

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.05.018

# 地铁引起的变压器偏磁电流特征分析

宁晓雁, 高国强, 尹彩琴, 肖 嵩, 仰 枫, 郭裕钧, 张血琴

(西南交通大学电气工程学院, 成都 611765)

**摘 要:** 城市轨道交通的迅速发展, 导致周边电力变压器直流偏磁问题愈发严重。侵入变压器的偏磁电流主要包括杂散电流和感应电流两部分, 首先探究电网回路与地铁牵引供电系统电磁耦合机理, 然后运用 CDEGS 和 PSCAD 软件分别搭建电耦合和磁耦合仿真模型, 以此分析侵入电网回路中的杂散电流和感应电流的时域及频域特征, 最后研究单条线路上列车运行数量、列车运行工况对于电网回路中偏磁电流分布的影响。研究结果表明: 耦合电流为低频时变电流, 电流频域集中于 0~0.05 Hz 频段, 且杂散电流中的纯直流量占比多于感应电流。

**关键词:** 地铁; 电力系统; 偏磁电流; 杂散电流

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)05-0125-07

## Characteristics of Transformer Bias Current Caused by Metro

NING Xiaoyan, GAO Guoqiang, YIN Caiqin, XIAO Song, YANG Feng, GUO Yujun, ZHANG Xueqin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611765)

**Abstract:** With the rapid development of urban rail transit, the direct current (DC) magnetic bias of surrounding power transformers has greatly intensified. The magnetic bias current invading the transformer primarily includes stray and induced currents. This study begins by examining the electromagnetic coupling mechanism between the power grid circuit and the metro traction power supply system. Using current distribution, electromagnetic fields, and grounding and soil structure analysis (CDEGS), along with power systems computer aided design (PSCAD) software, simulation models for both electrical and magnetic coupling were constructed. These models then served to analyze the time- and frequency-domain characteristics of stray and induced currents affecting the power grid circuit. In addition, the influence of the number of trains running on a single line, train operating conditions, and other factors related to the distribution of the magnetic bias current in the circuit are explored. It was determined that the coupling current is a low-frequency time-varying current; the current frequency domain is concentrated in the 0-0.05 Hz frequency band; and the pure DC component in the stray current dominates the induced current.

**Keywords:** metro; power system; bias current; stray current

近年来, 交流电力变压器直流偏磁问题越来越频繁, 随着城市新兴地铁线路广泛投运, 地铁杂散电流被认为是导致其周边变压器直流偏磁的主要原因<sup>[1-6]</sup>。

理想情况下, 钢轨具有良好的绝缘性能, 牵引电流经由接触网、列车和钢轨最终流至牵引变电所, 由于列车负载变化致使牵引电流具有时变性, 在空间中激发

收稿日期: 2022-10-29 修回日期: 2023-04-15

第一作者: 宁晓雁, 女, 硕士研究生, 主要从事高压与绝缘技术、地铁杂流方面研究, 2405525335@qq.com

基金项目: 国家优秀青年基金项目(51922090); 四川省科技攻关专项(2019YJ0213); 四川省杰出青年科学家项目(2019JDJQ001); 国家自然科学基金-联合基金集成项目(U1966602)

引用格式: 宁晓雁, 高国强, 尹彩琴, 等. 地铁引起的变压器偏磁电流特征分析[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 125-131.

NING Xiaoyan, GAO Guoqiang, YIN Caiqin, et al. Characteristics of transformer bias current caused by metro[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 125-131.

产生时变磁场,接触网和钢轨流过的电流数值相近,方向相反,最终存在空间中的磁场很小。但由于列车运营磨损,加之受道床环境影响,牵引电流泄露进入大地形成杂散电流,致使钢轨电流与接触网电流出现较大差值,杂散电流经接地网侵入电力系统,且导致接触网和钢轨产生的磁场无法抵消。当电力系统中由两接地变压器、输电线路和大地构成的等效闭合回路处于该磁场环境中时,等效回路中往往会产生感应电流。因此,地铁周边变压器中出现的偏磁电流主要由杂散电流和感应电流两部分组成。

