

DOI: 10.7667/PSPC160776

## 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究

曹楠<sup>1,2</sup>, 王天正<sup>3</sup>, 王冬青<sup>1,2</sup>, 赵宇<sup>4</sup>

(1. 南京南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211000; 2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200;  
3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001; 4. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 提出了一种利用多指标综合评价方法配置直流偏磁治理设备的优化方法。通过对变压器直流偏磁的产生机理及其影响因素的分析, 利用多指标综合评价方法建立满意优化计算模型。计算各变电站在直流偏磁影响下运行状态的满意度及其需要进行直流偏磁治理的紧迫程度, 采用迭代方法提取需要进行直流偏磁治理的最小变电站点集合。最后利用具体算例说明优化方法的使用效果。优化方法的使用可改善直流偏磁设备配置的合理性, 扩大单台直流电流抑制设备的直流偏磁治理面积, 提高了设备利用率, 降低了直流偏磁治理的设备投入。

**关键词:** 直流偏磁治理; 满意优化模型; 效用最优化; 效果评估; 满意度

### Study on configuration optimization method of transformer magnetic bias treatment

CAO Nan<sup>1,2</sup>, WANG Tianzheng<sup>3</sup>, WANG Dongqing<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu<sup>4</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China; 2. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 4. Beijing SmartChip Microelectronics Technology Company Limited, Beijing 102200, China)

**Abstract:** Configuration optimization method of transformer magnetic bias treatment is proposed on the basis of multi-index comprehensive evaluation. First, based on the analysis of the mechanism of transformer magnetic bias and its influence factors, this paper constructs a satisfactory optimization model. Followed, satisfaction degree and urgency of each substation influenced on transformer magnetic bias is calculated. Then the minimal set of substations that need to be treatment is selected by iterative algorithm. Finally, an example is given and the application effect of configuration optimization method is also summarized. With the applying of the configuration optimization method, the treatment devices of transformer magnetic bias can be rational distribution, and the control area by single treatment device can be extended. Moreover, equipment utilization can be improved and the investment of treatment device can be reduced.

**Key words:** DC bias treatment; satisfactory optimization model; utility optimization; effect evaluation; satisfaction degree

## 0 引言

随着中国高压直流输电的迅速发展, 由直流输电单极运行方式导致的交流系统变压器直流偏磁问题也越来越严重。变压器直流偏磁会导致变压器温度升高、振动和噪声增加, 引发励磁电流畸变, 增加系统谐波含量, 不但会影响变压器的使用寿命, 而且可能危及整个电网的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。

现有的直流输电系统仅在系统调试、检修或发

生故障时才会转入单极大地运行方式, 运行持续时间有限, 而变压器本身在运行状态对直流偏磁也具有一定的耐受能力。目前对直流输电单极-大地运行方式导致的交流系统变压器直流偏磁问题的研究, 主要集中在直流输电接地极电流场和电位分布仿真、变压器直流偏磁发生以后的运行特性以及变压器抑制直流偏磁方法的研究<sup>[3-6]</sup>, 而对直流单极-大地运行方式下需要进行直流偏磁治理的站点选择方法以及直流偏磁治理效果评估方法鲜有研究。在工程现场的实际应用中, 抑制直流偏磁设备的配置大多采用边安装边测试边整改的方案进行, 并未考虑抑制直流偏磁设备接入电网后对交流系统直流分布情况的改变对交流系统运行和交流设备的影响。

**基金项目:** 山西电力公司 2015 科技项目“直流特高压线路单极运行时在山西地质特点情况下对交流变电设备安全稳定运行的影响研究”

本文基于现有交流变压器直流偏磁特性研究成果,结合直流输电接地极电流场仿真计算方法,利用多指标综合评价方法建立直流偏磁治理满意优化计算模型;结合效用最大化原理给出一种对接地极范围内变压器直流偏磁治理站点的优化选取方法,并对直流偏磁治理效果进行评估;在保证电力系统安全稳定运行的前提下,达到合理配置抑制直流偏磁治理设备的目标,减少不必要的设备和人力投入。

