

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.023

基于复杂网络理论的变电站直流偏磁治理研究

党存禄^{1,2,3}, 马雄文¹

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050;
3. 兰州理工大学电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 兰州 730050)

摘要:为解决特高压直流输电引起的直流偏磁现象,提出了在直流偏磁条件下,基于复杂网络理论的送端电网关键站点识别方法。在PSCAD中建立自耦变压器模型,进行变压器直流偏磁仿真研究,为治理酒泉地区变电站中存在的直流偏磁,基于实际电网结构参数建立仿真模型,对受偏磁电流影响大的关键站点进行识别治理,定义节点熵和线路熵的概念,其大小反映被治理地区节点电流和线路电流分布是否均匀,规定直流偏磁治理标准,用以评判治理效果是否合格。仿真结果表明,进行关键站点识别与治理后,节点熵和线路熵有明显的下降,该地区的总偏磁电流得到了有效抑制。

关键词: 直流输电; 自耦变压器; 复杂网络; 直流偏磁; 站点识别

Research on DC Bias Control of Substation Based on Complex Network Theory

DANG Cunlu^{1,2,3}, MA Xiongwen¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Gansu Province Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China;
3. National Experimental Teaching Demonstration Center of Electrical and Control Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: For solving the phenomenon of DC bias due to UHVDC transmission, a method for identifying key sites in the transmission-end power grid based on complex network theory under DC bias conditions is proposed. PSCAD is used to set up the autotransformer model and conduct the DC bias simulation study of transformer. In order to control the DC bias existing in the substations in Jiuquan area, the simulation model is set up based on the structure parameters of actual grid so to identify and control the critical site which is subjected to the large influence of the bias current. The concept of node entropy and line entropy is defined of which its size reflects whether the node current and line current distribution in the governed area is uniform, and the DC bias control standard is specified so to judge whether the control effect is qualified. The simulation results show that after identifying and managing the key sites, the node entropy and line entropy have decreased significantly and the total bias current in the area has been effectively suppressed.

Key words: HVDC; autotransformer; complex network; DC bias; site identification

0 引言

为满足酒泉风电基地开发外送和湖南用电负荷快速增长需求,已建成酒泉—湖南 ± 800 kV特高压直流输电工程,输电电压等级为 ± 800 kV,输电规模8 000 MW^[1]。在工程运行期间,周边变电站变

器出现不同程度的直流偏磁现象。原因是特高压直流工程以单极—大地回路方式运行时,直流接地极处产生高达上千安培的电流,产生的直流电流通过大地传输到附近变电站中性点接地的变压器,从而造成变压器的直流偏磁现象^[2-7]。

目前国内外学者对变压器直流偏磁做了许多

收稿日期:2023-09-24; 修回日期:2023-12-03

基金项目:国网甘肃省电力科学研究院资助项目(SGGSKY00DJJS1900216)。

Project Supported by State Grid Gansu Electric Power Research Institute(SGGSKY00DJJS1900216)。

研究。文[8-10]针对特高压自耦变压器、三相三柱变压器和三相五柱变压器进行直流偏磁仿真分析;文[11]研究了直流接地极的选址对周边变电站直流偏磁影响的大小;文[12]探讨了未来新建变电站应优化选址,避免直流偏磁对其产生危害;文[13]提出了变压器直流偏磁的合理抑制措施。从上述文献中看出,目前大多数研究的是对单个或多个变压器进行直流偏磁研究,虽然对实际抑制措施中会有一些帮助,但是对于系统层面的直流偏磁影响研究甚少。

针对以上问题,文中依靠自耦变压器直流偏磁原理和复杂网络理论,并结合酒泉送端电网实际电网参数,对单个变压器和送端电网分别进行直流偏磁仿真,由个体转向整体深入研究,为以后的地区电网治理直流偏磁提供了新的研究方法。

1 自耦变压器直流偏磁仿真模型

1.1 仿真模型介绍

以酒泉地区 330 kV 瓜州变电站中的自耦变压器为研究对象进行仿真。变压器出现直流偏磁的原因是:流入变压器绕组的直流电流会与交流励磁电流一起形成交直流叠加的励磁电流,这会导致变压器磁化曲线工作点进入一侧的饱和区域,形成直流偏磁^[14-15]。330 kV 自耦变压器详细参数见表1。

