

考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法

彭平¹, 曾祥君², 倪砚茹², 喻 锐², 冷 阳², 周卫华¹, 谢耀恒¹

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:地铁杂散电流会由土壤中的接地网流经变压器中性点从而引发变压器直流偏磁现象。为研究地铁杂散电流对变压器直流偏磁的作用机理,从地铁牵引电流、“钢轨—排流网—大地”杂散电流泄露路径、直流偏磁电流回路三方面等效考虑,搭建杂散电流引起变压器直流偏磁的电阻模型,建立变压器中性点电流随时间、地铁位置变化的动态方程,以LU分解求解得到地铁沿线流经变压器中性点的杂散电流。利用CDEGS搭建地铁运行与变压器仿真模型,对比分析变压器中性点电流的仿真结果与所提建模方法的计算结果,所搭模型误差小,能够准确计算流经变压器中性点的杂散直流量,可有效应用于变压器受地铁杂散电流引发直流偏磁的影响分析。

关键词:地铁;杂散电流;变压器直流偏磁;变压器中性点电流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.022 中图分类号:TM401+.1 文章编号:1673-9140(2021)01-0192-07

Modeling for the DC bias current of transformer caused by the metro stray current

PENG Ping¹, ZENG Xiangjun², NI Yanru², YU Kun², LENG Yang², ZHOU Weihua¹, XIE Yaoheng¹

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410114, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The metro stray current can flow through the neutral point of the transformer from the grounding grid in the soil, and then cause the transformer DC bias phenomenon. In order to effectively evaluate the influence of metro stray currents on transformers, a resistance model for the transformer DC bias caused by the stray current is established by considering the traction current in metro, the "rail-current drainage net-earth" metro system structure, and the DC bias current loop. Then the dynamic equation of transformer neutral point current with time and metro train position is established, and the neutral point current can be solved by the LU decomposition. The software CDEGS is utilized to build the train and transformer simulation model. The transformer neutral point current between the simulation results and the calculation results of the proposed modeling method are comparative analyzed, and the model error is small. Therefore, it can be effectively applied to the evaluation of transformers affected by metro stray current.

Key words: metro system; stray current; transformer DC bias; transformer neutral point current

收稿日期:2018-10-09;修回日期:2018-12-21

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A5160033)

通信作者:曾祥君(1972-),男,博士,教授,主要从事电力系统保护与控制、城市轨道交通牵引供电系统等研究;E-mail: eexjzeng@qq.com

在城市地铁运行过程中会产生杂散电流,杂散电流会流入周边中性点接地的变压器,使变压器工作点偏移而出现直流偏磁现象^[1-3],导致变压器损耗增加、系统谐波增加甚至继电保护误动等恶劣后果,严重影响电网稳定运行^[4-5]。

目前国内外对杂散电流的研究主要集中于通过建模分析杂散电流分布规律。模型最初基于传输线理论,将钢轨和过渡电阻等效成有限个电阻回路,即电阻网络模型,研究杂散电流的分布规律^[6-8];然后对模型进行了改进,建立钢轨、埋地导体和大地三级结构的电阻网络模型,推导钢轨电位和埋地金属电位的理论公式^[9-10]。基于理想条件下的杂散电流基本模型,继续将模型扩展到轨道临近的埋地金属结构,利用场论来计算钢轨电流引起的电位梯度,并讨论这些模型在非均匀轨地过渡电阻和非均匀土壤电阻率的实际情况时的局限性^[11]。文献[12]建立直流系统回流网络的等效电路,在电阻模型的基础上,采用微元法建立杂散电流数学模型,分析在不同过渡电阻和土壤电阻率下的杂散电流,并根据机车运行状态和负荷电流,研究动态情况下的杂散电流,分析线路互连和二极管接地方案对杂散电流的影响。当前针对于杂散电流分布模型的研究已比较成熟,可以较好地模拟地铁运行过程中杂散电流的泄露情况。