## 1 直流偏磁产生原因及影响因素分析

直流偏磁是变压器的一种非正常运行工作状态,是指变压器励磁电流中出现了直流分量,该分量通过变压器经过电磁转换从而影响整个交流系统的运行。当直流输电线路以单极-大地运行方式与交流输电线路的并行运行时,大电流通过接地极注入大地,引起周边地表电位的改变,从而在交流变压器中产生直流偏磁。交流系统变压器中的直流偏磁大小与直流输电线路的负荷大小正相关,持续时间也与其单极运行时间同步。

变压器在直流偏磁时的磁化曲线如图 1 所示<sup>[7]</sup>。当其中性点侵入直流电流时,直流电流将与原有交流励磁电流共同作用于变压器磁通,此时变压器工作磁通并不等于原有交流磁通与直流电流单独励磁时对应的磁通之和,而是由励磁电流受直流电流影响产生畸变后形成的电流平均值决定的。当交直流电流同时作用于变压器铁心时,如铁心的磁通密度位于磁化曲线的未饱和区,励磁电流不会发生畸变,如图 1(a)所示;否则,如图 1(b),励磁电流将发生畸变,影响交流电网安全稳定运行。

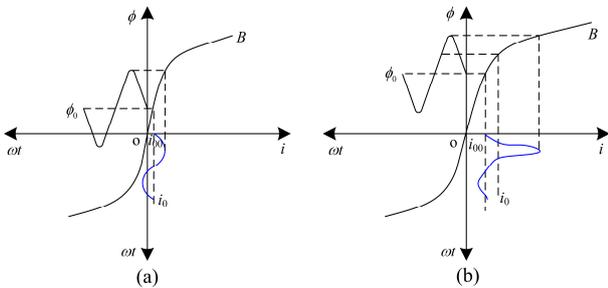


图 1 直流偏磁时的磁化曲线

Fig. 1 Magnetization curve of DC bias

交流变压器在设计时均具有一定承受直流偏置的能力<sup>[8-9]</sup>。在变压器运行过程中,其对直流偏磁的承受能力不仅与变压器结构、容量、铁心参数、铁心材料性能、铁心叠片缝隙以及负载程度等多种因素有关,而且还与交流系统的运行工况有关。因

此,评估直流偏磁所造成的影响时,应综合考虑变压器自身因素和系统运行工况,其评估指标选择应按如下原则进行<sup>[8-10]</sup>。

- 1) 电网总电压电流的畸变标准:按照电网所能允许电压、电流畸变标准考虑。
- 2) 变压器绕组和铁心的发热限制:以变压器额定运行时的绕组温升以及油面温升为基准,判定变压器能否安全运行。
- 3) 振动及噪声需满足运行和环境要求:满足变压器规范中对变压器振动及噪声水平的要求。
- 4) 直流偏磁引起的无功要求应不超过相应的行业标准。
- 5) 直流偏磁引起的电压电流变化不影响继电保护动作。

## 2 满意优化模型

针对接地极附近指定范围内的交流变电站站点,利用效用最优化理论建立满意优化计算模型为<sup>[11]</sup>

$$\text{find: sat}_{i \in I} \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} \max Sw & Sw \in [0, 1] \\ Sw = \left( \prod_{i=1}^n S_i \right)^{\frac{1}{n}} \\ S_i = F(q) & q \in [0, 1]^n \\ q = \varphi(x) & x \in X \subseteq R^n \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $X$  为可供优化选择的性能参数指标值集,  $X = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_i \in R, i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $x$  为一组可供优化选择的性能参数值,对于变电站  $i$  来说  $x^{(i)} = [x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_m^{(i)}]$ 。性能参数满意度向量为  $q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ ,  $q_k = \varphi_k(x_k)$  为第  $k$  个性能指标关于所选站点的满意度,可通过构造满意度函数计算;  $S_i$  为变电站运行状况满意度值,反映了该站点在直流偏磁影响下各项运行指标的综合满意度;  $Sw$  反映了所选区域内电网运行整体效果的整体满意度,可由每个站点的综合满意度计算值通过几何平均法求得,同一区域内整体满意度值越高说明治理效果越好。

