

# 地铁杂散电流引起变压器直流偏磁电流的相关性分析

倪砚茹<sup>1</sup>, 喻 颀<sup>1</sup>, 曾祥君<sup>1</sup>, 冷 阳<sup>1</sup>, 彭 平<sup>2</sup>, 周卫华<sup>2</sup>, 谢耀恒<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:**地铁运行过程中泄露的杂散电流导致附近地表电位发生改变,使各个接地变压器处于不同的地电位上,引发变压器的直流偏磁。为探究地铁杂散电流引起变压器直流偏磁电流之间的数值关系,针对地铁的双端供电模式的运行环境,研究地铁供电系统中杂散电流泄露方式与引起变压器直流偏磁的流通过程,揭示地铁运行过程中变压器直流偏磁的产生机理;基于双端供电的杂散电流分布离散模型,考虑杂散电流的泄露路径对变压器直流偏磁的作用机理,搭建杂散电流引起变压器直流偏磁电流的等效电阻模型,建立变压器直流偏磁电流随地铁运行工况变化的计算方程,实现由杂散电流引起的沿线变压器中性点直流电流的数值分析与计算;利用 CDEGS 仿真模型验证该模型的有效性,能够准确计算地铁站附近的变压器中性点直流偏磁电流,对地铁站、变电站的规划建设具有一定的指导意义。

**关 键 词:**地铁牵引供电系统;地铁杂散电流;地表电位;变压器直流偏磁电流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.016 中图分类号:TM401+.1 文章编号:1673-9140(2021)06-0136-08

## A correlation analysis on transformer DC bias current caused by metro stray current

NI Yanru<sup>1</sup>, YU Kun<sup>1</sup>, ZENG Xiangjun<sup>1</sup>, LENG Yang<sup>1</sup>, PENG Ping<sup>2</sup>, ZHOU Weihua<sup>2</sup>, XIE Yaoheng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** The leaked stray current during the metro operation causes a change of the nearby surface potential, which results in a variation of the ground potential of grounding transformers, then the transformer DC bias. By studying the stray current leakage mode in the traction power supply system for rail transit and the flow path which causes the transformer DC bias, the mechanism of transformer DC bias generated by the metro stray current is revealed. With the consideration of the action mechanism of stray current on transformer DC bias, the equivalent resistance model of the transformer DC bias caused by the stray current is built with double-end power supply which is based on the discrete model of the stray current distribution. The mathematical equation of the transformer neutral point current with the changing operating conditions of the rail transit is established, and the numerical calculation of the transformer neutral point is realized. The validity of the model is verified by the CDEGS simulation, which has certain guiding significance for the planning and construction of subway stations and substations.

**Key words:** metro traction power supply system; stray current; earth surface potential; transformer DC bias current

收稿日期:2019-03-18;修回日期:2019-04-21

基金项目:湖南省研究生科研创新项目(CX20210787);湖南省高校创新平台开放基金(20K003);国家电网总部科技项目(5100-202199276A-0-0-00)

通信作者:喻 颀(1989-),男,博士,讲师,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:kunyu0707@163.com

在城市地铁轨道交通中,机车的供电电流由牵引变电所提供,并经钢轨作为牵引电流回路返回到牵引变电所<sup>[1]</sup>。由于钢轨很难做到完全对地绝缘,因此,有部分牵引电流经钢轨泄漏到地下,即杂散电流。杂散电流造成附近地电位的改变,使相邻变电站间出现电势差,导致变压器中性点有直流电流通过并产生恒定的直流磁通,引发变压器直流偏磁现象<sup>[2-3]</sup>,致使变压器噪声加剧,温升增加,影响系统安全稳定运行。

