系统通常是双极运行方式, 此运行状态下, 高压直流输电是由两条线路构成回路, 所以双极是平衡运行, 接地极没有电流流入。但是当直流输电工程投运调试或故障期间, 将以单极大方式运行, 即双极转单极运行方式。直流电流通过接地极流入大地, 以大地作为直流输

电的另一根导线形成回路电流, 此时在交流系统中会存在电位差, 高达几 kA 的直流电流通过接地极流入大地, 导致直流电流侵入交流系统, 使得变压器绕组出现直流分量, 导致直流偏磁现象发生, 产生变压器的振动噪声增加和局部过热等问题, 严重威胁交流电网运行的安全性<sup>[1-4]</sup>。

直流偏磁条件下的变压器运行在一种非正

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(52062618001F)

作者简介: 周加斌(1986—), 男, 博士, 高级工程师, Email: 254189763@qq.com

通讯作者: 赵文彬(1977—), 男, 博士, 教授, Email: wenbinmax@163.com

常工作状态,对于直流偏磁对交流电网变压器励磁特性的影响,国内外学者进行了广泛的研究与分析。目前对于交流电网的偏磁电流计算主要分为两种:电路法<sup>[3]</sup>和有限元法<sup>[5]</sup>。其中电路法是将地上交流网架与地下土壤模型相结合,建立一直流偏磁模型进行偏磁电流分析,而土壤结构的精确建模对于偏磁电流大小影响至关重要<sup>[6-8]</sup>。目前主要从接地极选址、变电站选址和流通性分析等方面<sup>[9-12]</sup>,对未建变电站的直流偏磁进行预防;对于已建变电站直流偏磁问题主要是通过装设直流抑制装置进行抑制<sup>[13-14]</sup>。变压器直流偏磁问题是变压器绕组中的直流分量产生直流磁通,由于直流磁通的偏置特性,导致主磁通偏置,进而引发一系列电磁反应<sup>[15-16]</sup>。通过梳理近期研究,发现流入变压器中性点的直流偏磁电流为随时间变化且含有低频交流分量的脉动直流<sup>[17]</sup>。

综上所述,目前关于直流偏磁问题研究中的土壤精确建模、评估准确性和优化抑制方案等均是围绕幅值不变的稳恒偏磁电流展开,而脉动直流对变压器励磁特性影响的研究甚少。因此本文在直流输电工程双极转单极运行方式时,通过交流电网直流偏磁模型和变压器模型,建立了变压器直流偏磁联合仿真模型,分析了脉动直流对变压器励磁特性的影响规律。

## 1 直流偏磁联合仿真模型机理

### 1.1 接地极的影响机理

直流输电工程以单极大地方式运行时,直流输电系统通过接地极向大地注入直流电流,以接地极为中心会形成一个电位场。由于变电站位置不同,两站之间存在直流电位差,直流电流会通过变压器接地中性点流入交流系统。直流偏磁现象导致了变压器磁路出现饱和。变压器铁心为非线性铁磁材料,直流磁通与交流磁通的叠加使变压器总磁通向一侧偏移,当变压器工作点由线性区域转移到非线性区域时,会造成励磁电流的严重畸变。交流网架模型由地上网架部分与地下土壤部分两部分构成,对于 $m$ 个变电站, $b$ 个独立的接地中性点,则有<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{R}_b \mathbf{I}_b = \mathbf{B}^T \mathbf{U}_m \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_m = -\mathbf{B}^T \mathbf{I}_b \quad (2)$$

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

$$\mathbf{I}_m = -\mathbf{B}^T \mathbf{G}_b \mathbf{B} \mathbf{U}_m \quad (4)$$

式中: $\mathbf{U}_m, \mathbf{I}_m$ 分别为主变中性点直流电位、偏磁电流的列向量; $\mathbf{U}_b, \mathbf{I}_b$ 和 $\mathbf{R}_b$ 分别为各变电站相连支路的支路电压、支路直流和支路电阻的列向量; $\mathbf{G}_b$ 为支路导纳矩阵; $\mathbf{B}$ 为 $n \times m$ 的关联矩阵。

土壤模型为多层结构,如图1所示。 $h_i, \rho_i$ 分别为对应层的厚度和土壤的电阻率, $i=1, 2, 3$ ;g为直接地极。假设地表电位为 $V$ ,接地极g的入地电流为 $I_0$ 。