在上述模型中,性能参数满意度的求取需要通过构造满意度函数来实现,用于求得在直流偏磁影响下各性能参数的满意度。用于直流偏磁评估的性能参数指标集可根据第 2 节所述原则进行选取。满意度函数的构造一般通过性能指标自身变化情况经分析抽象拟合而得。经分析可发现用于直流偏磁评估的指标集内大多数指标属于区间型指标,即此类指标的最佳性能将发生在一定的区间内,区间外该指标性能的满意度将逐渐下降。由此本文将就区间型指标给出其满意度函数的构造方法。

$$q_k = \varphi_i(x_k) = \begin{cases} 0 & x_k < x_1 \text{ or } x_k > x_4 \\ \frac{x_k - x_1}{x_2 - x_1} & x_1 \leq x_k < x_2 \\ 1 & x_2 \leq x_k < x_3 \\ \frac{x_4 - x_k}{x_4 - x_3} & x_3 \leq x_k \leq x_4 \end{cases} \quad (2)$$

区间型指标在满意度评价时可根据应用场景不同对指标取值范围进行满意等级划分,划分后每一区间均具有确定的上下确界,每个区间的满意度评价可按照指标所反映出来的特性进行数学描述。这里以最简单的三段型折线型满意函数为例进行说明,将指标取值范围划分为满意、一般、不满意三个等级区间,则满意函数式(2)。其中:区间 $[x_2, x_3)$ 为满意区间,其满意度为1;区间 $[x_1, x_2)$ 和 $[x_3, x_4]$ 为一般满意区间,满意度随指标值的偏移而逐渐减少,但能够满足系统要求;区间 $(-\infty, x_1)$ 和 $(x_4, +\infty)$ 为不满意区间,其满意度为0,系统运行将发生异常,影响其运行效果。区间型指标满意度函数曲线如图2所示。

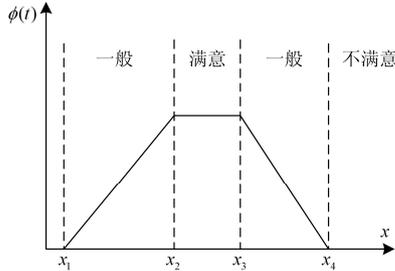


图2 区间型指标满意度函数曲线

Fig. 2 Satisfactory function curve of interval-type index

各指标的满意度函数可通过线性加权法对一个变电站在直流偏磁影响下的运行满意度进行综合评判,在此各性能指标的权重可由运行中的先验经验获得,用于表示各性能参数对系统运行的重要程度。单个变电站在直流偏磁影响下的运行满意度值计算的线性加权形式如式(3)所示。

$$S_i = F(q) = \frac{\sum_{k=1}^m \omega_k q_k}{\sum_{k=1}^m \omega_k} \quad (3)$$

其中,  $\omega_k$  为各性能指标的权重。

### 3 直流偏磁治理站点选取策略

目前可通过工程量测和仿真计算两种方法判断选择需要进行直流偏磁治理的站点。工程量测根据现场观测到的直流量大小判断是否需要配置直流偏磁治理设备,但是由于直流系统单极-大地运行方