国内外诸多学者对地铁杂散电流展开了研究,主要集中在杂散电流对附近埋地管道的腐蚀和电力变压器的威胁两方面。关于杂散电流对电力变压器的威胁研究,通常采取数值分析、仿真建模与实地测试相结合的方式,研究发现当地铁杂散电流入侵城市电网时,电网中的输电线路、避雷线以及大地中均存在直流偏磁电流,而这部分电流以杂散电流为主<sup>[7]</sup>;且列车不同工况、轨地过渡电阻、变压器漏抗、避雷线标称面积、土壤电阻率等因素都会影响侵入变压器中性点的直流电流大小<sup>[7-10]</sup>。针对地铁引起的直流偏磁,上述研究忽略了地铁感应电流的存在。在地铁感应电流研究方面,文献[11]通过对成都某地铁区间感应电压的实测,发现地铁牵引系统对周边电网供电回路的确存在磁耦合作用,且感应电压与地铁及电网的相对位置和列车的运行状态有关,但并未深入探究感应电流特性及其在电力系统中的分布情况。此外,在对地铁牵引供电接触网系统产生的空间电磁场分布的研究发现,该磁场为低频磁场,磁场分布与运行中列车的位置无关,只与接触网经过的电流和轨道的回流有关<sup>[12-14]</sup>。

因此,本文针对地铁引起的周边变压器直流偏磁问题,综合考虑杂散电流及感应电流两大诱因,分别采用CDEGS软件和PSCAD/EMTDC软件搭建电网回路与地铁的电磁耦合仿真模型,研究侵入电网回路杂散电流及感应电流的时频特性,并分析对比单条线路不同列车数量、列车不同运行工况下,杂散及感应电流分布情况。本文对偏磁电流成分的特征分析有助于促进直流偏磁防护措施优化,对电力变压器的安全稳定运行具有重要意义。

## 1 偏磁电流产生机理

我国城市地铁多数采用直流牵引供电系统,牵引电流从变电所正极流出,经接触网、列车、钢轨回流至变电所负极。由于钢轨对地并非完全绝缘,部分牵引电流通过轨道板泄露入地形成杂散电流。大部分的杂散电流会被钢轨下方设置的排流网收集,经由排流柜流回直流变电所负极,但仍有部分杂散电流泄露进大地,引起地表电位变化,以致周边相邻变电站之间形成电势差,杂散电流从变电站接地网侵入电力系统后,以输电线路为媒介,并最终从另一处变电站接地网回流至牵引变电所,其侵入路径如图1中绿色箭头所示。文献[15]指出地铁牵引电流激发的空间时变磁场为低频磁场,且土壤相对磁导率约为0.95,与空气相对磁导率非常相近,因而该时变磁场可穿越混凝土层和土壤层。当由输电线路、变压器与大地构成的闭合回路处于时变磁场时,闭合回路中磁通量的变化导致回路中产生感生电流;此外,当列车进入电网输电回路空间内时,两者发生相对运动,进而产生动生电流。总的感应电流经输电线路由接地变压器入地流回牵引变电所,其侵入路径如图1中紫色箭头所示。