针对于变压器直流偏磁的产生问题,以直流接地极对变压器的影响研究较为广泛。文献[4]指出直流输电系统以单极大地方式运行会导致交流系统部分变压器处于直流偏磁状态,论文基于场路直接耦合方法,建立了计算模型,实现了直流偏磁电流的计算;文献[5-6]针对于接地极的入地电流造成的直流偏磁问题,基于不同的优化目标提出了电容隔直和优化配置方法以抑制变压器直流偏磁;文献[7]以哈密—郑州±800 kV特高压直流工程为背景,为避免附近变压器的直流偏磁现象,提出了基于直流偏磁风险指标的变电站选址办法。因此,针对于由直流接地极电流导致的变压器直流偏磁电流的计算、抑制以及评估均得到数值上的量化分析与建模计算,但是针对于由杂散电流引起变压器直流偏磁现象鲜有研究。文献[8]指出城市轨道交通的发展容易造成变压器的直流偏磁问题,通过噪声与振动信号奇偶次谐波比为特征量建立了其与城市轨道交通运行状态的关系;文献[9-10]讨论了深圳电网中多台变压器出现直流偏磁现象的原因,根据地铁运行工况、变电站位置与主变压器直流偏磁特征量等因素的关系,指出地铁杂散电流造成的直流偏磁危害及可能的传播途径;文献[11-13]以长沙地铁开通运营后,城区220 kV变压器出现噪声及温升加剧现象,通过对变压器噪声在线监测,发现噪声出现和消失的时段和地铁运行时间相符合,且附近没有直流输电工程,因此确认变压器直流偏磁现象是由地铁运行产生的杂散电流所致。以上研究工作均以监测变压器的振动及噪声,定性分析了变压器直流偏

磁与地铁运营时间的相关性,而杂散电流与偏磁直流的量化相关性尚未得到有效研究。

由此,需建立反映地铁运行下杂散电流分布与直流偏磁电流的耦合电路模型以研究二者的相关性。目前建立的杂散电流分布模型主要由微分方程主导的连续模型和离散平面电路的离散模型组成<sup>[14-15]</sup>,通过地铁结构的简化和等效,现有模型结构如轨道—大地、轨道—排流网—大地、轨道—排流网—埋地金属—大地等。但在进行杂散电流分布规律的分析与建模时,多是基于单端供电方式进行模型推导,而没有直接在双端供电环境下进行模型的搭建与求解<sup>[16]</sup>。

该文分析地铁双端供电模式运行下杂散电流引起变压器直流偏磁的泄露方式,揭示变压器直流偏磁的产生机理,根据杂散电流对变压器直流偏磁的作用机理改进传统的杂散电流分布电阻网路模型,建立杂散电流引起变压器直流偏磁电流的等效计算模型,从而能够数值求解变压器直流偏磁电流与杂散电流,实现定量分析杂散电流与直流偏磁电流的相关性。

## 1 直流偏磁产生机理与建模分析

### 1.1 杂散电流泄露方式与作用机理

杂散电流在接地变压器内形成的直流磁通是造成变压器直流偏磁的主要原因<sup>[17]</sup>,分析地铁供电系统中杂散电流的泄露路径与大地分布是开展其对变压器直流偏磁作用机理的基础性工作。

目前,城市轨道交通的牵引供电模式分为单端供电模式和双端供电模式。单端供电模式应用场景较少,仅存在于用于地铁夜间停车或平时检修的车辆段,而正常情况下地铁处于正线运行时一般为双端供电。与单端供电相比,双端供电具有明显优势,单边供电的电压损失、杂散电流危害程度均是双端供电的3~4倍。所以,杂散电流分布建模应从双端供电环境下考虑。根据地铁杂散电流监测系统,杂散电流会由排流网收集经排流柜导通收回牵引变电所,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,如图1所示。

地铁供电区间泄露的直流电流流入大地,造成附近地电位的改变,从而对该区域内的交流系统产生影响。地电位的改变使各个变电站处于不同的地电位上,从而各变电站间存在电势差,当两变压器中性点接地时,变压器内部有直流电流通过,引发变压器直流偏磁现象,如图 2 所示。则构建反映地铁杂散电流分布与变压器直流偏磁直流回路耦合电路模型,实现二者的相关性分析。

### 1.2 直流偏磁电流数值计算模型

城市轨道交通通常采用钢轨作为牵引电流的回流通路,并且为有效收集泄露的大地中的钢轨牵引电流,采用排流网作为部分泄露的钢轨牵引电流第二回流通路,结合大地中流通的未被完全收集的钢轨泄露电流,构成了地铁牵引供电系统 3 层回流结构<sup>[18]</sup>。基于此,建立反映地铁结构的 3 层电阻网络模型,如图 3 所示。该模型主要包括钢轨纵向电阻  $R_G$ 、排流网纵向电阻  $R_P$ 、土壤的纵向电阻  $R_D$  以及分别表征轨道与排流网、排流网与大地间的纯阻性电气连接的过渡电阻  $R_{g1}$  和  $R_{g2}$ ,从而等效地铁杂散电流由钢轨泄露至大地的流电路径。