式持续时间有限,而且此种方式必须在工程投运后方能实施,因此施工工期长短不确定,可能增加不必要的费用和工作量;仿真计算方法主要是通过计算直流接地极入地电流在交流系统内产生的直流分布,得出变压器中性点可能注入的直流电流大小,判断变压器是否可能发生偏磁,由于大地系统构造复杂<sup>[12-13]</sup>,土壤电阻网络仿真模型无法精确的建立,而且交流系统运行工况众多,因此很难保证仿真计算结果的精确性。单台直流偏磁治理设备的配置在实施过程中仅照顾到受干扰的单一用户侧感受,而忽视了单一变电站治理后对电网运行的整体影响<sup>[14]</sup>。因此目前尚需解决的问题在于如何在满足交直流电网整体运行性能指标的前提下,合理地选取需要进行直流偏磁治理的站点,在兼顾变压器运行性能的基础上,协调电网设备投入资金与设备利用率之间的关系,从而取得较好的治理效果。

参照第3节所构建的直流偏磁治理效果评估满意优化计算模型,变电站需要进行直流偏磁治理的紧迫程度可由函数式(4)获得。

$$U_i = U(q) = 1 - \prod_{k=1}^m q_k \quad (4)$$

其中:  $U_i$  为该变电站需要进行治理的紧迫度,该值越接近1,该站需要进行治理的紧迫度越高。如果  $U_i \equiv 1$ , 则该站必须进行直流偏磁治理。

由此可从接地极的最大入地电流入手,利用土壤电阻网络模型计算出各变电站接地点的地电位升高幅度,进而利用交流线路运行参数及变压器参数构建交流系统直流分布的电路模型,估算出变压器中性点入侵直流电流大小,由此估算出作用在变压器铁心上的直流偏磁量,从而获得变电站各性能指标的参数估算值。

交流系统直流分布的电路模型如图3所示。每个变电站的地下部分可以视以由直流接地极的入地电流在相应变电站产生的地电位为电动势、以相应变电站的接地电阻为内阻的电压源,通过交流变压器中性点和电力网络构成回路产生直流电流,此电流可通过可对电路网络列节点电压方程来求解。需要进行直流偏磁治理的站点选择可利用迭代法来完成,其思路如图4所示。

根据变电站需要进行直流偏磁治理的紧迫程度和变电站运行状况的满意程度可将区域内变电站分为3类。

第1类为紧迫度为1的变电站,此类站点在受到直流偏磁影响时可能会出现变压器运行异常甚至损坏变压器的情况,因此必须进行治理。

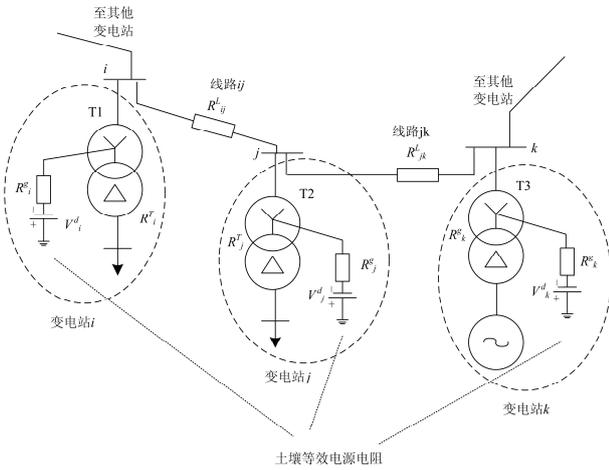


图3 交流系统直流分布的电路模型

Fig. 3 Circuit model of DC distribution in AC system

第2类为紧迫度小于1但变电站运行状况满意度未达到满意水平的变电站点，此类站点在直流偏磁的影响下仍能够正常运行，但是各项运行性能指标将向着不利于系统运行的方向发生改变，如不进行治理长期下去可能会加速站内设备老化进程，从而威胁系统正常稳定运行。

第3类为紧迫度小于1且变电站运行状况满意度达到满意水平的变电站点，此类站点受直流偏磁的影响较少，因此可以不进行治理。

由于各处采用的抑制直流偏磁的措施不同，因此产生的治理效果也不近相同。单一站点的治理有可能影响整个电网入侵直流电流的分布，因此在选择一个治理站点后需要对区域内所有变电站的指标值进行修正，以保证站点选择的正确性。