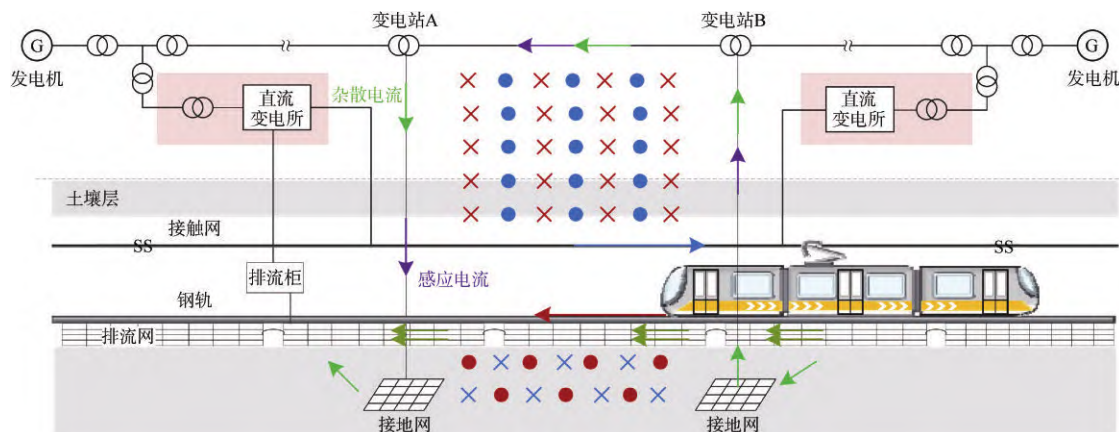


图1 偏磁电流产生及侵入路径

Figure 1 Generation and invasion path of magnetic bias current

2 仿真模型说明

杂散电流采用 CDEGS 中的 MALZ 模块进行仿真。在地铁杂散电流分布仿真模型的基础上加入电网回路模型，由于 MALZ 模块无法计算线路感应电流，因此采用 PSCAD/EMTDC 建立电磁暂态仿真模型，研究地铁感应电流对周边电网回路的磁耦合作用。

本文主要导体参数参考地铁线路真实值，某地铁工程的接触网导线参数接触网选取 CTAH150，钢轨选择 CHN60。架空高压线选取 LGJ-300/25。具体参数设置如表 1 所示。

为了便于分析，对模型进行合理的简化：

- 1) 计算时不关注接地网附近的电流密度分布，因此采用“田字形”进行接地网等效建模；
- 2) 研究对象为直流分量，因此仅考虑传导性电阻耦合的情况下，基于电阻等效原则将变压器绕组及其

输电线路等效为阻值相等的导体，且将三相等效为一相处理；

表 1 导体参数设置  
Table 1 Conductor parameter settings

导体类型	型号	相对电阻率	相对磁导率	等效半径/mm
架空高压线路	LGJ-300/25	2.235	1	11.88
接触线	CTAH150	0.672	0.99	6.91
钢轨	CHN60	5.19	300	49.6

3) 参考我国某市地铁线路和电网变电站的具体结构，仿真的地铁线路总长 12.5 km，每隔 2.5 km 设置 1 个地铁牵引站，共计 6 个地铁牵引站 S1~S6，电网回路与地铁平行距离 3 km，电力变压器与地铁垂直距离为 0.3 km。简化后的地铁与电网位置坐标如图 2 所示。

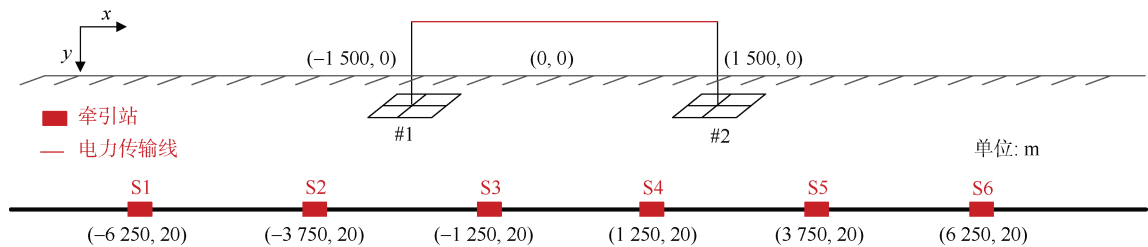


图 2 地铁与交流电网位置坐标  
Figure 2 Location coordinates of metro and AC power grid

地铁产生的时变磁场体现在两方面：①列车负荷特性改变带来牵引供电电流变化，经钢轨的回流电流同时改变，该电流产生的时变磁场耦合在电网回路中，随着时间变化，电网回路中磁通变化引起电网回路产生感生电动势；②由于列车动态运行，将运动的列车视为通电导体，则由移动的通电导体产生的磁场与电网回路发生相对运动，产生动生电动势。此外，等效的通电导体中由于牵引电流的变化也会产生感生电动势，但由于列车等效的通电导体长度相对于列车到电网回路的距离可以忽略，因此不考虑列车等效的通电导体对电网回路产生的感生电动势。

利用 PSCAD/EMTDC 进行电磁感应仿真，使用 CABLE 模块模拟电力输电线路，其中电网回路与地铁线路垂直距离 0.3 m，电力变压器等效电阻设置为 30 Ω。另建 CABLE 模块模拟地铁牵引供电系统，牵引供电电流由受控电流源连接的信号发生器组成，为仿真列车牵引电流在电网回路中引起的磁通变化，将列车牵引电流分段线性化，通过 TIME 模块控制 RAMP 模块形成。