对于地铁机车的双端运行供电环境,两侧的牵引变电所相当于电流源,同时为运行机车提供供电电流。不同于地铁单端供电模式运行环境下的供电电流,双端供电下两侧的供电电流随地铁机车运行位置  $x$  变化而变化。记机车牵引电流为  $I_Z$ ,牵引变电所 1、2 提供给机车的供电电流分别为  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$ ,地铁供电区间全线距离为  $L$ ,机车距两牵引变电所的位置分别为  $L_1$ 、 $L_2$ ,假设 2 座牵引变电所电压相同,且接触网电阻  $r$  均匀,则

$$\begin{cases} I_Z = I_{L1} + I_{L2} \\ L = L_1 + L_2 \\ I_{L1} \cdot r \cdot L_1 = I_{L2} \cdot r \cdot L_2 \end{cases} \quad (1)$$

由此得出机车的供电电流分别为

$$\begin{cases} I_{L1} = \frac{L_2}{L} I \\ I_{L2} = \frac{L_1}{L} I \end{cases} \quad (2)$$

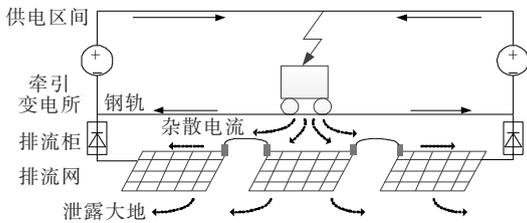


图 1 杂散电流泄露方式示意

Figure 1 Schematic diagram of metro stray current leakage mode

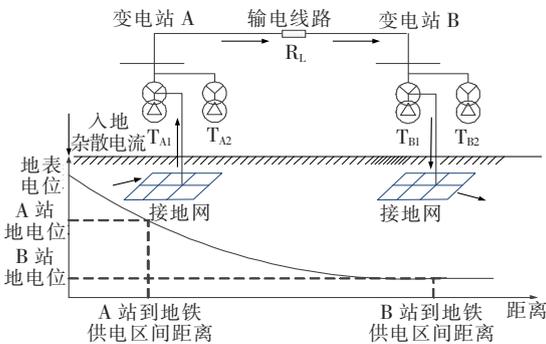


图 2 杂散电流引起变压器直流偏磁示意

Figure 2 Schematic diagram of transformer DC bias caused by metro stray current

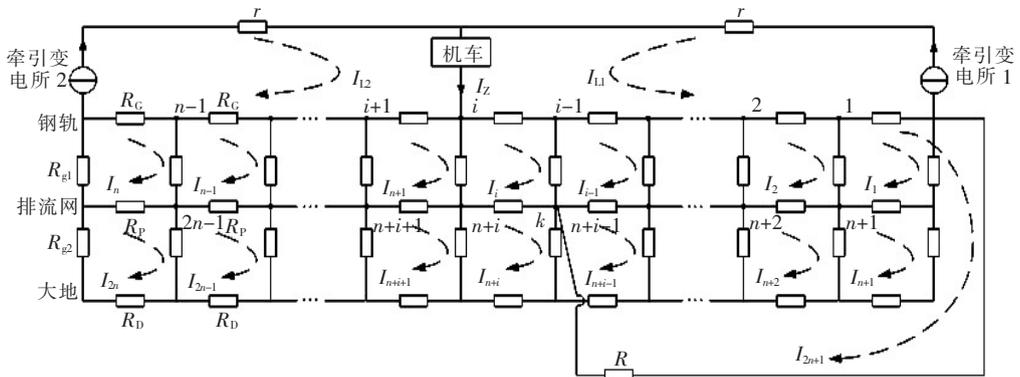


图 3 地铁杂散电流引起变压器直流偏磁等效电阻模型

Figure 3 Equivalent resistance model of transformer DC bias caused by metro stray current

鉴于排流网未能完全收集泄露的杂散电流从而引起变压器的直流偏磁,在杂散电流分布模型上添加直流偏磁电流支路,即从排流网某一节点  $k$  引出该电流支路。考虑地铁运行下的钢轨电位分布规律,机车位置的电位最高,沿轨道线性减小至牵引变电所处,则牵引变电所负极处的电位最低,一般低于地电位。所以该直流电流支路最终返回牵引变电所负极构成杂散电流引起变压器直流偏磁电流支路(见图 3)。根据杂散电流引起变压器直流偏磁流通过路径分析,直流偏磁电流支路电阻  $R$  为变压器等效电阻、输电线路电阻及泄露电阻之和,泄露电阻表示杂散电流经土壤流至变电站地网的等效电阻,并以此来表征变电站距地铁站的距离。