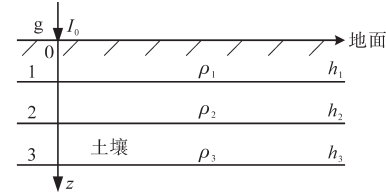


图1 多层土壤模型

Fig.1 Multi-layer soil model

地表电位分布的求解问题是求解水平多层土壤模型的格林函数,则地表电位函数为

$$V = \frac{\rho_i I_0}{4\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda z - h_0} + A_i(\lambda) e^{-\lambda z} + B_i(\lambda) e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (5)$$

式中: $J_0(\lambda r)$ 为第一类零阶贝塞尔函数; $A_i(\lambda), B_i(\lambda)$ 为地表电位函数解的系数,由边界条件确定; $\lambda$ 为接地电极的半径。

当 $z$ 趋近于无穷时,距离接地极 $r$ 处的地表电位为零,即

$$V(r, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (6)$$

当在土壤分界面处的电位相等时,满足:

$$\begin{cases} V_i(r, h_i) = V_{i+1}(r, h_i) \\ \left. \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial V_i(r, z)}{\partial z} \right|_{z=h_i} = \left. \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{\partial V_{i+1}(r, z)}{\partial z} \right|_{z=h_i} \end{cases} \quad (7)$$

在实际接地工程中,关心的是地表电位,因此最终化简为

$$V_1 = \frac{I_0 \rho_1}{2\sqrt{r^2 + z^2}} \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 + (2ih_i + z)^2}} \right] \quad (8)$$

则对于整个网架模型,在已知网架拓扑结构的情况下,可得下式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_M & \mathbf{R}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m \\ \mathbf{I}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{U}_m \quad (9)$$

式中: $\mathbf{R}_M$ 为变电站之间的互阻矩阵; $\mathbf{R}_N$ 为变电站与接地极之间的互阻矩阵。

将式(8)、式(9)联立,对变电站地表电位及直流偏磁电流进行分析。

### 1.2 变压器直流偏磁机理

根据 Maxwell 方程,得到变压器内部非线性磁场方程:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \times A = J_{DC} + J_{AC} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (10)$$

式中: $\mu$ 为导磁材料的磁导率; $A$ 为矢量磁位, $\text{Wb/m}^2$ ; $J_{DC}$ 为直流电流密度; $J_{AC}$ 为交流电流密度。

电路模型是通过漏感、直流电阻、磁阻等参数构成外电路的拓扑结构,用以描述变压器的电气结构。因此得到电压  $U_a$  瞬态微分方程为

$$U_a = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha) = r_0 i_1 + L_d \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (11)$$

式中: $\alpha$ 为合闸时初相角; $N_1$ 为绕组匝数; $r_0, i_1$ 分别为绕组的电阻与励磁电流; $L_d$ 为绕组漏感; $\phi_1$ 为主柱磁通。

对式(11)进行求解,可得直流偏磁条件下磁通随时间变化关系,如下式所示:

$$\phi_1 = -\phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \phi_m \cos \alpha e^{\left(\frac{-r_0}{L_d} t\right)} + \phi_{DC} \quad (12)$$

式中: $\phi_m$ 为主柱交流最大磁通; $\phi_{DC}$ 为直流磁通量。

通过铁磁材料的磁化曲线参数,便可得到直流偏磁条件下变压器的励磁电流为

$$i_1 = f(\phi_1) \quad (13)$$

式中: $f$ 为变压器主磁通与励磁电流的映射关系。

## 2 直流偏磁联合仿真模型

### 2.1 接地极近区交流网架模型

为分析直流输电工程单极大地方式运行时,交流网架的直流偏磁影响水平,本文采用 CDEGS 接地计算软件建立近区交流网架模型,电网拓扑结构如图 2 所示。选取接地极周边 7 座变电站,其中,3 座 500 kV 站,4 座 200 kV 站,对站内的主变、地网、站间线路及土壤进行精确建模,并进行各变电站偏磁电流的分析。相关参数如表 1~表 3 所示。