在模拟列车动态运行的过程中，分别仿真不同时间下，入侵电力变压器的杂散电流值和感应电流值，并通过叠加得到动态侵入电力变压器内部的偏磁电流。以时间  $\Delta t$  为非等间隔步长，选取具有代表性的时间点，依据图 3 所示的列车牵引电流和运行位置确定当前列车牵引电流注入位置及电流大小，视每个时间点为恒定电场进行求解。

针对单条地铁线路，分析列车数量、列车状态、电网回路数目对于侵入变压器的偏磁电流影响。定义运行在牵引工况的列车牵引电流方向为“+”，方向由轨道流向大地；定义运行于制动工况的地铁列车电流方向为“-”，电流流动路径与牵引工况时相反。

3 偏磁电流特征分析

3.1 杂散电流特征分析

当列车分别运行于不同区间时，侵入回路中的杂散电流波形如图 4 所示。对比杂散电流时域特性发现，如果列车运行在与电网回路并行区域内时，侵入电网回路的杂散电流幅值较低，影响较小；若列车完全运



行在并行区域外且离电网回路较远时,受距离影响,侵入电网回路的杂散电流幅值也不高。仅当列车运行在电网回路外,且距离电网回路较近时,对电力变压器偏磁电流影响较大。

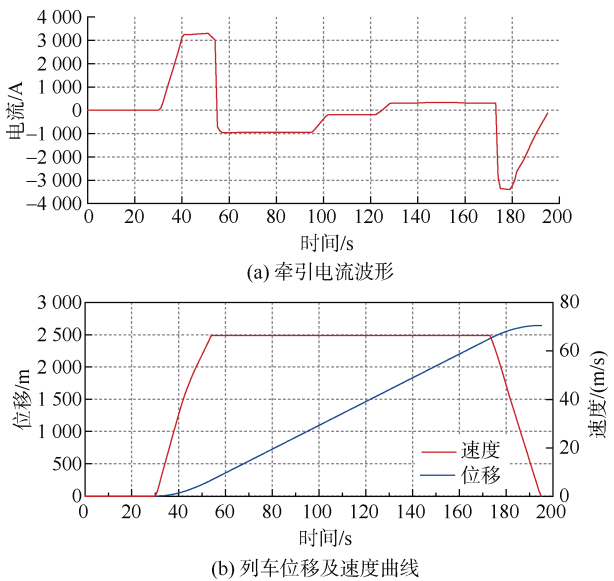


图 3 列车牵引电流及运行位置  
Figure 3 Train traction current and operation position diagram

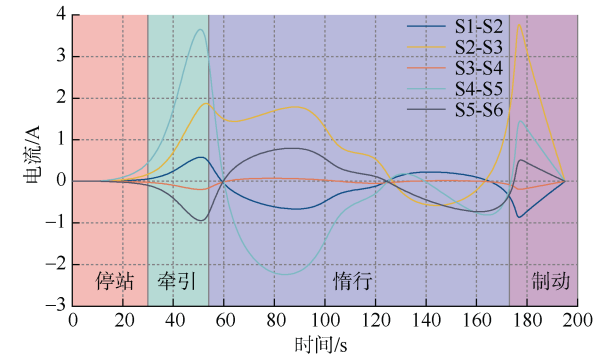


图 4 杂散电流时域波形  
Figure 4 Time domain waveform of stray current

采用快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)分析列车在不同区间内侵入电力变压器的杂散电流的频域特性,结果如图 5 所示。对比杂散电流的频域特性,侵入电力变压器内部的杂散电流幅值主要集中在 0~0.05 Hz。其中各区间纯直流分量占比分别为:22.91%、16.70%、32.38%、12.50%、14.63%。