对图 3 所搭电阻网络模型采用回路电流法,经整理沿各自回路列 KVL 方程:

$$\mathbf{Z}_l \mathbf{I}_l = \mathbf{E}_l \quad (3)$$

式中  $\mathbf{Z}_l$  为  $(2n+1) \times (2n+1)$  回路阻抗矩阵;  $\mathbf{E}_l$  为  $(2n+1) \times 1$  的回路电压源电势的列向量;  $\mathbf{I}_l$  为  $(2n+1) \times 1$  的网孔回路电流列向量。

将方程(3)展开为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} & 0 \\ \mathbf{C}^T & 0 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{I}_l \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & -R_{g1} & 0 & \cdots & 0 \\ -R_{g1} & a & -R_{g1} & \cdots & 0 \\ 0 & -R_{g1} & a & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a \end{bmatrix},$$

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

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -R_P & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -R_P & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -R_P & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_P \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d & -R_{g2} & 0 & \cdots & 0 \\ -R_{g2} & d & -R_{g2} & \cdots & 0 \\ 0 & -R_{g2} & d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & d \end{bmatrix},$$

$$d = R_P + 2R_{g2} + R_D$$

对于矩阵  $\mathbf{C}$  和元素  $f$ ,其值根据直流偏磁回路支路引出点位置  $k$  确定,记矩阵  $\mathbf{C}$  中各元素表示为  $\mathbf{C} = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_{k-n-1} \ c_{k-n} \ c_{k-n+1}]^T$ , 其中  $k \in [n+1, 2n-1]$ , 则元素  $c_1, c_2, \dots, c_{k-n-1} = R_G$ ,  $c_{k-n} = R_G + R_{g1}$ ,  $c_{k-n+1} = -R_{g1}$ ; 元素  $f$  取值为  $f = (k-n)R_G + R_{g1} + R$ 。对于矩阵  $\mathbf{H}$ ,其值根据机车牵引电流  $I_Z$  的注入位置确定,记矩阵  $\mathbf{H}$  中各元素为  $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_z \ \cdots \ h_n]^T$ ,  $z \in [1, n-1]$ , 则  $h_1, h_2, \dots, h_z = -R_G I_{L1}$ ,  $h_{z+1}, \dots, h_n = R_G I_{L2}$ 。对于元素  $m$ ,其值由机车电流注入位置  $z$  和直流偏磁回路支路引出位置  $k$  共同确定,即

$$m = \begin{cases} -(k-n)R_G I_{L1}, & k-n \leq z \\ -(k-n)R_G I_{L1} + (k-n-z)R_G I_{L2}, & k-n > z \end{cases} \quad (5)$$

式中  $I_{L1}, I_{L2}$  分别为牵引变电所 1、2 提供给机车的牵引电流。

因此,在等效电阻模型下分段数  $n$  确定之后,调整表征机车位置的模型参数  $z$  由 1 变化至  $n-1$ ,根据该位置下的牵引电流  $I_Z$ ,不断计算相应的电源电势矩阵  $\mathbf{E}_l$ ,从而得到直流偏磁电流以及杂散电流,以达到适应地铁机车的动态运行效果。

由此,求解方程(3)即可得到各网孔电流  $\mathbf{I}_l$ ,记  $\mathbf{I}_l = [i_1, i_2, \dots, i_l, \dots, i_{2n+1}]$ 。根据牵引供电系统的供电方式以及杂散电流计算方法,杂散电流等于牵引电流  $I$  减去轨道电流  $I_G$ ,结合机车电流注入位置  $z$  和直流偏磁回路支路引出位置  $k$ ,则  $n$  段轨道电阻泄露的杂散电流为

$$I_s = I - I_G \quad (6)$$

当  $k-n < z$  时,

$$\begin{cases} I_{s1} = I_{L1} - (I_{L1} + i_l + i_{2n+1}) = -(i_l + i_{2n+1}), \\ l = 1, 2, \dots, k-n \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{s2} = I_{L1} - (I_{L1} + i_l) = -i_l, \\ l = k-n+1, \dots, z \end{cases}$$

$$I_{s3} = I_{L2} - (I_{L2} + i_l) = -i_l, l = z+1, \dots, n$$

(7)