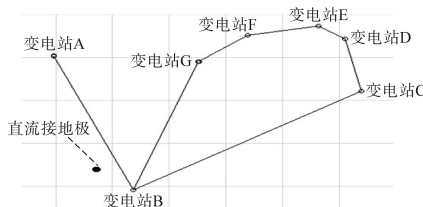


图2 电网拓扑结构

Fig.2 Network topology of power grid

表1 土壤模型参数

Tab.1 Soil model parameters

层数	$\rho/(\Omega \cdot m)$	$h/m$
1	50	350
2	300	10 000
3	10 000	10 000
4	100	$\infty$

表2 线路参数

Tab.2 Line parameters

线路	出线	$L/km$	导线型号
A—B	2	68.6	4×LGJ-630/45
B—C	2	92.5	4×LGJ-630/45
C—D	2	25.1	4×LGJ-630/45
D—E	2	11.1	2×LGJ-400/35
E—F	2	25.3	2×LGJ-400/35
F—G	2	21.4	2×LGJ-400/35
G—B	2	64.0	2×LGJ-400/35

表3 变压器参数

Tab.3 Transformer parameters

站点	台数	电压等级/kV	等效电阻
A	2	500	0.098
B	2	500	0.062
C	2	500	0.065
D	1	220	0.179
E	2	220	0.154
F	2	220	0.283
G	1	220	0.087

### 2.2 变压器直流偏磁模型建立

目前,直流偏磁问题所引起变压器的一系列电磁效应和直流承受能力尚未被系统地研究分析。因此,研究由脉动直流电流引起的直流偏磁对变压器励磁、振动和噪声特性的影响是十分必要的,其中脉动直流侵入条件下的变压器励磁特性变化规律尤为重要。因此,本文利用电磁仿真软件 PSCAD 搭建变压器仿真模型,模型电路图如图 3 所示<sup>[19-20]</sup>,变压器内部参数如下:变压器容量  $24 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,初级绕组额定电压 458 V,次级绕组额定电压 230 V,长度比率 2.0%,空载电流 3%,泄漏阻抗 0.17,绕组损坏 0.1,面积比率 1%。

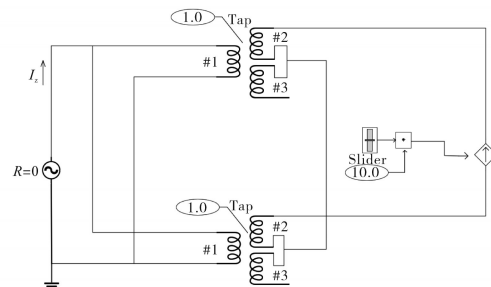


图3 模型接线图

Fig.3 Connecting diagram of model

在以往变压器直流偏磁问题研究中,均考虑偏磁电流为稳恒直流时变压器励磁特性变化,并没有考虑到脉动直流对变压器励磁特性的影响。利用本文建立的变压器直流偏磁模型,对脉动直流下的变压器励磁特性变化规律进行分析,可以更精确地模拟变压器的实际工作状态。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 直流偏磁电流仿真结果分析

直流输电工程投运测试期间,直接地极多次采用单极大地回线运行方式,入地电流为1 090 A。受测试影响,变压器中性点有直流电流流入,变压器的振动、噪声有所加剧,为此利用本模型搭建了接地极周边220 kV及以上站点的网架拓扑结构,计算各变电站直流偏磁电流,结果如表4所示。从表中可以看出,直流输电工程以单极大地方式运行时,变压器绕组中出现直流偏磁电流,其大小与变电站电压等级和地理位置相关,其中电压等级为500 kV的变电站B所受影响最为严重。

表4 各变电站直流

Tab.4 DC bias current of each substation

站点	电压等级/kV	偏磁电流/A
A	500	1.010
B	500	4.590
C	500	0.979
D	220	1.180
E	220	1.140
F	220	0.877
G	220	0.840

进一步分析发现,当直流输电工程双极转单极大地运行方式时,直接地极近区地表电位的变化如图4所示,接地极附近的地表电位呈现一

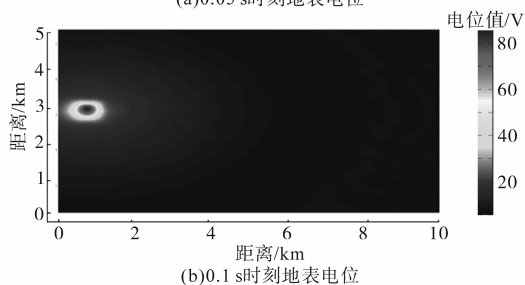
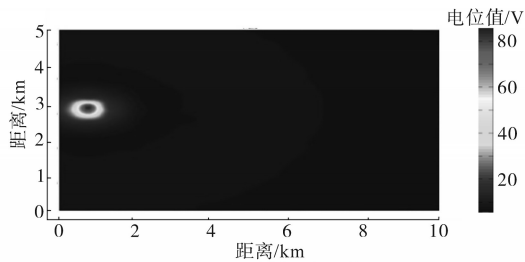