表1 自耦变压器参数

Table 1 Autotransformer parameters

额定电压/kV	额定容量/ MVA	空载损耗/ kW	空载电 流/%
(345±8×1.25%)/115/35	360/360/90	96	0.08

根据自耦变压器在实际中的绕组连接方式,文中的三相自耦变压器连接方式为YN、a0、d11,见图1。

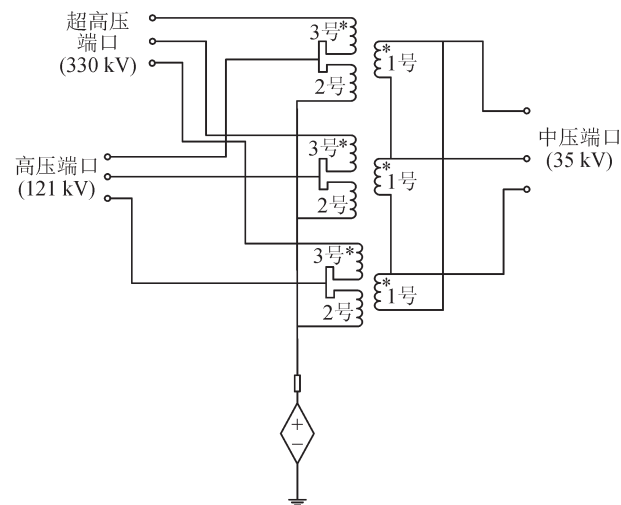


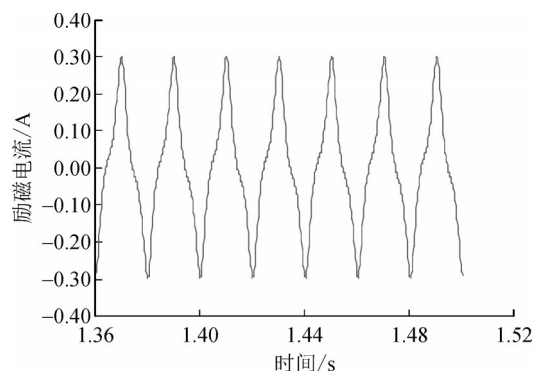
图1 330 kV 自耦变压器模型

Fig. 1 330 kV autotransformer model

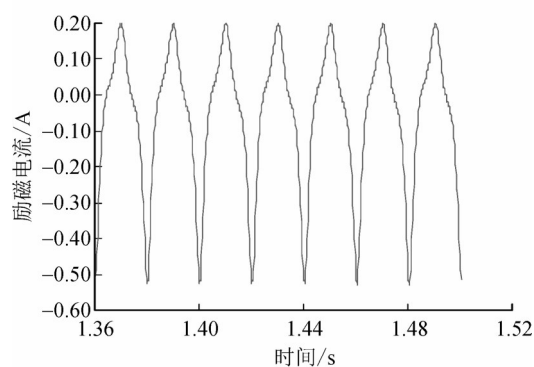
超高压侧接入额定电压,中压侧处于空载状态。电压等级高、低磁阻率、小电阻这些特性为自耦变压器所特有,基于这种特性,为防止在计算过程中小直流电压计算数据容易被淹没,导致仿真结果出现错误^[16-18],在直流电压源处串联一定阻值的电阻,根据工程经验,直流电压幅值设置为0~0.2 kV。

1.2 直流偏磁下自耦变压器空载励磁电流分析

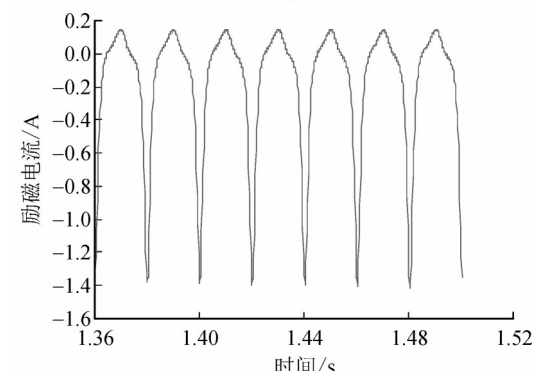
330 kV 自耦变压器组中3台变压器模型具有相同的特征,励磁电流波形相同,所以只观察一台变压器即可。自耦变压器在0、0.1、0.2 kV 直流电压入侵下,励磁电流波形图见图2。