当  $k-n = z$  时,

$$\begin{cases} I_{s1} = I_{L1} - (I_{L1} + i_l + i_{2n+1}) = -(i_l + i_{2n+1}), \\ l = 1, 2, \dots, z \end{cases}$$

$$I_{s2} = I_{L2} - (I_{L2} - i_l) = i_l, l = z+1, \dots, n$$

(8)

当  $k - n > z$  时,

$$\begin{cases} I_{s1} = I_{L1} - (I_{L1} + i_l + i_{2n+1}) = -(i_l + i_{2n+1}), \\ l = 1, 2, \dots, z \\ I_{s2} = I_{L2} - (I_{L2} - i_l - i_{2n+1}) = i_l + i_{2n+1}, \\ l = z + 1, \dots, k - n \\ I_{s3} = I_{L2} - (I_{L2} - i_l) = i_l, l = k - n + 1, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

通过求解方程(2),网孔电流  $I_{2n+1}$  即为流经变压器中性点的杂散电流:

$$I_N = i_{2n+1} \quad (10)$$

针对双端供电模式,通过对地铁杂散电流的泄露方式及流路径的分析,搭建反映地铁杂散电流分布与变压器直流偏磁直流回路的耦合电路模型,根据机车运行中与变电站相对位置变化过程确立变压器中性点电流随地铁运行工况变化的数学方程,经方程求解实现变压器直流偏磁电流的数值计算,从而能够进行地铁杂散电流引起变压器直流偏磁的相关性分析。

## 2 仿真分析

### 2.1 CDEGS 建模与仿真

地铁供电区间泄露的直流电流流入大地,造成附近地电位的改变,利用 CDEGS 软件得到地表电位分布曲线,从而得到两变电站的电势差,根据线路等效电阻即可计算直流偏磁电流。同时,基于论文所提的杂散电流引起变压器直流偏磁电流的计算方法,根据相同模型参数,计算直流偏磁电流,对比分析计算结果,验证模型的准确性。

根据地铁建设时采用的钢轨与排流网的钢结构型号,并结合技术规程要求与工程运行现场经验,CDEGS 模型参数<sup>[19]</sup>选取:机车供电区间为 2 km,钢轨等效半径  $R_{eq} = 0.035$  m(对于 60 kg 钢轨);钢轨纵向电阻  $R_G = 0.04$   $\Omega/\text{km}$ ;钢轨绝缘层厚 5 mm、电阻率为 900 000  $\Omega \cdot \text{km}$ ;排流网等效半径  $R_{eq} = 0.008$  m;排流网纵向电阻  $R_P = 0.66$   $\Omega/\text{km}$ ;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。

为模拟地铁隧道环境,在钢轨下布置排流网,排流网由纵向 3 根导体和 40 根横向连接导体组成,导体位置分布如图 4 所示,其中排流网埋深 0.5 m,间

距为 1.5 m。变压器及接地网的等效电阻为 0.5  $\Omega$ 。连接两变压器的输电线路与轨道平行布置,相隔 1 km,单位长度电阻为 0.08  $\Omega/\text{km}$ ,线路长度为 1 km。

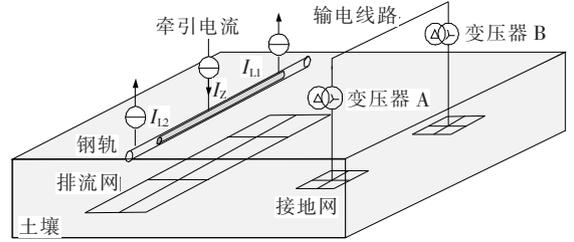


图 4 CDEGS 仿真模型搭建示意

Figure 4 Schematic diagram of the CDEGS simulation model

利用 CDEGS 电流激励模拟地铁牵引变电所的供电电流  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$  以及机车牵引电流  $I_Z$ ,通过固定电流激励  $I_{L1}$ 、 $I_{L2}$ ,改变电流激励  $I_Z$  注入数值与注入位置,模拟地铁的双端运行环境(见图 4)。

地铁机车在实际运营过程中,不同时段会选择相应的运行策略,为研究机车实际工况下所产生的杂散电流以及直流偏磁电流变化规律,仿真采用结合目标速度运行策略(TSRS),即当机车处于牵引工况时,当速度大于等于“目标速度”时机车转为惰行工况;在机车处于惰行工况时,当速度大于等于“目标速度上限”时,机车转为制动工况;当速度小于等于“目标速度下限”时,机车转为牵引工况;在机车处于制动工况时,当速度小于等于“目标速度”时,机车转为惰行工况。其中,本线路机车目标速率为 60 km/h,速率下限为 50 km/h,速率上限为 75 km/h。综合机车运行特性,规定机车运行时间为 120 s,得出仿真周期内机车各时刻牵引电流的数值变化曲线,如图 5 所示。当地铁从隧道起始位置运行至 0.1、0.2、...、1.5、1.6 km 时,结合相应时刻与列车取流特性曲线,激励注入值与注入位置如表 1 所示。