图4 地表电位变化

Fig.4 Surface potential changes

种波动变化,地表电位的变化与离接地极距离有关,越靠近接地极,地表电位波动越大。选取算例中的变电站A和变电站B进行变压器偏磁电流分析,流入变压器的直流电流如图5所示,由图可知,直流输电工程双极方式转单极方式运行时,交流电网变压器绕组中的偏磁电流为随时间变化的脉动直流,从直流测量的角度看,该脉动直流仍为直流电流。

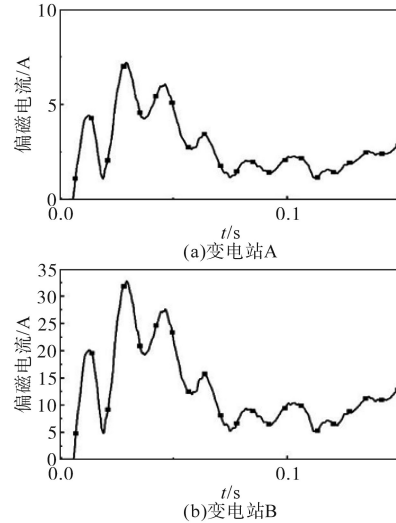


图5 偏磁电流波形图

Fig.5 Waveforms of magnetic bias current

#### 3.2 变压器励磁特性分析

在无直流偏磁时,得到的变压器的励磁电流仿真值为1.45 A,与额定值1.5 A的误差小于5%,满足误差范围,验证了本文变压器直流偏磁仿真模型具有较高的准确性。

为研究脉动电流对变压器励磁特性的影响规律,在本文仿真模型的基础之上,通过在原边将低频交流电流源和直流电流源并联模拟流入变压器绕组中的偏磁电流。本文设置低频交流电流源频率为10 Hz,幅值分别为0.5 A,1 A和2 A,直流电流源幅值为5 A,仿真得到的变压器励磁电流如图6所示。

直流电流越大,变压器铁磁材料越趋于饱和。直流电流细微的变化都会使励磁电流发生更严重的畸变,脉动电流侵入变压器绕组导致变压器励磁电流波形波动,不同幅值脉动电流下的变压器励磁电流峰-谷差值,如图7所示。随着脉动电流幅值的增加,励磁电流峰值与谷值的差值在增加,由此本文认为,脉动直流电流使得变压器铁磁材料工作点反复变化,导致励磁电流波形发生波动,脉动电流幅值越大,励磁电流波形波

