

# 电网拓扑结构对地铁杂散电流分布特性研究

王文博<sup>1</sup>, 李文恒<sup>2</sup>

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092;

2. 广东电网有限责任公司韶关供电局, 广东韶关 512000)

**摘要:** 侵入变压器的杂散电流受列车工况、轨地过渡电阻、土壤结构和电网拓扑结构等的影响, 探究杂散电流影响因素是防治地铁周边电力变压器直流偏磁的重要手段之一。为研究电网拓扑结构对侵入变压器的杂散电流的影响, 构建地铁线路与电网回路动态耦合有限元模型。基于该模型, 分析电网单回路与地铁线路不同相对位置在3种典型拓扑电网结构下, 侵入变压器的杂散电流变化, 仿真结果表明: 在3种结构中, 放射形结构受杂散电流影响程度最高, 且随着电网回路数的增加, 侵入电网中的杂散电流总量增多。此外, 不论构成电网回路的两变压器处于地铁线路同侧或异侧, 随着地铁线路与电网回路之间夹角的减小, 侵入回路的杂散电流增大。

**关键词:** 城市轨道交通; 杂散电流; 直流偏磁; 耦合仿真模型; 电网拓扑结构

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)05-0110-07

## Topology of Power Grid and Characteristics of Stray Current Distribution in Metro Systems

WANG Wenbo<sup>1</sup>, LI Wenheng<sup>2</sup>

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092;

2. Shaoguan Power Supply Company of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shaoguan, Guangdong 512000)

**Abstract:** The stray current intruding into transformers of metro systems is determined by train operating conditions, rail-to-ground transition resistance, soil structure, and grid topology. Exploring the factors affecting the stray current is an important means of preventing and controlling the DC bias of power transformers around a metro system. A dynamic coupling finite element model of a metro line and grid circuit was constructed to study the influence of grid topology on stray currents intruding into the transformer. Based on this model, the variation in stray currents in the intruded transformer was analyzed for different relative positions of the single circuit of the grid and metro line under three typical topologies of the power grid structure. The results show that among the three structures, the radial structure is the most affected by stray currents, and the total amount of stray currents intruding into the grid increases with an increase in the number of grid loops. In addition, regardless of whether the two transformers forming the grid loop are on the same side of the metro line or on opposite sides, the stray current intruding into the loop increases as the angle between the metro line and the grid loop decreases.

**Keywords:** urban rail transit; stray current; DC bias; coupling simulation model; power grid topology

收稿日期: 2022-12-28 修回日期: 2023-06-08

第一作者: 王文博, 男, 硕士, 助理工程师, 从事城市电网中变压器直流偏磁防护, wangwenbo@smedi.com

引用格式: 王文博, 李文恒. 电网拓扑结构对地铁杂散电流分布特性研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 110-116.

WANG Wenbo, LI Wenheng. Topology of power grid and characteristics of stray current distribution in metro systems[J].

Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 110-116.

# 1 研究背景

随着我国“双碳”战略的提出和推进,城市轨道交通作为城市承载绿色、低碳出行的骨干交通方式,将迎来持续稳定的发展机遇期。未来城市地铁线路将愈发密集化和网络化,地铁系统与电网系统的交互程度不断升高,与此同时,由地铁引发的杂散电流造成周边变压器直流偏磁现象也越来越严重。在广州、上海等地铁密集城市,地铁附近变压器发生周期性直流偏磁现象,其中广州地铁3号线附近某变电站在地铁运行高峰期时,中性点电流最大可达50 A。而长时间的直流偏磁对变压器本体存在不利影响,如长期的低频振动会导致变压器内部螺栓松动、撑条脱落、绕组移位等问题,严重影响电网及设备安全稳定运行,影响城市供电质量<sup>[1-8]</sup>。

解决地铁杂散电流引起的变压器直流偏磁问题的关键在于探明杂散电流形成原因及影响因素并加以抑制,为此有很多学者做出了相关研究。文献[9]中在对长沙某地区变压器中性点电流、噪声同步监测后发现,其与地铁线路的运营时间高度吻合,深入分析得知地铁供电系统中钢轨存在对地压降且难以做到完全绝缘,因而地铁杂散电流会经过地下土壤或金属管线等,从中性点接地变压器侵入电力系统。文献[10]研究发现有无排流网对走行轨电流、走行轨电压及杂散电流基本无影响,但排流网可回流大部分杂散电流,使得泄露进大地的杂散电流降低,并在此基础上探讨发现,变电所间距、过渡电阻、纵向电阻对杂散电流均存在影响。文献[11]提出了多列车下杂散电流建模方