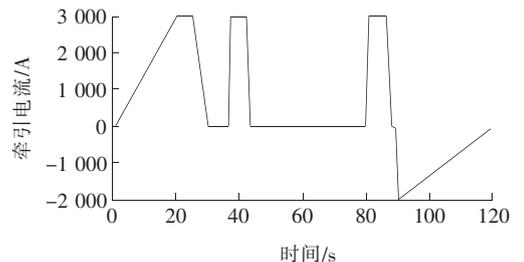


图 5 列车取流特性曲线

Figure 5 Metro traction current curve

表 1 地铁运行时各变压器直流偏磁电流仿真值与计算值

Table 1 Simulated values and calculated values of the transformer neutral point current under locomotive operation

时间/s	列车位置/km	注入电流/A	直流偏磁电流/A	
			CDEGS 仿真值	等效模型计算值
12	0.1	1 800	-4.428 7	-4.420 3
19	0.2	3 000	-11.790 7	-13.994 3
26	0.3	2 400	-10.818 5	-11.905 4
33	0.4	200	-0.862 9	-0.668 4
41	0.5	3 000	-10.451 8	-9.422 2
48	0.6	200	-0.442 5	-0.203 9
55	0.7	200	-0.113 8	-0.394 8
62	0.8	200	0.257 4	0.532 9
69	0.9	200	0.625 9	0.616 4
77	1.0	200	0.845 2	0.643 3
84	1.1	3 000	6.536 1	9.161 6
91	1.2	-1 933	0.157 4	0.374 3
99	1.3	-1 400	-2.597 2	-2.651 1
105	1.4	-1 000	-3.587 0	-3.924 0
113	1.5	-466	-2.302 7	-2.326 5
120	1.6	200	-1.133 5	-1.646 5

利用 CDEGS 中 MALZ 模块计算标量电势,可得机车运行过程中周围地表电位分布情况。假设变压器 A、B 所处地点的地电位值分别为  $U_1$ 、 $U_2$ ,变压器和输电线路等效直流电阻为  $R$ ,则流过变压器中性点的电流为

$$I_N = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad (11)$$

同时,利用 MALZ 模块计算导体数据,可得排流网的流入电流,即杂散电流分布情况。

相应地,针对 CDEGS 中已搭建的地铁运行的双端供电环境,利用该文所提建模方法搭建等效电阻网络模型,经计算,模型参数:  $R_G$ 、 $R_P$ 、 $R_D$ 、 $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$  分别为 0.004、0.066、1.58、12.93、14.56  $\Omega$ ,直流偏磁回路电阻  $R$  为 1.08  $\Omega$ 。利用方程(3)建立杂散电流引起变压器直流偏磁电流计算方程;结合地铁运行位置,利用式(5)~(10),可得不同时刻下变压器中性点电流与杂散电流分布。

## 2.2 仿真结果对比分析

通过 CDEGS 仿真计算得到机车运行至不同位置时 2 座变电站的电位值,如图 6 所示。不难发现,

两变电站地电位递增或递减趋势一致,但电势差随机车位置的变化而变化。根据变电站间的电势差和直流偏磁等效电阻,利用式(11)可计算机车运行至该时刻下的变压器直流偏磁电流。

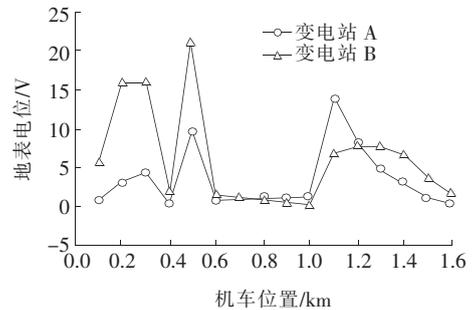


图 6 机车运行至不同位置地表电位分布曲线

Figure 6 Surface potential distribution curve with locomotive position changing

如表 1 所示,在地铁运行 120 s 内,在 CDEGS 仿真软件下搭建地铁运行等效模型,根据变压器地表电位的仿真结果计算得到流经变压器中性点的直流电流,以及在同等模型参数下,利用该文所提建模方法计算流经变压器的直流偏磁电流。对比 CDEGS 仿真结果与所搭模型计算结果可发现,变压器中性点直流偏磁电流的仿真值与计算值误差在 1 A 左右,最大误差在 84 s 处,为 2.6 A。分析 120 s 内变压器的直流偏磁电流可得,其变化趋势与地铁牵引电流变化趋势一致。