3.2 感应电流特征分析

根据列车运行位置不同,电网输电回路中感应电压种类不同,感应电压种类及产生原因详见表 2。

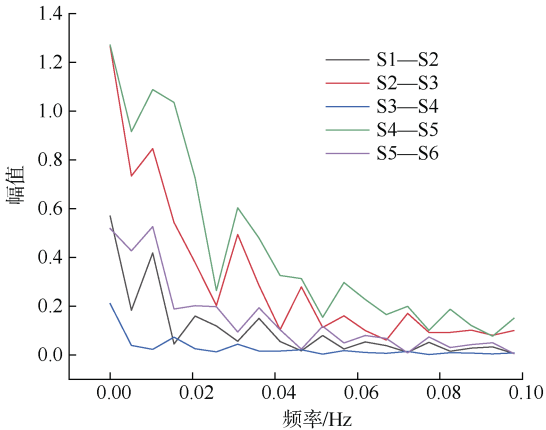


图 5 杂散电流频域分析  
Figure 5 Frequency domain analysis of stray current

表 2 感应电压种类及产生原因  
Table 2 Type and cause of induced voltage

运行区间	电压种类	产生原因
S1—S2	动生电动势	列车动态运行
S2—S3	感生电动势、动生电动势	接触网受流、钢轨回流、列车动态运行
S3—S4	感生电动势、动生电动势	接触网受流、钢轨回流、列车动态运行
S4—S5	感生电动势、动生电动势	接触网受流、钢轨回流、列车动态运行
S5—S6	动生电动势	列车动态运行

结合表 2,分别选取列车运行于 S1—S2、S2—S3 及 S3—S4 区间,分析电网回路中感应电流情况。当列车运行在 S1—S2 牵引供电区间时,该区间地铁线路与电网回路不存在平行区域,钢轨回流和接触网受流产生的磁场不能耦合至电网回路,此时感生电动势为 0,电力变压器#1、#2 等效导体位于列车同侧,动生电动势同向相抵,可以忽略动生电动势。当列车分别运行于 S2—S3 及 S3—S4 时,回路中感应电流总量情况如图 6 和图 7 所示。

图 6 和图 7 中的动生电势相对于感生电势数值很小,基本可以认为回路中的感应电流全部由感生电势产生。对比不同供电区间内感应电流时域特性发现:当地铁列车供电区间与电网回路部分并行时,感应电流波形呈现“单峰型”;当列车供电区间完全包含于电网回路中时,感应电流波形呈现“双峰型”。

由于动生电动势产生的感应电流幅值较小且存在尖峰,故分析时忽略动生电动势的影响。为计算地铁引起的电力变压器偏磁电流的成分关系,采用 FFT 分析列车在不同区间内电网回路中的感应电流的频域特性,结果如图 8 所示。图 8 显示电网回路中的感应电流

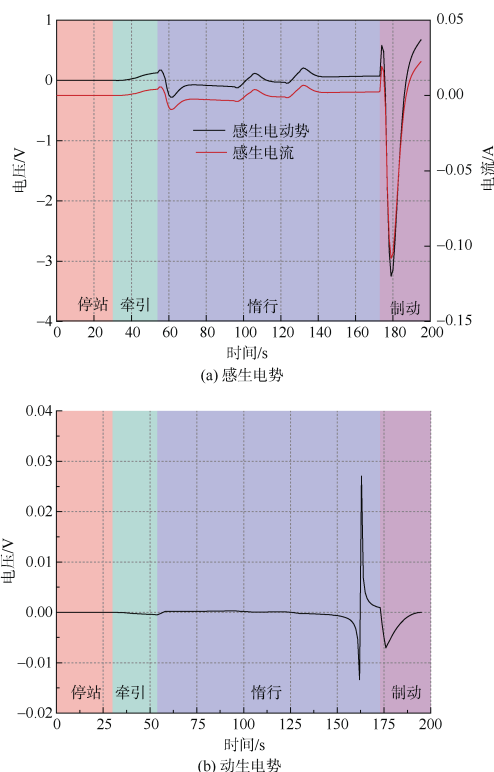


图6 S2—S3区间运行时电网回路感应电流  
Figure 6 Induced current of power grid circuit during S2—S3 section operation