在站点选择的迭代过程结束后，如果所有站点均被选取，即计算未收敛，则说明治理站点选取的范围不能够满足接地极入地电流的溢流范围，故需扩大变电站治理范围区域。扩大治理范围后，由于网络架构的改变，各项系统运行性能指标均需重新计算。

#### 4 算例分析

本文针对某接地极系统区域内选取 10 所变电站进行治理站点优化选择，治理站点的网络拓扑结构如图 5 所示。

设直流线路在单极-大地运行方式下从接地极注入大地的直流电流最大为 5250 A，则按照直流偏磁仿真计算，得到各变电站的地电位升高及入侵直流电流如表 1 所示。

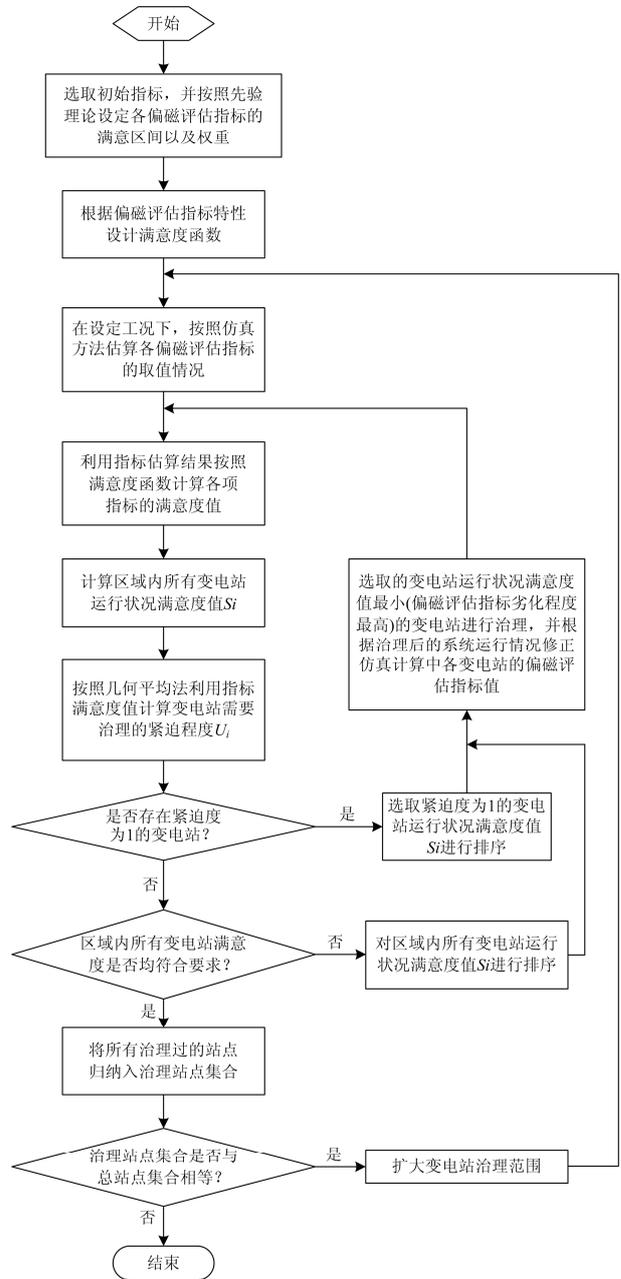


图4 治理站点选取流程

Fig. 4 Governance processes of substation

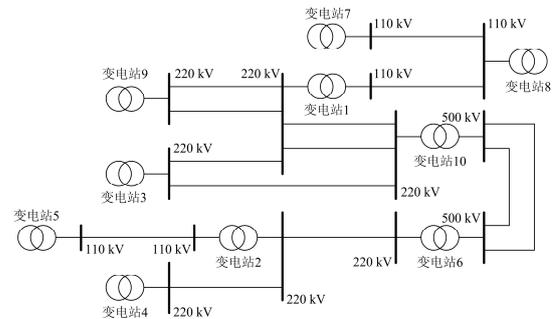


图5 治理站点网络拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of substation

表 1 各变电站直流偏磁仿真结果

Table 1 Simulation results of DC bias in each substation

变电站名称	电压等级	额定励磁电流/A	距离/km	地电位升高/V	中性点入侵直流电流/A
1	220	0.24	12.49	12.21	9.58
2	220	0.72	13.38	10.61	6.92
3	220	2.14	50	0.56	-2.32
4	220	0.48	20.55	3.89	-2.02
5	110	0.48	24.47	2.48	-1.83
6	500	0.33	35.62	1.0029	-1.47
7	110	0.75	49.29	0.57	-1.43
8	110	0.17	27.7	1.8	-1.14
9	220	0.26	35.26	1.03	-0.99
10	500	0.33	28	1.76	-0.83