为验证该文所提建模方法的有效性,将其与传统的杂散电流分布模型对比,传统模型未考虑地铁运行区域内接地设备对杂散电流分布的影响。选择机车运行至第 19、41 s,分别利用 CDEGS 仿真、传统杂散电流分布模型与该文提出的改进模型计算杂散电流分布,仿真与计算结果对比分别如图 7、8 所示。

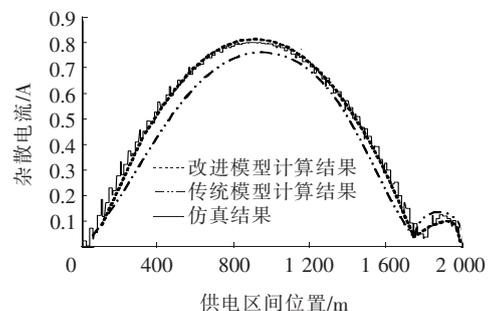


图 7 19 s 时杂散电流分布曲线的仿真与计算结果对比

Figure 7 Comparison of stray current CDEGS simulation results and calculation results at  $t=19$  s

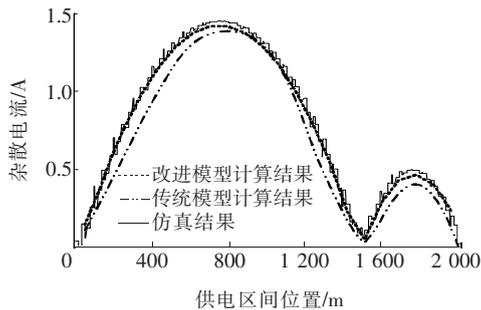


图8 41 s时杂散电流分布曲线的仿真与计算结果对比

Figure 8 Comparison of stray current CDEGS simulation results and calculation results at  $t=41$  s

数据对比可发现,该文所提建模方法与CDEGS仿真反映杂散电流整体分布趋势基本一致,且杂散电流均在机车位置处达到最小值;19 s时杂散电流CDEGS仿真值与计算峰值分别为0.817 4、0.833 4 A,误差为1.95%,41 s时杂散电流CDEGS仿真值与计算峰值分别为1.469、1.449 A,误差为1.36%;同时,与传统杂散电流分布模型相比,该文所提建模方法的计算结果与CDEGS仿真结果更为接近,由此反映出当地铁站周边有接地变压器运行时,考虑杂散电流对变压器直流偏磁的作用因素更符合杂散电流的实际分布情况。

### 3 结语

针对地铁双端供电的运行环境,基于杂散电流对变压器直流偏磁的作用机理,该文搭建了双端供电模式的地铁杂散电流引起变压器直流偏磁电流的等值电阻模型,根据机车距变电站相对位置变化过程,建立了地铁不同运行工况下流经变压器中性点直流电流的计算方程,实现了地铁杂散电流引起变压器直流偏磁电流的数值计算。通过CDEGS仿真模型验证了该模型的有效性,计算结果误差小,能够适应变压器直流偏磁研究需求。同时利用该模型可实现杂散电流的分布计算,与传统杂散电流分布模型相比,计算结果更为准确,表明了考虑杂散电流在周边接地变压器流通过程对研究杂散电流分布的必要性。该文所提建模方法能够模拟地铁运行工况,计算地铁沿线的变压器直流偏磁电流与杂散电流分布,为定量分析地铁杂散电流与变压器直流偏置电流之间的相关性,进一步研究变压器直流偏置的影