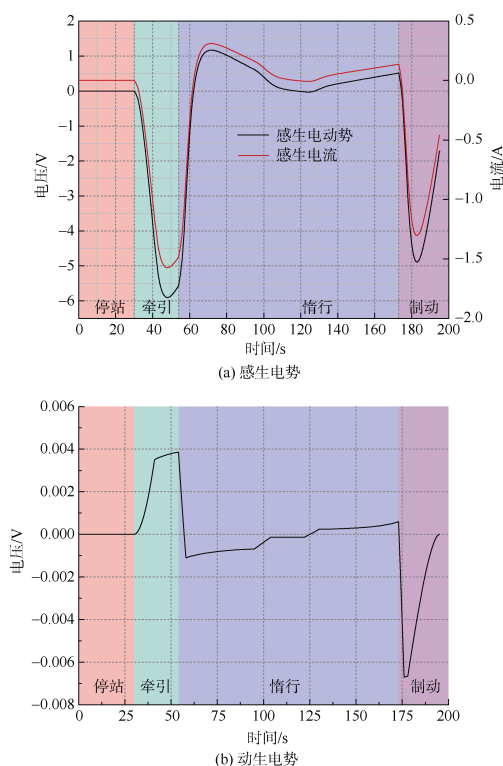


图7 S3—S4区间运行时电网回路感应电流  
Figure 7 Induced current of power grid circuit during S3—S4 section operation

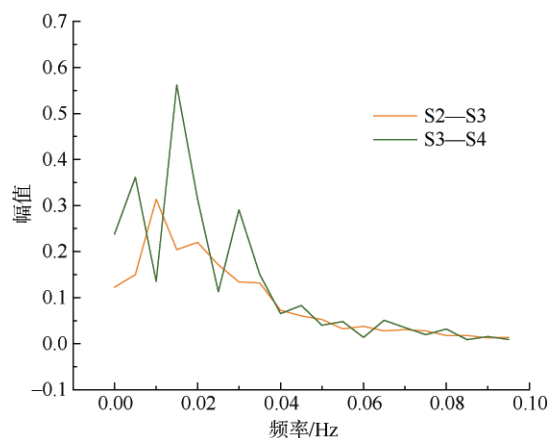


图8 感应电流频域分析

Figure 8 Frequency domain analysis of induced current

幅值主要集中在 0~0.05 Hz。其中各区间纯直流分量占比分别为 6.05%和 8.49%，小于杂散电流中相同区间内的纯直流分量占比。

## 4 影响因素分析

### 4.1 列车数量

研究列车数量对偏磁电流的影响时,初始列车 1 运行于 S1—S2 区间,且处于牵引状态;接着保持列车 1 运行状态不变,新增列车 2 运行在与列车 1 相邻的地铁区间内(即 S2—S3),依此类推,直至 CDEGS 和 PSCAD 仿真模型各区间内均有列车以牵引状态运行。新增列车在地线线路上的分布情况如图 9 所示。

当仅列车 1 运行于 S1—S2 区间时,经钢轨泄漏的杂散电流,由电力变压器#2→电网线路→电力变压器#1,该电流大小为 0.09 A;而由时变磁场形成的感应电流方向与侵入交流电网的杂散电流方向相同,大小为 0.19 A。此时流过电力变压器#1、#2 的偏磁电流为侵入电力变压器内的杂散电流和线路感应电流之和,为 0.28 A。

增加列车 2 后,电网回路产生的感应电流为列车 1 和列车 2 共同作用的结果,大小为 1.04 A,方向由电力变压器#2→电力变压器#1;而经钢轨泄露的杂散电流总量为 2.3 A,方向为电力变压器#1→电力变压器#2。此时回路中杂散电流和感应电流反向,故最终在电力变压器#1、电力变压器#2 产生 1.26 A 的偏磁电流,方向为电力变压器#1→电力变压器#2。继续新增列车,回路中电流变化情况见图 10。