关于杂散电流对电网的影响研究较少,特别是引起变压器直流偏磁现象原因的分析。文献[13-14]指出直流牵引供电系统可导致变压器直流偏磁现象,并分析了直流偏磁的原理及特征。文献[15]指出地铁列车行驶时,泄漏电流通过泄露电阻流入大地,形成移动的泄露电源,当地铁钢轨离变电站距离足够近时,地铁泄漏电流容易通过变电站接地网注入变压器中性点。文献[16-18]通过跟踪监测变压器噪声,发现噪声出现和消失的时间与地铁运营时间基本一致,且变压器运行异常现象是在地铁线路开通运营之后出现,因此确认变压器直流偏磁现象是由地铁开通运行产生的杂散电流导致的。上述研究工作均是从实际案例以及跟踪监测数据出发,定性分析地铁杂散电流与变压器直流偏磁现象的相关性,未定量分析二者之间存在的数值关系。

为研究地铁杂散电流对变压器直流偏磁的作用

机理,该文分析地铁杂散电流泄露的流电路径,搭建杂散电流引起变压器直流偏磁的等效模型,建立地铁运行工况与变压器中性点电流间的关系方程,利用LU分解法求解得到地铁沿线杂散电流分布情况与流经变压器中性点的杂散电流,可实现地铁沿线变压器受杂散电流影响的分析。

1 杂散电流引起变压器直流偏磁的原因分析

目前国内的地铁列车供电多采用直流牵引供电方式,机车所需电流由牵引变电所提供,通过接触网取流,并经过钢轨回流到牵引变电所整流机组负极^[19]。由于钢轨具有电阻并承载着电流,所以在钢轨上存在着对地压降,同时钢轨对地并非完全绝缘,而是存在着一定的过渡电阻,因此,在地铁列车运行过程中,有电流由钢轨泄露流入大地,形成杂散电流。

如图1所示,根据地铁杂散电流监测系统,钢轨泄露的杂散电流会由排流网收集,经排流柜二极管导通后返回牵引变电所,但是,当直流杂散电流干扰严重时,杂散电流难以被完全收集并有部分泄露至地下。该电流经由土壤流入变电站的接地网,进入中性点接地的变压器,流经变压器绕组的直流成为励磁电流的一部分,直流磁通与原有主磁通叠加,使磁化曲线偏移至饱和区,导致变压器处于非正常工作状态,引发直流偏磁现象。

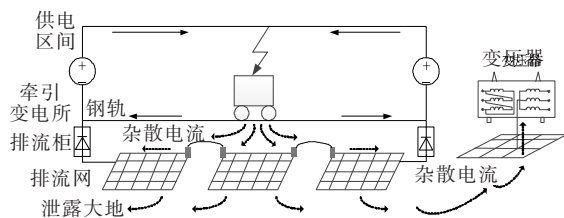


图1 杂散电流引起变压器直流偏磁示意

Figure 1 Schematic diagram of transformer DC bias caused by stray current

2 杂散电流引起变压器直流偏磁的建模分析

2.1 杂散电流流电路径分析

地铁运行时,部分杂散电流可由排流网收集回

牵引变电所,但依然有一部分泄露至地下。由此,这部分电流经由土壤或埋地金属管线,最终经变电站接地网进入中性点接地的变压器 A,电流流进变压器 A 绕组以后,经输电线路后流入到另一个变电站中性点接地的变压器 B 中,最终经变压器 B 的接地中性点流入地网回到牵引变电所负极,如图 2 所示。

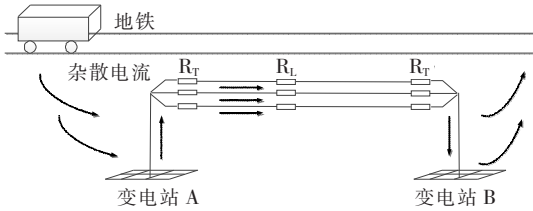


图 2 杂散电流流通回路示意

Figure 2 Schematic diagram of stray current circulation circuit

2.2 杂散电流引起变压器直流偏磁的等效模型

根据地铁杂散电流流路径分析,从地铁注入牵引电流、“钢轨—排流网—大地”的杂散电流泄露

途径和直流偏磁电流回路 3 方面等效,搭建了杂散电流引起变压器直流偏磁的电阻网络模型。

针对地铁机车牵引供电系统的电流回路,可将机车牵引电流等效为电流源向钢轨注入电流,将轨道、排流网认为是一条纯阻性集中参数线,轨道与排流网、排流网与大地间也是只有纯阻性的电气联系,表征为过渡电阻^[20-21]。基于对杂散电流流路径分析,将杂散电流流经的钢轨、排流网土壤等效为“钢轨—排流网—大地”3 层电阻模型(图 3)。将该电阻网络纵向分解为许多段,当分解的段数越多越细时,该段电阻上的电压或电流可代表该点的电流或电压。杂散电流流经中性点变压器与架空线路的路径可等效为连接大地任意 2 节点的一条电阻支路,该电阻参数代表电流流经土壤的过渡电阻、变压器等效电阻和输电电路电阻。该模型为单地铁列车运行下,杂散电流引起变压器直流偏磁的等效模型如图 3 所示。