法,分析地铁等效四层模型中各类纵向电阻及过渡电阻对杂散电流的影响;文献[12]通过构建杂散电流动态模型分析发现,钢轨纵向电阻和轨-地过渡电阻是影响变压器直流偏磁的关键因素,机车取流和供电距离为重要因素。上述模型虽然考虑了多列车情况,但在探究影响因素时,以地铁系统侧的影响因素为主。文献[13]基于实测数据发现,变电站位置对变压器直流偏磁特征量存在一定影响;文献[14]利用模拟实验发现接地网埋深会影响杂散电流分布。这些研究肯定了电力系统侧也存在影响侵入变压器中性点的杂散电流的因素,但在分析时将各个站点孤立考虑,忽略了电网拓扑结构对侵入变压器中性点的杂散电流影响。

鉴于此,从杂散电流侵入变压器的机理出发,针对地铁双端供电的运行模式,基于COMSOL Multiphysics软件搭建地铁系统与电网系统动态耦合有限元模型,研究单电网回路与地铁线路不同相对位置对于侵入变压器中性点杂散电流的影响;进一步探究3种典型电网拓扑结构对侵入变压器中性点的杂散电流的影响机制,为地铁周边电力变压器直流偏磁防治提供理论依据。

# 2 杂散电流计算

图1为轨道交通杂散电流侵入示意图。国内城市轨道交通大多采用直流牵引供电方式,牵引电流由直流牵引变电所正极流出,经接触轨、列车、钢轨流回变电所负极。新修建的地铁线路钢轨绝缘性能良好,杂散电流泄露量极少。随着地铁运营线路的增多以及发车班次的增加,列车车轮和钢轨磨损,道床周边

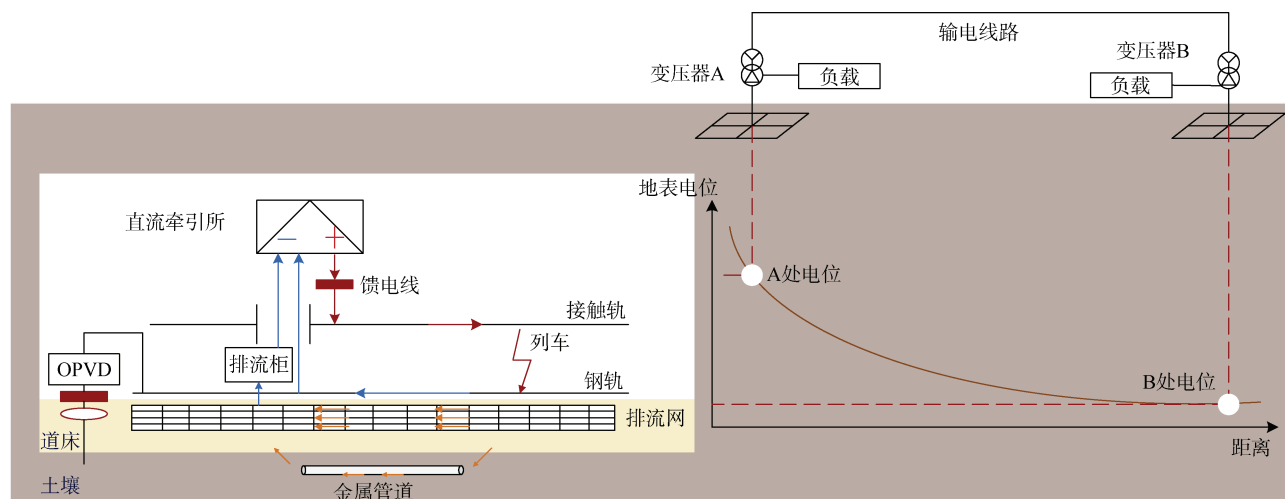


图1 杂散电流侵入交流电力系统示意

Figure 1 Schematic of stray current intrusion into an AC power system

粉尘等污秽累积,使得钢轨的绝缘性能降低,大量的纵向牵引电流泄露进土壤形成杂散电流。大部分的杂散电流都被排流网收集,由排流柜送回变电所负极,但仍有部分杂散电流会侵入周边埋地金属管道和接地网。