(a) $U_{dc}=0$ kV



(b) $U_{dc}=0.1$ kV



(c) $U_{dc}=0.2$ kV

图2 单台变压器的励磁电流波形

Fig. 2 Excitation current waveform of a single transformer

从图2中可以看出,随着直流电压的不断增大,正负半波电流波形不对称,励磁电流的正半波幅值不断减小,负半波幅值不断增大,励磁电流波形的

畸变也越来越严重,严重时会造成电网事故^[19-20]。根据实际运行情况来看,酒泉地区送端电网变电站会出现或大或小的直流偏磁现象,为解决这一问题,提出基于复杂网络理论的关键站点识别这一方法。

2 复杂网络的关键站点识别

2.1 偏磁电流计算和识别关键站点

通过对自耦变压器的直流偏磁仿真结果可得,较大的直流电压会使励磁电流产生畸变,为治理变电站中出现的直流偏磁,结合被治理地区电网参数结构以及直流偏磁电流自身特性,对计算模型做出以下规定^[21-23]:

1)计算时只考虑 330 kV 和 750 kV 变电站,所有变电站中性点均接地。

2)变电站作为节点,站与站之间的传输线路作为边,同时双回路线或者多回路线均等效成单线路。

假设某一系统中有 N 个变电站,这些变电站中性点都接地,中性点接地电阻为 R_e^i ($i=1, 2, \dots, N$),变电站 i 与变电站 m 间的输电线路电阻为 R_{im} ($i, m=1, 2, \dots, N, i \neq m$), R_e^i 和 R_{im} 共同构成节点导纳矩阵,即为 Y_n , 其中它的对角线元素为 $1/R_e^i + \sum_{m=1}^N 1/R_{im}$, 站与站之间的元素为 $-1/R_{im}$ 。当特高压直流工程以单极大地回路方式运行时,直流接地极处将产生高达上千安培的电流,在变电站中性点接地处产生的电压为 U_i , 根据节点电压法,则变电站中性点产生的直流偏磁电流为

$$\begin{pmatrix} I_{DC1} \\ I_{DC2} \\ \vdots \\ I_{DCN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_e^1} + \sum_{i=1, i \neq 1}^N \frac{1}{R_{1i}} & \cdots & -\frac{1}{R_{1N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{R_{1N}} & \cdots & \frac{1}{R_e^N} + \sum_{i=1, i \neq N}^N \frac{1}{R_{Ni}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

经过计算,得出此时 i 变电站偏磁电流最大,对它进行治理,把导纳矩阵中第 i 行第 i 列元素置零,则该节点的接地电阻 R_e^i 为无穷大,同时它与其他节点之间传输线路电阻 R_{im} 也为无穷大,这样治理的好处是,该变电站不再会受其他变电站的直流偏磁电流影响,则式(1)变为

$$\begin{pmatrix} I_{DC1} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ I_{DCN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_e^1} + \sum_{i=2}^N \frac{1}{R_{1i}} & \cdots & 0 & \cdots & -\frac{1}{R_{1N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{R_{1N}} & \cdots & 0 & \cdots & \frac{1}{R_e^N} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{R_{iN}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

与 i 变电站相连的 m 变电站的偏磁电流会发生变化,通过式(2)可得 m 变电站新的偏磁电流为

$$I'_{DCm} = -\frac{U_1}{R_{1m}} - \frac{U_2}{R_{2m}} \cdots - \frac{U_i}{R_{im}} + U_m \left(\frac{1}{R_e^m} + \sum_{j=1, j \neq m}^N \frac{1}{R_{mj}} + \frac{1}{R_{im}} - \frac{1}{R_{im}} \right) = I_{DCm} + \frac{U_i}{R_{im}} - \frac{U_m}{R_{im}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,经过治理后 m 变电站新的偏磁电流取决于它与治理变电站的电位差。