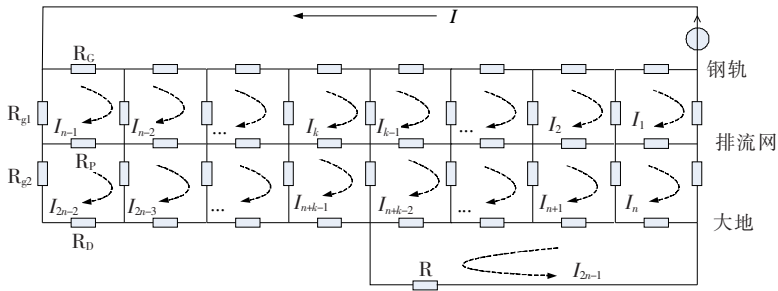


图 3 杂散电流引起变压器直流偏磁的等效模型

Figure 3 Equivalent model of DC bias caused by stray current

图 3 中, I 为牵引变电所向机车供电的牵引电流;将电阻网络纵向分段, R_G 为钢轨每段的纵向电阻; R_P 为排流网每段的纵向电阻; R_D 为大地每段的纵向电阻; R_{g1} 为钢轨与排流网之间的过渡电阻; R_{g2} 为排流网与大地之间的过渡电阻; R 为杂散电流流经土壤、变压器中性点和输电线路的等效电阻。其中,由于模型参数 R_D 、 R_{g1} 、 R_{g2} 、 R 涉及电流流经土壤的等效电阻,计及土壤电阻率、土壤区域面积及土壤区域长度^[10],可进行此类参数的计算。

将该电阻网络纵向分为 $n-1$ 段,根据基尔霍夫电压、电流定律,得回路电流 $I_{(x)}$ 、中性点电流 I_N

的方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{R}_{P1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(x)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{P2} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & -R_{g1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -R_{g1} & a & -R_{g1} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -R_{g1} & a & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a & -R_{g1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_{g1} & a \end{bmatrix}_{(n-1) \times (n-1)}$$

$$a = R_G + 2R_{g1} + R_P$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_{P1} &= \begin{bmatrix} -R_P & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -R_P & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & -R_P & 0 \end{bmatrix}_{(n-1) \times n} \\
 \mathbf{R}_{P2} &= \begin{bmatrix} -R_P & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -R_P & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & -R_P \end{bmatrix}_{n \times (n-1)} \\
 \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} b & -R_{g2} & 0 & \cdots & 0 & R_D \\ -R_{g2} & b & -R_{g2} & \cdots & 0 & R_D \\ 0 & -R_{g2} & b & \cdots & 0 & R_D \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & b & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \\
 &\quad \left[R_D \quad R_D \quad R_D \quad \cdots \quad 0 \quad R + kR_D \right]_{n \times n} \\
 &\quad b = R_P + 2R_{g2} + R_D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} -R_G I \\ -R_G I \\ \cdots \\ -R_G I \\ -R_G I \end{bmatrix}_{(n-1) \times 1}
 \end{aligned}$$

对系数矩阵 $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{R}_{P1} \\ \mathbf{R}_{P2} & \mathbf{B} \end{bmatrix}$ 进行 LU 分解(L 为下

三角矩阵,各参数记为 l ; \mathbf{U} 为上三角矩阵,各参数记为 u),求解杂散电流 $I_{(r)}$ 、中性点电流 I_N 为

$$\begin{cases} I_N = \frac{-\sum_{j=1}^{2n-1} l_{(2n-1)j} \times [c_j - l_{j1} c_1]}{u_{(2n-1)(2n-1)}} \\ \left\{ \begin{aligned} I_{(r)} &= I - (I_{(s)} + I) = \\ &= \frac{c_r - \sum_{j=1}^{r-1} l_{rj} \times [c_j - l_{j1} c_1] - \sum_{j=r+1}^{2n-1} u_{rj} I_N}{u_{rr}} \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (2)$$