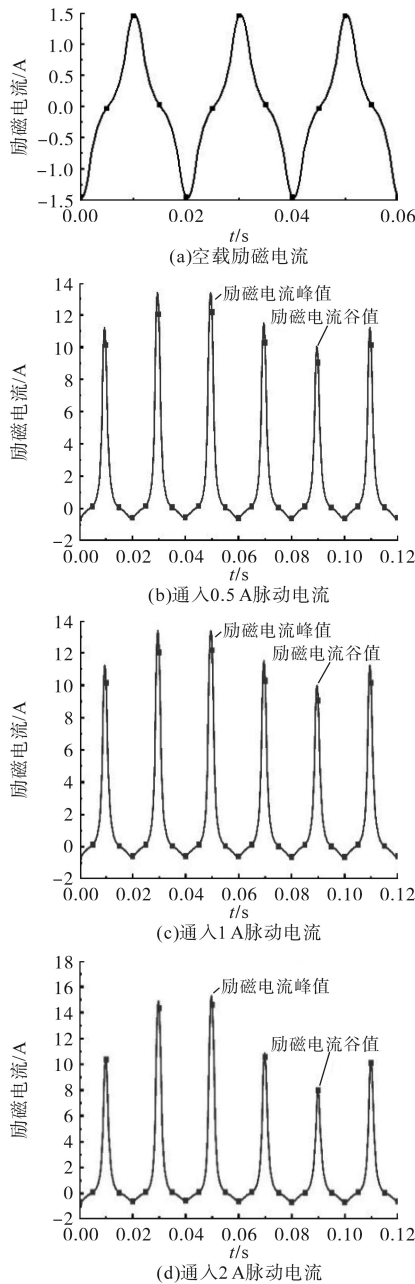


图6 不同工况下的励磁电流

Fig.6 Excitation currents at different working conditions

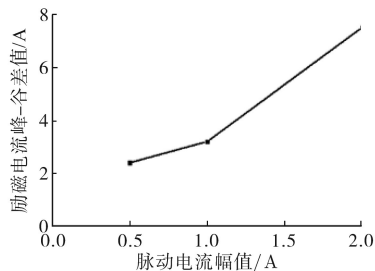


图7 励磁电流-峰谷差值曲线

Fig.7 Peak-valley difference curve of excitation current

动越大。这会导致振动模式异常,当变压器长期处于异常振动模式下,可能会加剧噪声,使得铁心绕组和紧构件的松动、加速绝缘材料的机械老

化,不利于变压器的安全稳定运行,本文为后续研究实际偏磁电流对变压器绕组振动、本体噪声及绝缘材料老化的特性,提供了一定依据<sup>[21]</sup>。

## 4 结论

搭建了变压器直流偏磁联合仿真模型,通过仿真验证了模型的准确性,证明了在直流输电工程双极方式转单极方式运行时,侵入变压器绕组中的偏磁电流为一随时间变化的脉动直流。

直流偏磁对变压器励磁特性的影响要以励磁电流峰值为依据,而不能简单地以通入的直流电流幅值为依据,为后续进一步研究不同频率、振幅下的变压器振动噪声提供了一定的依据。

## 参考文献

- [1] 董霞. 变压器直流偏磁研究[D]. 济南:山东大学,2013.  
Dong Xia. Research on DC magnetic bias of transformer[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [2] 居静瑶. 特高压直流输电工程直流偏磁对电网的影响及治理措施研究[D]. 南京:东南大学,2016.  
Ju Jingyao. Study on the influence of DC bias on power grid and its treatment measures of UHVDC transmission project[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [3] 文习山,郭婷婷,何智强,等. 直流偏磁相关问题研究综述[J]. 高压电器,2016,52(6):1-8.  
Wen Xishan, Guo Tingting, He Zhiqiang, et al. A review of relevant studies on DC magnetic bias[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2016, 52(6): 1-8.
- [4] 沈浩. 直流大地回线运行引起变压器偏磁的影响因素及治理方法研究[D]. 上海:上海电力学院,2017.  
Shen Hao. Research on influencing factors and treatment methods of transformer magnetic bias caused by DC earth loop operation [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2017.
- [5] 马成廉,王乐天,李波等. 基于ANSYS的陕北换流站直流接地极地电位分布计算[J]. 中国电力,2018,51(5):52-60.  
Ma Chenglian, Wang Letian, Li Bo, et al. Calculation of DC grounding polar potential distribution of the converter station in northern shaanxi based on ANSYS[J]. China Electric Power, 2018, 51(5): 52-60.
- [6] 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. Influence of soil structure near the earthing pole of UHVDC transmission on DC bias of transformer[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(7): 26-32.
- [7] 王晓希,阮玲,文习山,等. 基于深层大地电阻率的直流偏磁电流特征分析[J]. 高电压技术,2015,41(5):1536-1543.  
Wang Xiaoxi, Ruan Ling, Wen Xishan, et al. DC magnetic bias