参照第 2 节所述原则, 确定用于系统优化选择评估的性能指标, 性能指标的确定由评价者的先验经验获得, 可包括但不限于以下指标: 中性点入侵直流电流、系统电压畸变率、励磁电流波形畸变率、绕组温升、油面温升、无功损耗、变压器噪声以及振动等。上述性能指标可通过变压器仿真计算或变压器厂家供的经验值查找获得<sup>[15]</sup>。在计算出各项性能指标的满意度后, 可根据式(3)和式(4)计算各变电站直流偏磁治理的满意度和紧迫度, 这里  $\omega_k$  可选为  $1/m$ 。由于条件所限, 本文仅以中性点入侵直流电流为指标进行分析, 迭代结果如表 2 所示。

表 2 各变电站治理情况迭代计算结果

Table 2 Iterative calculation result of DC bias treatment in each substation

变电站名称	迭代次数					
	1		2		3	
	满意度	紧迫度	满意度	紧迫度	满意度	紧迫度
1	0	1	1	0	1	0
2	0	1	0	1	1	0
3	0.462	0.538	0.666	0.334	0.668	0.332
4	0	1	0	1	0.948	0.052
5	0	1	0	1	1	0
6	0	1	0	1	0.61	0.39
7	0.239	0.761	0.678	0.322	0.679	0.321
8	0	1	0.807	0.193	0.804	0.196
9	0	1	0.937	0.063	0.94	0.06
10	0.075	0.925	0.387	0.613	0.313	0.687

由表 2 可看出, 初始时大部分变电站计算治理紧迫度为 1, 必须要配置抑制直流偏磁设备。在紧迫度计算相等的情况下, 选取指标劣化程度最高的站点进行偏磁治理, 对照表 1 结果, 从中选取中性点入侵直流电流最大的直流站点变电站 1 配置抑制直流偏磁设备。调整系统参数并再次进行迭代计算后, 变电站 1、8、9 满意度均有所上升, 但变电站

2、4、5、6 治理紧迫度仍为 1, 因此按指标劣化原则再次对变电站 2 进行直流偏磁治理, 迭代计算后所有变电站均符合满意度要求, 因此需要配置抑制直流偏磁设备的站点为变电站 1、2。

观察表 2 可以发现, 当变电站 1、2 治理后, 周边站点满意度均有所好转, 甚至变电站 5 的满意度已经从一般达到了满意的程度。由此可见在某些偏磁影响散播的重要节点配置抑制偏磁设备可改变周边变压器中性点直流电流的分布情况, 使得偏磁治理效果最大化, 这样不仅减少了设备冗余, 简化了系统复杂度, 而且节约了设备投资。