式中 $r = 2n - 2, 2n - 3, \dots, 2, 1$ 。

多电源叠加模型是单电源模型的叠加。运用叠加原理,通过式(2)分析计算处理,可以求出在多列车多牵引变电所运行的工况下,地铁供电区间内任意时刻内杂散电流分布情况,以及流经附近变压器中性点的直流量。

3 算例分析

为验证所提建模方法与计算方法的准确性,利用 CDEGS 软件建模仿真并对二者结果对比分析。首先在 CDEGS 软件中建立地铁运行模型模拟杂散电流分布,并在附近搭建变压器与输电线路等效电阻模型,测量地铁泄露杂散电流与变压器中性点电流。然后在该模型参数下,利用该文所提建模方法,计算杂散电流与变压器中性点电流。将软件仿真结果与计算结果进行对比分析,验证方法的准确性。

3.1 仿真模型设置

基于对地铁结构的了解,利用 MALZ 模块对地铁隧道进行建模。地铁隧道长度为 2 000 m,即一个完整的供电区间的距离。隧道顶部距离地表面 10 m,隧道断面为正方形,其边长为 4 m,混凝土层厚度为 0.6 m。模型中轨道、排流网和结构钢筋均采用实心导体,其中模拟轨道的导体含外覆绝缘层。轨距采用标准轨距 1 435 mm。在钢轨下放置 6 根纵向钢筋,钢筋每隔 50 m 横向连接一次,组成钢筋网来模拟排流网,排流网距钢轨 0.25 m^[22]。所搭地铁模型如图 4 所示。

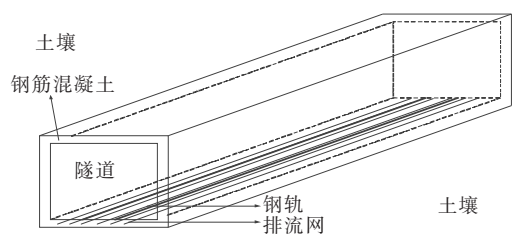


图 4 CDEGS 导体位置分布

Figure 4 Conductor position distribution diagram in CDEGS

根据地铁建设时期钢结构使用型号与《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程 CJJ 49-1992》具体要求(过渡电阻对于新建线路不应小于 15 Ω·km;对于运行线路不应小于 3 Ω·km)计算模型各段电阻初值^[23],并结合工程运行经验,CDEGS 模型参数选取:钢轨等效半径 $R_{eq} = 0.0375$ m(对于 60 kg 钢轨);钢轨纵向电阻为 $R = 0.04$ Ω/km;钢轨绝缘层

厚 5 mm、电阻率为 $706\ 500\ \Omega \cdot \text{m}$ ；排流网等效半径 $R_{\text{eq}}=0.006\ \text{m}$ ；排流网纵向电阻为 $R=0.066\ \Omega/\text{km}$ ；定义土壤为 2 层分布，表层电阻率为 $500\ \Omega \cdot \text{m}$ ，厚度为 0.5 m，底层电阻率为 $250\ \Omega \cdot \text{m}$ ；轨道长度为 2 km；变压器及接地网的等效电阻为 $5.4\ \Omega$ 。连接两变压器的输电线路与轨道平行布置，相隔 1 km，输电线路选用导线 LGJ-100/50，单位长度电阻为 $0.08\ \Omega/\text{km}$ ，线路长度 1 km。

利用 CDEGS 模块自带的电流激励模拟地铁牵引电流，通过改变激励注入数值与注入电流的位置模拟地铁运行。仿真时间设置为 40 s，在此期间，全线一辆列车在线路上运行，该车牵引电流如图 5 所示。设置机车的目标速度为 60 km/h，运行策略采用节时运行策略，列车以全力牵引启动，采用最大能力加速至限速，然后以接近线路限速匀速运行^[24]，则地铁运行位置随时间变化情况如图 6 所示。