在电力系统中,正常安全运行情况下,若 A、B 两变电站变压器中性点都接地,一般认为两变电站等电势。当一侧变电站变压器附近存在杂散电流,地表电位会发生改变,此时两变压器之间出现电势差,杂散电流从 A 接地网侵入变压器,进入电力系统内部,最终从 B 站接地网流出。由于杂散电流频率较工频极低,可近似为直流,在此过程中 A、B 变电站中性点流过直流电流产生直流磁通,增大了变压器原有磁通,使得磁滞曲线偏移至饱和甚至过饱和区域,引起变压器直流偏磁现象,威胁变压器安全稳定的运行。

## 2.1 数学模型

为了定量评估地铁杂散电流分布情况,借鉴分布参数建模思想,并将钢轨、排流网、结构钢筋、大地土壤分割成无数个微分段,四者之间通过  $\pi$  型过渡电阻进行纵向连接,搭建钢轨-排流网-结构钢筋-大地 4 层电阻网络等效模型。双边供电方式下杂散电流模型等值电路如图 2 所示。

图中  $U_1$ 、 $R_a$ 、 $U_2$ 、 $R_b$ 、 $U_3$ 、 $R_c$  分别为钢轨和排流网之间的电压与过渡电阻、排流网和结构钢筋之间的电压与过渡电阻、结构钢筋和大地的电压与过渡电阻,  $U_g$ 、 $U_p$ 、 $U_m$ 、 $I_g$ 、 $I_p$ 、 $I_m$  分别为钢轨、排流网、结构钢筋的电压与电流,  $R_g$ 、 $R_p$ 、 $R_m$ 、 $R_d$  分别为钢轨、排流网、结构钢筋、大地的纵向电阻。

为了便于解析模型的建立及计算,在模型建立时进行以下假设:①忽略车体占用空间的影响,将列车

等效成一个移动的电流源  $I_s$ ,列车位置  $x$  与牵引电流大小可通过图 3 获取;牵引变电所位于边界且接地方式为不接地;②电阻参数都是均匀分布;③地铁线路长度为  $L$ 。

基于基尔霍夫定律与节点电压法,建立如下电路微分方程组:

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \\ I_{g2}(x) \\ I_{p2}(x) \\ I_{m2}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -R_g & R_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_p & R_m \\ 0 & 0 & 0 & -R_d & -R_d & -R_m - R_d \\ -\frac{1}{R_a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_a} & -\frac{1}{R_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_b} & -\frac{1}{R_c} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \\ I_{g2}(x) \\ I_{p2}(x) \\ I_{m2}(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