2.2 偏磁电流治理效应指标和治理流程

利用物理原理中熵的概念,对节点熵 H_N 和线路熵 H_E 做出如下定义,节点熵 $H_N \in (0, 1)$, 其值越大表示节点电流分布越不均匀,只有少数节点具有较大的偏磁电流;线路熵 $H_E \in (0, 1)$, 其值越大表示线路电流分布越不均匀,只有少数线路具有较大的偏磁电流,它们分别可以表示为:

$$H_N = -C_{\text{onst1}} \sum_{k=1}^{n_1} \frac{I_{DC}(k)}{\sum_i I_{DCi}} \lg \frac{I_{DC}(k)}{\sum_i I_{DCi}} \quad (4)$$

$$H_E = -C_{\text{onst2}} \sum_{k=1}^{n_2} \frac{I_{DC}^l(k)}{\sum_{i,j} I_{DCij}} \lg \frac{I_{DC}^l(k)}{\sum_{i,j} I_{DCij}} \quad (5)$$

式(4)中: $I_{DC}(k)$ 为节点值落在第 k 个连续区间的个数; $\sum_i I_{DCi}$ 为节点偏磁电流总和; C_{onst1} 为常数,其取值使 H_N 落在 0 到 1 之间。同理可得,式(5)中: $I_{DC}^l(k)$ 线路电流值落在第 k 个连续区间的个数; $\sum_{i,j} I_{DCij}$ 为线路偏磁电流总和; C_{onst2} 为常数,其取值使 H_E 落在 0 到 1 之间。通过反复地识别与治理关键节点后,使全部的节点偏磁电流处于限定值以下,通过初始的节点熵和线路熵与最后治理完的节点熵和线路熵的值进行对比,可以判断整体的一个治理效果。

识别与治理流程的思路如下所示:

第 1 步,输入电网结构参数、直流接地极入地电流和变电站接地数值等一系列信息,计算 U_i , 得出原始节点偏磁电流分布图,记治理次数 $p=0$ 。

第 2 步,找出偏磁电流最大的节点,对它进行治理,治理完后,形成新的节点偏磁电流分布图。

第 3 步,判断各节点偏磁电流是否在限定值以下,如果不是,返回到第 2 步, $p=p+1$, 否则进行下一步。

第 4 步,整体治理完成后,记录治理次数和治理节点编号,观察节点熵、线路熵和总偏磁电流数下降程度。

3 模型分析

酒泉地区送端电网结构图,见图3。

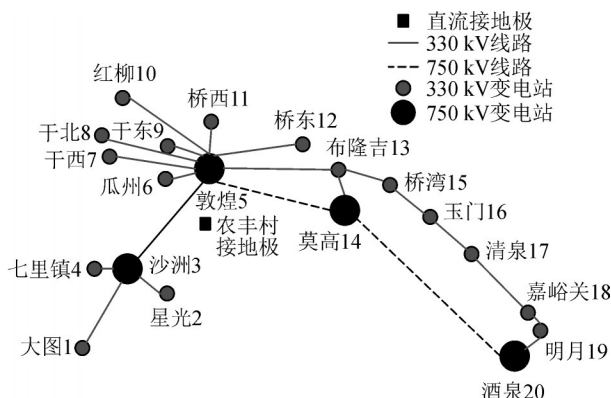


图3 酒泉地区330 kV及以上系统接线图

Fig. 3 Wiring diagram of 330 kV and above system in Jiuquan area

节点偏磁电流初始分布图见图4。

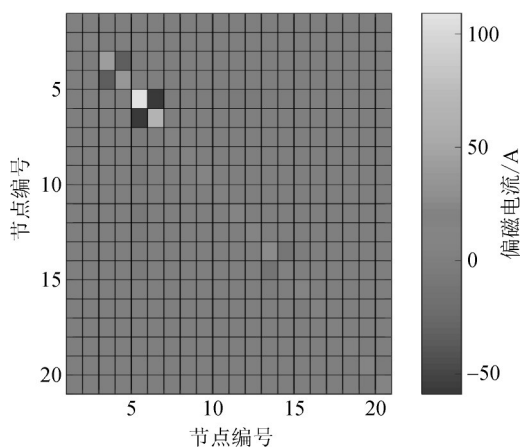


图4 偏磁电流初始分布图

Fig. 4 Initial distribution of magnetic bias current

图4中,对角线方块表示大地流入中性点的偏磁电流值,方块所在的行或列,除去对角元素外,其余的为该节点与其他节点连接线路中的偏磁电流值,每一行或每一列相加后,即为所对应节点的总偏磁电流值。从图4中可以看出,5节点偏磁电流最大,对5节点进行治理,就是把导纳矩阵中第5行第5列元素置零,经过治理后,新的偏磁电流分布图见图5。