## 5 结论

本文提出了一种利用多指标综合评价方法配置直流偏磁治理设备的优化方法, 该方法利用现有的直流偏磁仿真计算方法和满意优化计算模型, 从电力系统整体运行的角度, 计算各变电站需要进行偏磁治理的紧迫程度, 采用迭代筛选的方法提取需要进行治理的最小站点集合, 并对直流偏磁治理后的系统运行情况进行评价。本文所提出的配置优化方法利用交流系统自身的运行裕度来最大限度的容纳消解直流入地电流对交流系统的影响, 将系统维持在可接受状态, 在保证变压器中性点直流电流分布不影响系统整体运行指标的基础上提高了设备资源的利用率, 降低了直流偏磁治理的投入, 同时减少了运维人员的工作量, 保证系统的安全稳定运行。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 郭洁, 黄海, 唐昕, 等. 500 kV 电力变压器偏磁振动分析[J]. 电网技术, 2012, 32(3): 70-75.  
GUO Jie, HUANG Hai, TANG Xin, et al. Analysis on 500 kV power transformer vibration under DC magnetic biasing[J]. Power System Technology, 2012, 32(3): 70-75.
- [3] 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): 9-13.  
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): 9-13.
- [4] 林湘宁, 相艳会, 全江涛, 等. HVDC 单极大地运行情

- 况下换流变压器直流偏磁建模仿真[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 31-35.
- LIN Xiangning, XIANG Yanhui, QUAN Jiangtao, et al. Simulation analysis of convert transformer DC-biasing under HVDC system in ground return operation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 31-35.
- [5] 刘连光, 马成廉. 基于有限元方法的直流输电接地极多层土壤地电位分布计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 1-5.
- LIU Lianguang, MA Chenglian. Calculation of multi-layer soil earth surface potential distribution of HVDC due to finite element method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 1-5.
- [6] 王晓毛, 梅桂华, 谢应耿. 基于高频开关电源的反向注入式直流平衡装置的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 139-144.
- WANG Xiaomao, MEI Guihua, XIE Yinggeng. Research and application of reverse injection DC-balancing device based on high-frequency switching power supply[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 139-144.
- [7] 童莉. 500 kV 自耦变压器直流偏磁的仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- TONG Li. Research of DC magnetic bias on 500 kV auto-transformer[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [8] 姚缨英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.
- YAO Yingying. Research on the DC bias phenomena of large power transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2000.
- [9] 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 of DC bias enduring ability of 500 kV power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 60-66.
- [10] 刘曲, 郑建超, 潘文, 等. 变压器铁心承受直流能力的仿真和分析[J]. 变压器, 2006, 43(9): 5-10.
- LIU Qu, ZHENG Jianchao, PAN Wen, et al. Analysis and simulation of direct current withstand ability of transformer core[J]. Transformer, 2006, 43(9): 5-10.
- [11] 马淑霞, 金炜东. 控制系统的满意优化效用理论研究及应用[J]. 信息与控制, 2011, 40(2): 237-242.
- MA Shuxia, JIN Weidong. Satisfactory optimization utility theory and its application for control system[J]. Information and Control, 2011, 40(2): 237-242.
- [12] 李文峰, 杨洪耕, 肖先勇, 等. 土壤模型对地表电位影响及合理选取土壤模型方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144102(1-8).
- LI Wenfeng, YANG Honggeng, XIAO Xianyong, et al. The effect of soil model on earth surface potential and reasonable selection method for soil model[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144102(1-8).
- [13] 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.
- [14] 蒋伟, 黄震, 胡灿, 等. 变压器接小电阻抑制直流偏磁的网络优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 89-94.
- JIANG Wei, HUANG Zhen, HU Can, et al. Optimized network configuration of small resistances to limit DC bias current of transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 89-94.
- [15] 李林达. 电力变压器直流偏磁的工程评估[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- LI Linda. Evaluation of DC biased power transformer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

收稿日期: 2016-05-30; 修回日期: 2016-08-01

作者简介:

曹楠(1981-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: cao\_nan@sgepri.sgcc.com.cn

王天正(1965-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路在线监测;

王冬青(1972-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 姜新丽)