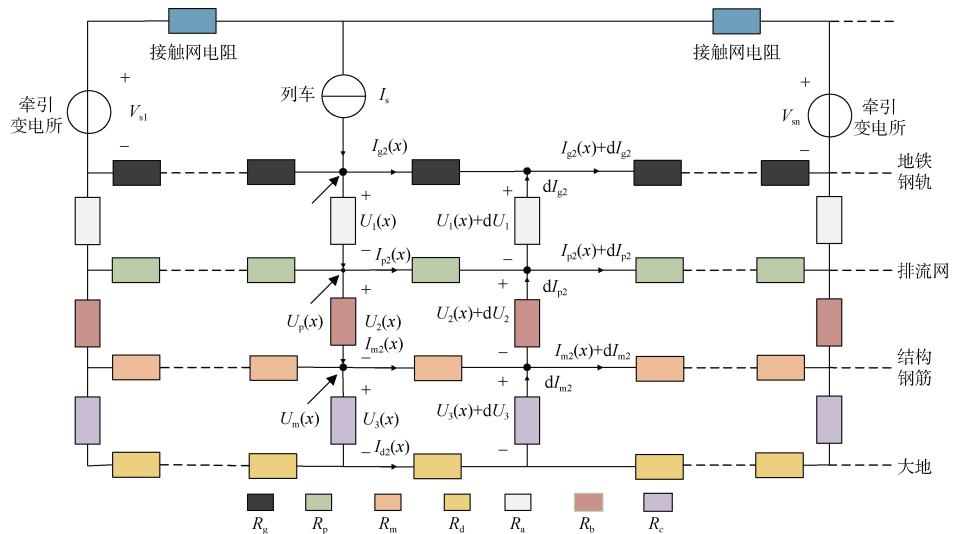


图2 地铁杂散电流微元分布模型

Figure 2 Stray current micro-element distribution model

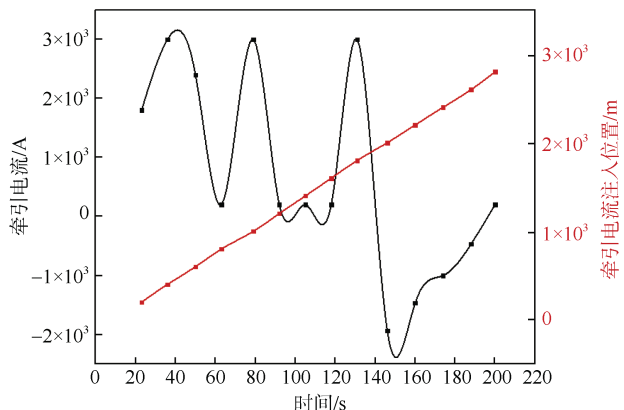


图3 列车牵引电流和位置函数

Figure 3 Train traction current and position functions

$$C=\frac{x}{L} \tag{2}$$

$$\frac{I_{g2}(x)}{I_{g1}(x)}=\frac{I_{p2}(x)}{I_{p1}(x)}=\frac{I_{m2}(x)}{I_{m1}(x)}=\frac{x}{L-x} \tag{3}$$

电路微分方程组的边界条件如下所示：

$$\begin{cases} I_{g2}(0)=0 \\ I_{p2}(0)=0 \\ I_{m2}(0)=0 \\ U_1(0)=0 \\ U_2(0)=0 \\ U_3(0)=0 \end{cases} \tag{4}$$

联立式(1)~(4)，求解该非齐次线性微分方程，即可得到沿线地网结构层电压及电流分布。

基于镜像法，对地表电位进行计算：

$$V(x,y,z)=\frac{\rho I}{4\pi}\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}} \tag{5}$$

式中  $x, y, z$  为待求点的坐标； $x_0, y_0, z_0$  为电源点的坐标； $\rho$  为大地电阻率， $\Omega\cdot\text{m}$ ； $I$  为电源点的电流。

2.2 耦合仿真模型

基于 COMSOL Multiphysic 有限元软件，搭建地铁系统与交流电网系统的动态耦合模型，该模型分为 3 个部分，分别是地铁系统、大地系统、交流电网系统。

2.2.1 地铁系统

地铁系统作为杂散电流的来源，在模型中由 2 根钢轨、牵引变电所、排流网和隧道组成。地铁列车实际运营过程中通常采用双边供电方式，为了模拟牵引回流时电流注入钢轨，将电流激励注入钢轨某一位置。单列车牵引电流和位置函数如图 3 所示，在模型中，采用终端注入的方式，将地铁列车设置为牵引电流注入点，牵引变电站设置为牵引电流回流点，并根据电流分配关系设置牵引变电站的电流，见表 1。

表 1 地铁系统模型参数设置

Table 1 Parameter settings of the metro system model

参数名称	数值
钢轨电阻率/ $\text{m}\Omega\cdot\text{km}$	40
钢轨半径/mm	50
钢轨绝缘层电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	200 000
钢轨绝缘层厚度/mm	10
空气电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	$1\times 1\ 018$