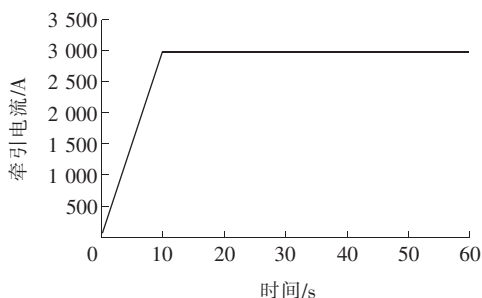


图 5 地铁牵引电流随时间变化曲线

Figure 5 Metro traction current curve changed with time

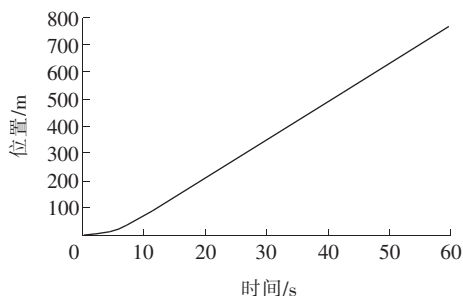


图 6 地铁位置随时间变化曲线

Figure 6 Metro location curve changed with time

根据 CDEGS 所搭地铁模型参数，利用该文所提方法建立杂散电流引起变压器直流偏磁的等效数学模型，电阻模型均分为 20 段，经计算， R_G 为 $0.004\ \Omega$ ， R_P 为 $0.006\ 6\ \Omega$ ， R_D 为 $1.58\ \Omega$ ， R_{g1} 为 $12.93\ \Omega$ ， R_{g2} 为 $14.56\ \Omega$ ，直流偏磁回路电阻 R 为

$5.48\ \Omega$ ，牵引电流 I 按图 5 中 1~60 s 取值。

3.2 仿真结果

表 1 所示是地铁运行 60 s 内，CDEGS 的变压器中性点电流仿真结果，以及在该模型参数下，利用该文所提建模方法，计算变压器中性点电流结果。选择列车运行至 100、200、300、400、500、600、700 m 时，对比表中仿真结果与计算结果可发现，流过变压器中性点直流电流的仿真值与计算值基本一致，误差均小于 1%，该文所提仿真模型精度满足由杂散电流引起的变压器直流偏磁的研究需要。

分析表中数据可得，流经变压器的杂散电流与地铁运行位置密切相关。随着地铁运行距离越来越远，距离牵引变电所越来越近，某一固定位置处的变压器的中性点直流电流越来越小，这与杂散电流呈抛物线分布相关^[25]，即列车与牵引变电所距离越近时，杂散电流泄露量越少。需要说明的是，在机车牵引加速至限速后，机车保持匀速运动状态，变压器的中性点电流主要受机车运行位置的影响^[25]，而与时间无关。

表 1 地铁运行时流过变压器中性点电流仿真值与计算值

Table 1 Simulated value and calculated value of transformer neutral point current

| 时间/ s | 列车位置/ m | 中性点电流 仿真值/A | 中性点电流 计算值/A | 误差/ % |
|----------|------------|----------------|----------------|----------|
| 12 | 100 | 26.28 | 26.24 | 0.15 |
| 19 | 200 | 26.15 | 25.95 | 0.76 |
| 26 | 300 | 25.91 | 25.88 | 0.11 |
| 33 | 400 | 25.54 | 25.31 | 0.90 |
| 40 | 500 | 25.05 | 24.92 | 0.52 |
| 47 | 600 | 24.43 | 24.29 | 0.57 |
| 54 | 700 | 23.69 | 23.48 | 0.88 |

同时，该文所提建模方法能够反映杂散电流的实时动态分布，如图 7 所示。选择第 12 s，地铁牵引电流为 3 000 A 时，地铁沿线杂散电流计算值与 CDEGS 钢轨泄露电流仿真值变化趋势与数值大小基本一致，如图 8 所示，最大误差出现在钢轨 1.2 km 位置处，杂散电流仿真值为 58.25 A，计算值为 59.42 A，误差为 2%。因此，该文所提模型能够实现地铁运行下杂散电流与变压器中性点电流的数值仿真。