图 10 中电力传输线中感应电流随着列车数量的增加,呈现先增加后饱和的态势,这主要是因为电网回路与地铁并行区间有限,达到最大并行长度后即使

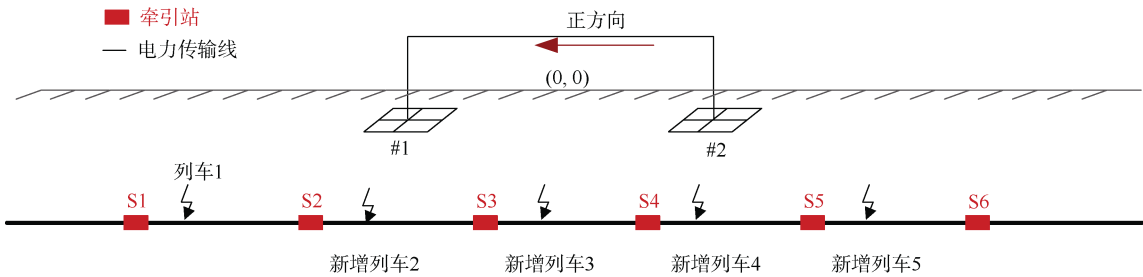


图 9 新增列车在地线线路上的分布情况  
Figure 9 Distribution of new trains on ground wire line

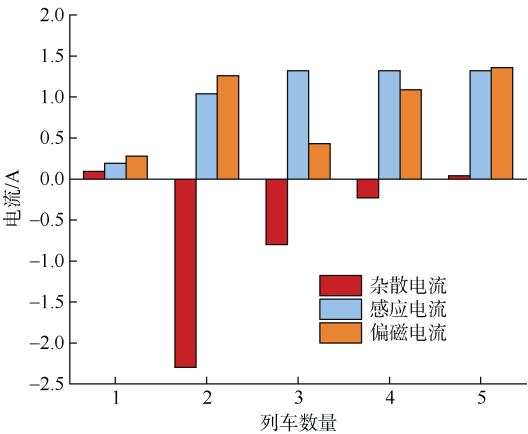


图 10 列车数量对电流的影响  
Figure 10 Influence of the number of trains on the current

再增加列车也无明显变化；传输线中的杂散电流数值呈先增后减的趋势，这主要是因为新增列车 4、5 产生的杂散电流方向与之前列车 1~3 产生的杂散电流反向，由于抵消作用的存在使得数值减少。综合来看，偏磁电流包括感应电流和杂散电流两部分。由于仿真的是单一电网回路，故传输线电流等于流过电力变压器#1 以及#2 中的电流。

### 4.2 列车运行工况

为分析列车工况对侵入变压器偏磁电流的影响，仿真时分别设置相邻两地铁区间(即 S2-S3 和 S3-S4 区间)的列车处于牵引-牵引(++)、牵引-制动(+-)以及制动-制动(--)3 种运行工况，此时电力传输线上的电流变化如表 3 所示。由于是针对单一电网回路，故传输线电流与流过电力变压器#1 和#2 中的电流数值一致。

表 3 不同工况下回路电流情况  
Table 3 Circuit current under different working conditions A

列车工况	杂散电流	感应电流	偏磁电流
++	0.98	1.04	2.02
+-	0.25	1.41	1.66
--	-0.19	-0.089	-0.279

对比 3 种不同工况，杂散电流在列车均处于牵引状态时最大，均处于制动状态时最小；感应电流在两列车处于“牵引-制动”时最大，均处于制动工况时最小；最终侵入变压器的偏磁电流与杂散电流变化情况一致，在两列车均处于牵引状态时偏磁电流值最大。

进一步地，探究两列车均处于牵引状态，但在不相邻的两区间时回路中偏磁电流情况。结合模型情况，假定工况 1 表示两列车分别运行于 S1、S3 区间；工况 2 表示两列车分别运行于 S1、S4 区间；工况 3 表示两列车分别运行于 S1、S5 区间。由于 S1、S5 区间与电网单回路不存在并行路段，因此不会与电网回路有磁耦合作用，继而无感应电流产生。3 种工况下，电力输电线上的电流情况如表 4 所示。

表 4 不同运行位置下电流  
Table 4 Current under different operating positions A

工况	杂散电流	感应电流	偏磁电流
工况 1	-0.16	0.07	-0.09
工况 2	1.6	-0.14	1.46
工况 3	1	0	1

由表 4 可知，列车处于不相邻两区间时，尤其是两列车分别运行于 S1、S4 区间时，杂散电流、感应电流以及偏磁电流均达到最大值，这是因为此工况条件下地铁与电网线路并行距离最长，且地铁与#2 变压器距离最短，更容易发生杂散电流的泄露。

## 5 结论

本文基于地铁杂散电流与感应电流侵入电网回路的机理，分别建立单条地铁线路与电网回路的耦合和磁耦合仿真模型，探究杂散电流和感应电流时域及频域特性，分析列车数量及列车运行工况参量对最终侵入电网回路的偏磁电流影响，并得到如下结论：