建模过程中牵引变电站与地铁列车运行轨道相连接，在地铁运行轨道下方安装有过渡电阻，其通过过渡电阻与混凝土隧道接触，杂散电流收集装置安装在

地铁列车运行轨道下方的混凝土隧道中，被混凝土包裹，混凝土隧道位于整个地铁运行轨道的外侧。地铁隧道内部模型如图 4 所示。

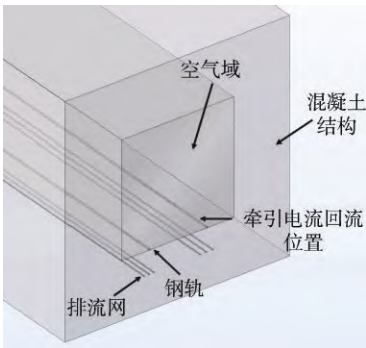


图 4 地铁混凝土隧道示意

Figure 4 Schematic of a concrete tunnel in the metro line

2.2.2 交流电网系统

电力系统由变压器、电缆、架空线路和接地系统组成。在区域中，电力系统中的地下变电站通过地下电缆与其他变电站相连，地上变电站之间通过架空线路相连。模型中除接地系统外所有导体均设置绝对绝缘涂层，使杂散电流只能从接地系统流入或流出电力系统，便于分析。在电力系统中，因为直流电流受设备直流电阻的影响，故对电力系统进行简化，以直流电阻组成的电阻网络构建电力系统模型。具体参数见表 2。

表 2 交流电网系统参数设置

Table 2 Parameter settings for the AC power system

参数名称	数值
接地网电阻率/ $\Omega\cdot\text{km}$	2
接地线电阻率/ $\Omega\cdot\text{km}$	0.5
220 kV 变压器等效电阻/ $\Omega$	0.5
输电线路电阻率/ $\Omega\cdot\text{km}$	0.01

2.2.3 大地系统

大地系统作为杂散电流入侵交流电网系统的流通途径，不同的土壤结构直接影响着杂散电流分布，而大地等效电阻主要取决于土壤电阻率的大小，故本文考虑对大地土壤结构进行水平分层，具体分层结构如图 5 所示。

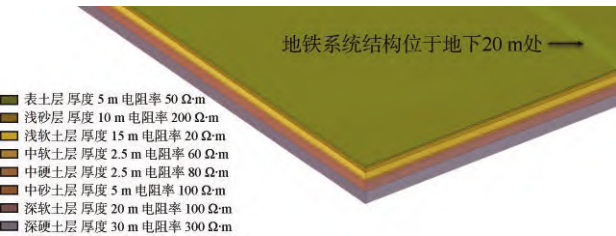


图 5 大地水平分层结构示意图

Figure 5 Diagram of the geodetic horizontal hierarchical structure



### 3 影响因素分析

#### 3.1 不同相对位置对杂散电流的影响

图6为电网单回路中杂散电流波形,图中假定杂散电流正方向为A站流向B站,杂散电流波形与地铁牵引电流波形高度相似,侵入回路中的杂散电流最大可达7.56 A,依据《电力变压器技术规范第1部分:通用》中规定,中性点接地的变压器,高压相绕组至中性点流过的直流偏磁电流至多为4 A(500 kV及以上变压器至多为6 A),图中部分时刻的杂散电流远超标准规定。

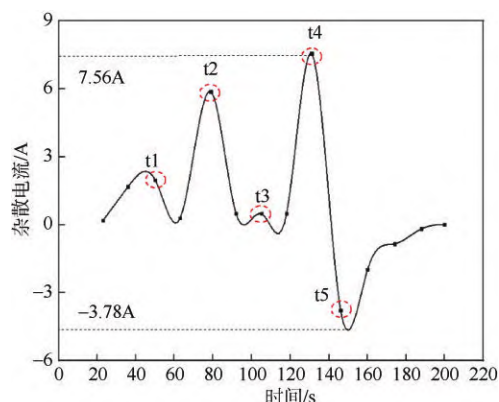


图6 单回路中杂散电流波形

Figure 6 Stray current waveform in a single circuit

电网单回路与地铁线路存在两种典型相对位置:①电网回路全部处于地铁线路某一侧;②地铁线路与电网回路存在空间上的交错。假定其他条件及参数一致,构成闭合回路的其中一个变电站位置固定为A,另一变电站位置从垂直的 $90^\circ$ 起,每次减少 $30^\circ$ ,具体的位置排布如图7所示。仿真时间选定 $t_1 \sim t_5$ 这5个特殊时刻,随着角度的变化,侵入回路的杂散电流变化情况如图8所示。