经过反复治理后,一共治理了9次,这9个节点分别是5、6、13、14、12、11、9、7、8节点。关键节点依次进行治理后各节点偏磁电流量见图6。

从图6中可以看出,经过第一次治理后,6节点的电流量反而要比未经过治理时数值要大,说明在治理完5节点后,会引起局部地区的电流增加,导致

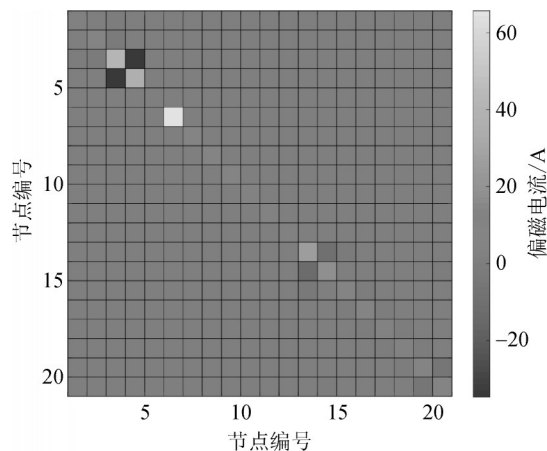


图5 节点治理后偏磁电流分布图

Fig. 5 Distribution of magnetic bias current after node treatment

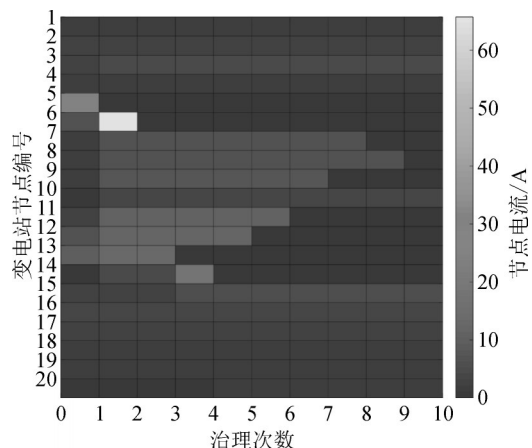


图6 关键节点依次治理后各节点偏磁电流量

Fig. 6 The magnetic bias current of each node after the key nodes are successively treated

6节点电流量升高,但是随着治理次数的不断增加,各节点的电流量最终处于限定值以下。该地区总偏磁电流量总和见图7。

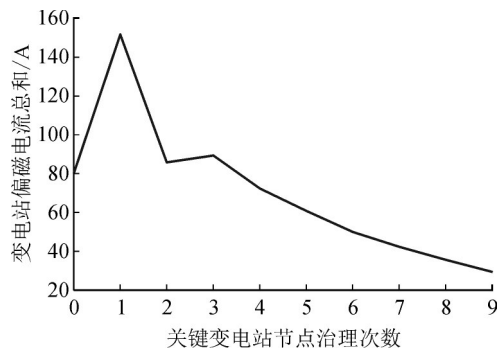


图7 变电站偏磁电流总和与节点治理次数关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between the sum of magnetic bias current and node treatment times in a substation

经过9次治理后,节点熵与线路熵也有了明显的下降,见图8、9。

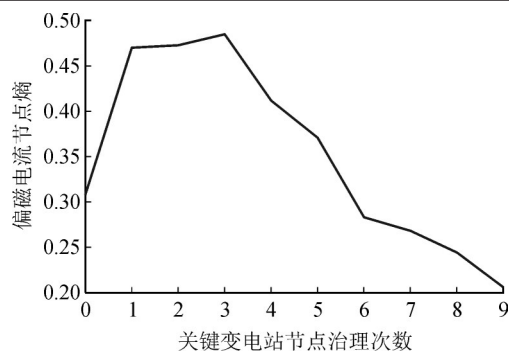


图8 节点熵与节点治理次数关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between node entropy and node governance times