响评估和抑制措施,提供了一个简单有效的研究平台。

### 参考文献:

- [1] 陈子辉,麦荣焕,倪惠浩,等. 计及电能质量因素的变压器能效分析[J]. 供用电, 2020, 37(5): 64-72.  
CHEN Zihui, MAI Ronghuan, NI Huihao, et al. Energy efficiency analysis of transformers considering power quality factors[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5): 64-72.
- [2] 史云涛,赵丽平,林圣,等. 城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1951-1957.  
SHI Yuntao, ZHAO Liping, LIN Sheng, et al. Analysis of distribution of metro stray current in urban power grid and its influencing factors[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1951-1957.
- [3] 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.
- [4] 康兵,杨勇,李振兴,等. 基于实际运行数据的配电变压器故障原因多维度分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 66-70+116.  
KANG Bing, YANG Yong, LI Zhenxing, et al. Multidimensional analysis of causes of distribution transformer fault based on actual operation data[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 66-70+116.
- [5] 谢志成,林湘宁,李正天,等. 基于隔直装置全局优化投切的直流偏磁治理方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7133-7142+7427.  
XIE Zhicheng, LIN Xiangning, LI Zhengtian, et al. Suppression method for DC bias based on global optimal switching method of blocking devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7133-7142+7427.
- [6] 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+215.  
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+215.

- [7] 樊艳芳,耿山,巩晓玲,等.基于直流偏磁风险指标的变电站选址[J].电力系统保护与控制,2018,46(19):59-65.  
FAN Yanfang,GENG Shan,GONG Xiaoling,et al. Substation site selection considering the risk index of DC bias[J]. Power System Protection and Control,2018,46(19):59-65.
- [8] 吴晓文,周年光,胡胜,等.城市轨道交通引起的变压器直流偏磁噪声与振动特性[J].电测与仪表,2017,54(17):117-122.  
WU Xiaowen,ZHOU Nianguang,HU Sheng,et al. Audible noise and vibration characteristics of DC-bias in power transformers caused by urban mass transit system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(17):117-122.
- [9] 肖黎,张晶焯,陈龙,等.地铁杂散电流造成的电网变压器直流偏磁特征量分析[J].南方电网技术,2021,15(5):129-134.  
XIAO Li,ZHANG Jingzhuo,CHEN Long,et al. Analysis on the DC magnetic bias characteristic of transformer in power system caused by the subway stray current[J]. Southern Power System Technology,2021,15(5):129-134.
- [10] 石瑶,朱姝婕,陈宇晨,等.多层土壤结构下直流偏磁电流分布计算研究[J].电测与仪表,2020,57(14):28-33.  
SHI Yao,ZHU Shujie,CHEN Yuchen,et al. Research on calculation of DC-biased current distribution under multi-layer soil structure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(14):28-33.
- [11] 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.
- [12] 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的研究[J].湖南电力,2017,37(1):7-9+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(1):7-9+13.
- [13] 蔡茂,李佳,彭卿,等.城市地区主变直流偏磁研究与处理[J].电气自动化,2017,39(7):7-9+15.  
CAI Mao,LI Jia,PENG Qing,et al. Research and treatment of main transformer DC magnetic bias in urban areas[J]. Electrical Automation,2017,39(7):7-9+15.
- [14] Ogunsola A,Sandrolini L,Mariscotti A. Evaluation of stray current from a DC-electrified railway with integrated electric-electromechanical modeling and traffic simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,51(6):5431-5441.
- [15] Charalambous C A,Aylott P. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2014,63(8):3530-3538.
- [16] 孟絮絮,张栋梁,袁志昌.城市轨道交通轨地绝缘破损时杂散电流解析分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(11):101-106.  
MENG Xuxu,ZHANG Dongliang,YUAN Zhichang. Analytical a analysis of URT stray current in case of rail and earth insulation damaged[J]. Urban Mass Transit,2017,20(11):101-106.
- [17] 樊超,聂京凯,肖伟民,等.电力变压器铁心、油箱振动特性及与近场噪声的关联性研究[J].中国电力,2020,53(10):34-41.  
FAN Chao,NIE Jingkai,XIAO Weimin,et al. Study on vibration characteristics of power transformer core and oil tank and the correlation with near field noise[J]. Electric Power,2020,53(10):34-41.
- [18] 彭平,曾祥君,倪砚茹,等.考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):192-198.  
PENG Ping,ZENG Xiang-jun,NI Yanru,et al. Modeling for the DC bias current of transformer caused by the metro stray current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):192-198.
- [19] 翁汉,陈皓,万毅,等.基于巴氏系数的变压器励磁涌流和故障差流识别新判据[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):113-122.  
WENG Hanli,CHEN Hao,WAN Yi,et al. A novel criterion to distinguish inrush current from fault current based on the Bhattacharyya coefficient[J]. Power System Protection and Control,2020,48(10):113-122.