- current characteristics analysis based on deep earth resistivity [J]. *High Voltage Technology*, 2015, 41(5): 1536–1543.
- [8] 刘连光,姜克如,李洋. 直接地极近区三维大地电阻率模型建立方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6): 1622–1630. Liu Lianguang, Jiang Keru, Li Yang, *et al.* Three-dimensional earth resistivity structure modeling around DC ground electrode [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(6): 1622–1630.
- [9] 刘连光,马成廉. 一种考虑接地极选址及受端电网结构的偏磁电流减小方法[J]. *中国电力*, 2021, 54(7): 100–108. Liu Lianguang, Ma Chenglian. A DC bias current reducing method considering grounding electrode location and receiving-end grid structure[J]. *China Power*, 2021, 54(7): 100–108.
- [10] 孙冰,于永军,祁晓笑,等. 基于网络连通性分析的直流偏磁分布关键站点评估[J]. *高电压技术*, 2020, 46(3): 979–986. Sun Bing, Yu Yongjun, Qi Xiaoxiao, *et al.* Key site evaluation of DC magnetic bias distribution based on network connectivity analysis[J]. *High Voltage Technology*, 2020, 46(3): 979–986.
- [11] 徐碧川,文习山,张露,等. 交流电网主动防御直流偏磁体系[J]. *中国电力*, 2016, 49(2): 90–95, 101. Xu Bichuan, Wen Xishan, Zhang Lu, *et al.* Active defense of DC magnetic bias system for AC power grid[J]. *China Power*, 2016, 49(2): 90–95, 101.
- [12] 马书民,戎子睿,林湘宁,等. 抑制直流偏磁的直接地极综合优选策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(24): 8039–8049. Ma Shumin, Rong Zirui, Lin Xiangning, *et al.* Study on the site optimization of DC grounding pole to depress the effect of DC bias[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2020, 40(24): 8039–8049.
- [13] 刘宏伟. 基于场路耦合模型与改进差分进化算法的电容隔直装置多目标优化配置[J]. *中国电力*, 2020, 53(8): 100–106. Liu Hongwei. Multi-objective optimization configuration of capacitor blocking devices based on field-circuit coupled model and improved differential evolution algorithm[J]. *China Power*, 2020, 53(8): 100–106.
- [14] 王婷,张侃君,文博,等. 大型变压器中性点串接抑制直流电流电容后对继电保护影响分析[J]. *中国电力*, 2017, 50(7): 164–168, 174. Wang Ting, Zhang Kanjun, Wen Bo, *et al.* Analysis of influence on relay protection after serial connection of neutral point of large transformer to restrain DC current capacitance[J]. *China Power*, 2017, 50(7): 164–168, 174.
- [15] 李冰,王泽忠,刘恪,等. 特高压变压器直流偏磁对绕组电流的影响[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(7): 1422–1431. Li Bing, Wang Zezhong, Liu Ke, *et al.* Research on winding current of UHV transformer under DC-bias[J]. *Journal of Electro-technics and Technology*, 2020, 35(7): 1422–1431.
- [16] 侯永亮. 高压直流输电过程中变压器直流偏磁现象的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2007. Hou Yongliang. Study on DC magnetic bias of transformers in HVDC transmission[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [17] 师混夏,吴邦,靳宇晖,等. 直流偏磁对变压器影响研究综述[J]. *高压电器*, 2018, 54(7): 20–36, 43. Shi Minxia, Wu Bang, Jin Yuhui, *et al.* Review on the influence of DC magnetic bias on transformers[J]. *High Voltage Electrical Appliances*, 2018, 54(7): 20–36, 43.
- [18] 邹国平,姚晖,何文林,等. 溪洛渡—浙西±800 kV特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理[J]. *高电压技术*, 2016, 42(2): 543–550. Zou Guoping, Yao Hui, He Wenlin, *et al.* DC bias suppression of receiving-end power grid in ±800 kV Xiluodu—Zhexi UHVDC project [J]. *High Voltage Technology*, 2016, 42(2): 543–550.
- [19] 李慧奇,胡阳,李晓龙. 基于仿真与实验的变压器负荷侧直流偏磁特性研究[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(21): 17–22. Li Huiqi, Hu Yang, Li Xiaolong. Research on DC magnetic bias characteristics of transformer load side based on simulation and experiment[J]. *Electric Measurement and Instrumentation*, 2015, 52(21): 17–22.
- [20] 李慧奇,李晓孟,李金忠,等. 计及铁心损耗和磁滞效应改进的变压器模型[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(21): 196–202. Li Huiqi, Li Xiaomeng, Li Jinzhong, *et al.* Transformer model with improved core loss and hysteresis effect[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2016, 31(21): 196–202.
- [21] 杨晓辉,王丰华,段若晨,等. 500 kV电力变压器直流偏磁耐受性能的仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(14): 60–66. Yang Xiaohui, Wang Fenghua, Duan Ruochen, *et al.* Simulation study on DC magnetic bias tolerance of 500 kV power transformers[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(14): 60–66.

收稿日期:2020-11-02

修改稿日期:2020-12-08