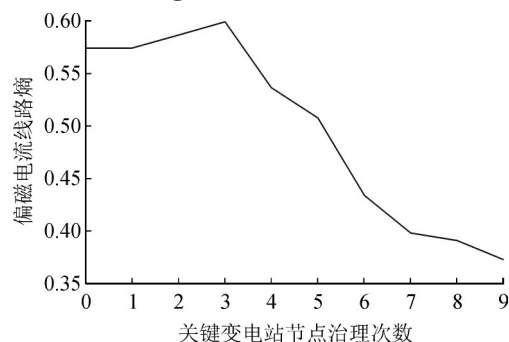


图9 线路熵与节点治理次数关系曲线

Fig. 9 Relation curve between line entropy and node governance times

通过仿真计算得出,变电站偏磁电流的大小取决于该站距离直流接地极远近的大小。对关键节点治理完后,可以看出偏磁电流总和、节点熵和线路熵数值有明显的下降,说明关键节点的治理对抑制该地区的偏磁电流起到了一定的作用和效果。

4 结论

1)通过分析直流偏磁电流产生原理,依靠对330 kV自耦变压器和酒泉地区送端电网的直流偏磁电流仿真,指出关键节点治理个数与地区偏磁电流总和之间的关系,对酒泉地区送端电网直流偏磁抑制与治理措施提出了一种新的思路与方法。

2)文中方法虽简单有效,快速便捷,不局限于抑制直流偏磁装置分类,但对于在实际工程中如何选择抑直装置还需要进一步的研究与探讨。

参考文献:

[1] 刘振亚.全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.
LIU Zhenya. Global energy Internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
[2] 师浪夏,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.

SHI Minxia, WU Bang, JIN Yuhui, et al. Research summary on the impacts of DC magnetic bias on transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 20-36.
[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. Review on the related problems of DC magnetic bias[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 1-8.
[4] 苏磊,赵丹丹,傅晨钊,等.高压直流系统接地极电流的影响及抑制措施研究综述及展望[J]. 陕西电力,2017, 45(3):27-34.
SU Lei, ZHAO Dandan, FU Chenzhao, et al. Review and prospect on influence of grounding electrode current in HVDC system and its suppression method[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 27-34.
[5] 马书民,夏少连,熊玮,等.HVDC/GIC型直流偏磁的差异性分析[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(2):55-64.
MA Shumin, XIA Shaolian, XIONG Wei, et al. Difference analysis of HVDC/GIC type DC bias[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 55-64.
[6] 王子昂,孟润泉,韩肖清.微电网与配电网间串联补偿变压器直流偏磁抑制策略研究[J]. 电测与仪表,2022, 59(1):127-133.
WANG Ziang, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on DC bias suppression strategy of series compensation transformer between micro-grid and distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 127-133.
[7] 韩玉莹,姚田彪,孙其凯,等.直流偏磁对变压器运行噪声的影响分析[J]. 变压器,2022,59(6):65-69.
HAN Yuying, YAO Tianbiao, SUN Qikai, et al. Analysis on influence of DC bias on transformer operation noise[J]. Transformer, 2022, 59(6): 65-69.
[8] 王泽忠,王欢,杨萧箫,等.基于轴对称模型的特高压变压器直流偏磁分析[J]. 高压电器,2020,56(4):87-94.
WANG Zezhong, WANG Huan, YANG Xiaoxiao, et al. DC magnetic bias analysis of UHV transformer based on axisymmetric model[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 87-94.
[9] 杨培宏,冯士伟,亢岚,等.基于PSCAD的特高压自耦变直流偏磁及无功损耗特性分析[J]. 高压电器,2019, 55(10):204-209.
YANG Peihong, FENG Shiwei, KANG Lan, et al. Analysis on DC magnetic bias and reactive loss characteristics of UHV autotransformer based on PSCAD[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 204-209.
[10] 王东阳,武朝强,李志强,等.直流偏磁对不同铁心结构和联结组别变压器感应电动势的影响[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(1):42-49.
WANG Dongyang, WU Chaoqiang, LI Zhiqiang, et al.