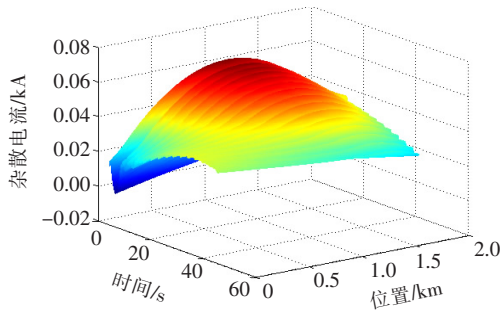


图7 杂散电流动态分布曲线

Figure 7 Stray current dynamic distribution curve

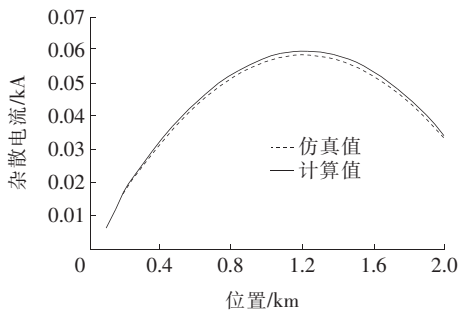


图8 12 s处的杂散电流仿真值与计算值

Figure 8 Stray current simulation and calculation values at 12 s

4 结语

针对变压器受地铁杂散电流影响引发的直流偏磁问题,该文提出了一种变压器直流偏磁建模方法,通过研究地铁牵引供电系统结构分析了杂散电流泄露路径,搭建了杂散电流分布与引起变压器直流偏磁等效回路的电阻模型,建立了变压器中性点电流随地铁运行工况变化的动态方程,以LU分解求解得到了地铁沿线杂散电流分布情况与流经变压器中性点的杂散电流。对比分析CDEGS仿真结果与所提模型计算结果验证了该模型的有效性。研究结果表明:通过搭建电阻网络建立杂散电流引起变压器直流偏磁的仿真模型,能够实现流经变压器中性点的杂散直流的数值计算,精度满足变压器直流偏磁研究需求,可对变压器受地铁杂散电流的影响评估提供参考依据。

参考文献:

[1] 黄华,邹俭,阮羚,等.大范围地电位波动的监测与定位[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):54-62.
HUANG Hua,ZOU Jian,RUAN Ling,et al. Detection

and location of large-scale earth potential fluctuation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 54-62.

- [2] 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/OL].中国电力:1-9[2020-11-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20200226.1558.015.html>.
LIU Lianguang, MA Chenglian. A Method of reducing DC bias current considering grounding electrode location and receiving-end power grid structure[J]. Electric Power, 1-9[2020-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20200226.1558.015.html>.
- [3] 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+239.
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+239.
- [4] 王格万,潘超,郑迺丹,等.变压器直流扰动下励磁谐波与铁心饱和失稳研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(9):49-55.
WANG Gewan, PAN Chao, ZHENG Yidan, et al. Research on excitation harmonics and core saturation instability of transformer under DC disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 49-55.
- [5] 陈子辉,吴智影,刘贺,等.基于纵横交叉算法的变压器三相不平衡损耗研究[J].电网与清洁能源,2020,36(7):57-63.
CHEN Zihui, WU Zhiying, LIU He, et al. Research on three-phase unbalanced loss of transformers based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 57-63.
- [6] Lee C H, Lu C J. Assessment of grounding scheme on rail potential and stray currents in a DC transit system [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2006, 21(4): 1941-1947.
- [7] 沈浩,王丰华,夏能弘,等.用于分析土壤结构对直流偏磁电流影响的简化网架模型[J].电测与仪表,2019,56(9):27-31.
SHEN Hao, WANG Fenghua, XIA Nenghong, et al. A simplified grid model for analyzing the influence of soil structure on DC bias current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 27-31.
- [8] 陈志光,秦朝葵,唐继旭.城市轨道交通动态杂散电流理论分析及计算[J].城市轨道交通研究,2014,17(3):24-29.