1) 杂散电流和感应电流均为低频交流电流，集中在 0~0.05 Hz 频段；其中纯直流分量占比随回路与列

车所处供电区间相对位置情况变化；且杂散电流中纯直流量多于感应电流中纯直流量。

2) 单条地铁线路上，随着列车数量的增多，回路中的感应电流趋于饱和，杂散电流数值呈现先增大后减小的趋势，但介于电流方向原因，偏磁电流的变化规律不明显。

3) 双列车运行时，列车运行工况会影响单回路电网中偏磁电流的数值和方向。当两列车均处于牵引工况时，回路中产生的偏磁电流最大，变压器受偏磁电流影响最严重。

### 参考文献

- [1] CHEN D Z, FENG Z Y, WANG Q P, et al. Study of analysis and experiment for ability to withstand DC bias in power transformers[J]. IEEE transactions on magnetics, 2018, 54(11): 1-6.
- [2] LI X P, WEN X S, MARKHAM P N, et al. Analysis of nonlinear characteristics for a three-phase, five-limb transformer under DC bias[J]. IEEE transactions on power delivery, 2010, 25(4): 2504-2510.
- [3] 穆永保, 闫柯柯, 岳国良, 等. 地铁杂散电流地电场影响因素关键性研究[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(6): 1122-1129.  
MU Yongbao, YAN Keke, YUE Guoliang, et al. Research on the key factors affecting the ground electric field of subway stray current[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(6): 1122-1129.
- [4] 倪砚茹, 喻锐, 曾祥君, 等. 地铁杂散电流引起变压器直流偏磁电流的相关性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 136-143.  
NI Yanru, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Correlation analysis of transformer DC bias current caused by subway stray current[J]. Journal of electric power science and technology, 2021, 36 (6): 136-143.
- [5] 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. Characteristic quantity analysis of DC bias of power grid transformer caused by subway stray current[J]. China southern power grid technology, 2021, 15 (5): 129-134.
- [6] 罗远国, 刘君, 毛钧毅, 等. 轨地过渡电阻对电网地铁杂散电流分布影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 32-40.  
LUO Yuanguo, LIU Jun, MAO Junyi, et al. Analysis of the influence of rail-to-ground transition resistance on the distribution of stray current in power grid and subway[J]. Power grid and clean energy, 2021, 37(4): 32-40.
- [7] 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 on the distribution law and influence factors of subway stray current in urban power grid[J]. Power grid technology, 2021, 45(5): 1951-1957.
- [8] 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 Xiangjun, NI Yanru, et al. Modeling method of transformer DC bias current considering the influence of subway stray current[J]. Journal of electric power science and technology, 2021, 36(1): 192-198.
- [9] 伍国兴, 肖黎, 张繁, 等. 城轨杂散电流在电网系统中的分布特性仿真分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 39-43.  
WU Guoxing, XIAO Li, ZHANG Fan, etc Simulation and analysis of distribution characteristics of urban rail stray current in power grid system[J]. China southern power grid technology, 2019, 13(10): 39-43.
- [10] 澹台乐琰, 韩肖清, 王磊, 等. 多列车运行下地铁杂散电流建模仿真[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 7-16.  
TANTAI Leyan, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Modeling and simulation of stray current in subway with multi-train operation[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2020, 57(22): 7-16.
- [11] LIU G, WANG J, HU S M, et al. Study on the electromagnetic coupling relationship between subway and power grid[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, 2020: 1-4.
- [12] 郑丽楠. 地铁牵引供电接触网系统电磁场空间分布研究[J]. 中外企业家, 2019(1): 130.
- [13] 吴耀权. 地铁牵引供电接触网系统电磁场空间分布特点研究[J]. 中国高科技, 2018(23): 72-74.
- [14] 姚磊. 地铁牵引供电接触网系统电磁场空间分布研究[J]. 智能城市, 2018, 4(6): 70-71.
- [15] 姚石伟. 土壤介质电气参数的频率特性实验研究及其机理分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
YAO Shiwei. Experimental study on frequency characteristics of electrical parameters of soil medium and its mechanism analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

(编辑: 王艳菊)