- Effect of DC bias on induced electromotive force of transformers with different core structures and connection groups[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(1): 42-49.
- [11] 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]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8039-8049.
- [12] 曾 富,樊艳芳,耿 山.特高压直流接地极优化选址研究[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 205-211.
- ZENG Fu, FAN Yanfang, GENG Shan. Research on optimal location of UHVDC grounding electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 205-211.
- [13] 杨嘉伟,黄 力,华 夏,等.交流系统变压器直流偏磁防护决策研究[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 223-229.
- YANG Jiawei, HUANG Li, HUA Xia, et al. Research on decision-making of transformer DC magnetic bias protection in AC system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 223-229.
- [14] 徐小成.特高压直流换流站接地极对附近变压器直流偏磁影响研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- XU Xiaocheng. Research of influence of UHV DC converter station grounding DC bias on transformers bear[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [15] 雷园园,李盼盼,许加柱,等.YY型和YD型换流变压器中性点电流差异化产生机理及抑制方法[J]. 南方电网技术, 2018, 12(10): 1-6.
- LEI Yuanyuan, LI Panpan, XU Jiazhu, et al. Mechanism and suppressing method of neutral current difference between YY and YD converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(10): 1-6.
- [16] 谭瑞娟,王泽忠,邓 涛,等.特高压变压器空载直流偏磁计算精度分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 162-169.
- TAN Ruijuan, WANG Zezhong, DENG Tao, et al. Accuracy analysis for DC - Biased UHV transformer in no - load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 162-169.
- [17] 王泽忠,李 冰,刘海波,等.直流偏磁下500 kV单相变压器振动噪声的试验研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2801-2811.
- WANG Zezhong, LI Bing, LIU Haibo, et al. Experiment on vibro - acoustic characteristic of 500 kV single - phase transformer under DC - bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2801-2811.
- [18] 谈 翀,党校民,杜建平,等.1 000 kV变压器空载电流谐波成分随不同直流电流的变化与分析[J]. 变压器, 2020, 57(1): 25-30.
- TAN Chong, DANG Jiaomin, DU Jianping, et al. Variation and analysis of harmonic composition of no - load current with different DC currents in 1 000 kV transformer[J]. Transformer, 2020, 57(1): 25-30.
- [19] 刘 刚,孙立鹏,王雪刚,等.正弦及谐波激励下的铁心损耗计算方法改进及仿真应用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 4909-4918.
- LIU Gang, SUN Lipeng, WANG Xuegang, et al. Improvement of core loss calculation method and simulation application under sinusoidal and harmonic excitations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4909-4918.
- [20] 王 博.变压器直流偏磁电容治理技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2016.
- WANG Bo. Treatment technology of transformer DC bias capacitance[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [21] 孙 冰,罗忠游,于永军,等. ± 1100 kV昌吉换流站与 ± 800 kV天山换流站共同作用的直流偏磁问题研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 121-127.
- SUN Bing, LUO Zhongyou, YU Yongjun, et al. Study on the DC magnetic bias of the ± 1100 kV Changji converter station and the ± 800 kV Tianshan converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 121-127.
- [22] 罗立波,赵红军,杨 振,等多直流单极运行下的偏磁直流分布关键站点辨识方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 54-62.
- LUO Libo, ZHAO Hongjun, YANG Zhen, et al. Key station identification method of DC bias distribution under multi DC monopole operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 54-62.
- [23] 朱 爽,王 硕,周加斌,等.基于复杂网络理论的多电压交流系统直流偏磁分布关键站点识别[J]. 中国科技论文, 2018, 13(23): 2740-2746.
- ZHU Shuang, WANG Shuo, ZHOU Jiabin, et al. Critical substation identification of DC bias current distribution based on complex network theory[J]. China Science Paper, 2018, 13(23): 2740-2746.
- 党存禄(1964—),男,教授,主要研究方向为新能源发电技术、电力电子与电力传动(E-mail: dcl_1964@163.com)。
- 马雄文(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析(通信作者)(E-mail: 939680370@qq.com)。