- CHEN Zhiguang, QIN Zhaokui, TANG Jixu. Analysis and calculation of rail transit dynamic stray current[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(3): 24-29.
- [9] Xu S Y, Li W, Wang Y Q. Effects of vehicle running mode on rail and stray current in DC mass transit system[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2013, 62(8): 3569-3580.
- [10] 何涛, 李培强, 王璜, 等. 地铁牵引回流系统的钢轨电位和杂散电流仿真[J]. 福建工程学院学报, 2017, 15(4): 386-392.
- HE Tao, LI Peiqiang, WANG Huang, et al. Simulation of rail potential and stray current in metro traction return system[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2017, 15(4): 386-392.
- [11] 蔡力, 王建国, 樊亚东, 等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604-3610.
- CAI Li, WANG Jianguo, FAN Yadong, et al. Influence of the track-to-earth resistance of subway on stray current distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3604-3610.
- [12] 刘燕, 王京梅, 赵丽, 等. 地铁杂散电流分布的数学模型[J]. 工程数学学报, 2009, 26(4): 571-576.
- LIU Yan, WANG Jingmei, ZHAO Li, et al. Mathematical model of distribution of metro stray current[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2009, 26(4): 571-576.
- [13] 彭平, 周卫华, 谢耀恒, 等. 关于地铁杂散电流引起的变压器直流偏磁的分析与研究[J]. 变压器, 2017, 54(11): 26-30.
- PENG Ping, ZHOU Weihua, XIE Yaoheng, et al. Analysis and research on DC bias of transformer caused by metro stray current[J]. Transformer, 2017, 54(11): 26-30.
- [14] 蔡炜, 余恺, 彭晓凤, 等. 110 kV 变电站噪声控制技术与应用[J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 120-126.
- CAI Wei, SHE Kai, PENG Xiaofeng, et al. Noise control technology and its application in 110 kV substation[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 120-126.
- [15] 章彬, 黄伟昭, 陈潇. 直流偏磁对深圳电网主变压器的影响及抑制措施研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 69-72.
- ZHANG Bin, HUANG Yizhao, CHEN Xiao. Probe into impacts of DC magnetic bias on main transformer in Shenzhen power grid and countermeasures[J]. Shanxi Electric Power, 2014, 42(12): 69-72.
- [16] 刘味果, 周卫华, 叶会生, 等. 长沙地铁轨道交通对交流电网的影响及治理措施研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(2): 7-13.
- LIU Weiguo, ZHOU Weihua, YE Huisheng, et al. Research on influence and control measures of metro rail transit on AC network in Changsha[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(2): 7-13.
- [17] 蔡茂, 李佳, 彭卿, 等. 城市地区主变直流偏磁研究与处理[J]. 变流技术, 2017, 39(7): 7-15.
- CAI Mao, LI Jia, PENG Qing, et al. Research and treatment of main transformer DC magnetic bias in urban areas[J]. Converter Techniques, 2017, 39(7): 7-15.
- [18] 王铭, 李林达, 邹琳, 等. 直流牵引供电系统引起的变压器直流偏磁现象[J]. 电子测试, 2015(23): 113-114.
- WANG Ming, LI Linda, ZOU Lin, et al. DC magnetic of transformer caused by DC traction power supply system[J]. Electronic Test, 2015(23): 113-114.
- [19] 和敬涵, 孟鑫, 宋晓明, 等. 基于时域微分的地铁直流牵引系统故障定位[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 164-170.
- HE Jinghan, MENG Xin, SONG Xiaoming, et al. Fault location research of DC railway traction system based on time-domain differential[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(3): 164-170.
- [20] Marti L, Yiu C, Rezaei-Zare A, et al. Simulation of geomagnetically induced currents with piecewise layered-earth models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1886-1893.
- [21] Ogunsola A, Mariscotti A, Sandrolini L. Estimation of stray current from a DC-Electrified railway and impressed potential on a buried pipe[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2012, 27(4): 2238-2246.
- [22] 于凯, 朱峰, 刘光辉, 等. 基于CDEGS的地铁杂散电流仿真研究[J]. 电气化铁道, 2014(6): 44-48.
- YU Kai, ZHU Feng, LIU Guanghui, et al. Simulation of metro stray current based on CDEGS[J]. Electric Railway, 2014(6): 44-48.
- [23] 刘思雯. 基于CDEGS的城市轨道交通杂散电流腐蚀研究[J]. 铁道勘测与设计, 2016(3): 139-143.
- LIU Siwen. Study on stray current corrosion of urban rail transit based on CDEGS[J]. Railway Survey and Design, 2016(3): 139-143.
- [24] 刘明杰. 基于CDEGS的杂散电流动态特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [25] 范伟. 地铁杂散电流的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.