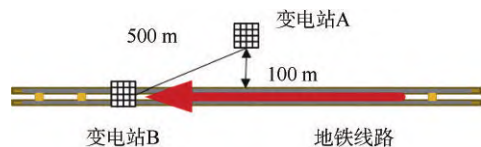


图7 电网回路与地铁线路位置情况

Figure 7 Location of grid circuits and metro lines

由图9可知,对于同一电网单回路,在选取的5个时刻中,当电网回路与地铁的相对位置从 $AB_1$ 至 $AB_5$ 时,侵入回路的杂散电流数值上均增大,且在 $AB_5$ 位置处激增;而当相对位置从 $AB_5$ 变化至 $AB_7$ 时,侵入回路的杂散电流减小。此外,当电网回路处于地铁线

路同一侧时,杂散电流的变化情况要比电网回路跨越地铁线路时明显。

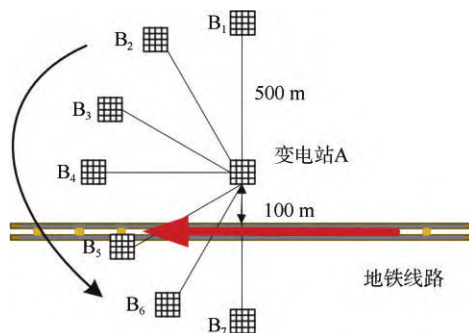


图8 不同夹角下电网回路与地铁线路相对位置分布情况

Figure 8 Relative position of metro line and power network circuit

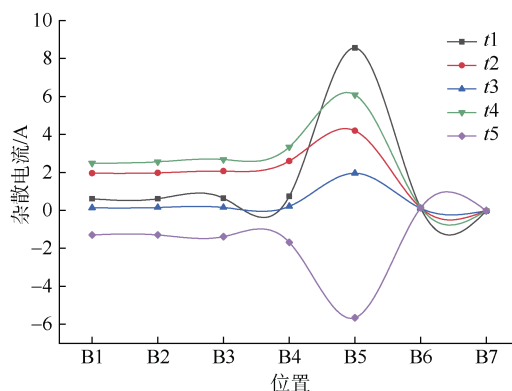


图9 不同时刻 $AB_1 \sim AB_7$ 回路中杂散电流情况

Figure 9 Stray currents in the  $AB_1 \sim AB_7$  circuit at different times

#### 3.2 电网拓扑结构对杂散电流的影响

电网是典型的以网络形式存在的系统,而牢靠的网架结构是保证电力系统运行安全与稳定性的基础。随着现代社会电力需求的日益增长,电力网络由初期的结构简单、小规模独立运行向大规模互联、复杂化演变,电网结构越来越复杂多样,从不同的角度出发,其分类形式也多种多样。其中按节点间拓扑联系划分,典型电网结构可分为放射形、链形和环形3种,见图10。

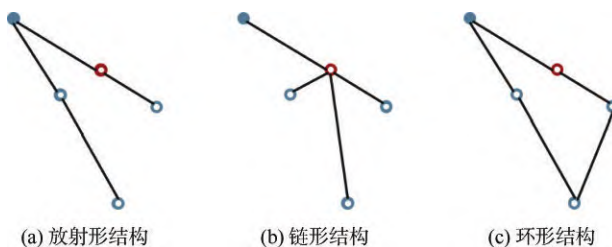


图10 三种典型电网结构示意图

Figure 10 Diagram of three typical power grid structures

杂散电流在电网分布情况受列车牵引状态、接地变压器数量、各变压器的地理位置等因素影响,为了探究电网拓扑结构对杂散电流分布的影响,假定3个电网结构的变压器数量和地理位置都是一致的,且列车位于启动结束位置1 000 m处,牵引电流3 000 A,即 $t_2$ 时刻。通过改变各变压器间的拓扑联系,通过仿真计算各个变压器中性点电流大小。

如图11所示,放射形的电网最易受杂散电流入侵,在放射形结构中,电网回路共有4条,入侵整个拓扑电流绝对值总量高达16.32 A,其中变压器B在整个

电网中受杂散电流入侵最严重,中性点电流为6.51 A,原因是变压器B是整个放射形电网的枢纽变压器,且离列车位置最近,处于整个电网系统地表电位最高的地方,杂散电流从变压器B的中性点处入侵到电网内部,并通过输电线路向远处地表电位低的变压器传播。值得注意的是,虽然变压器C离地铁列车最远,但是依旧出现了严重直流偏磁现象,中性点电流为-4.72 A,这是因为变压器C距离变压器B是最远的,两者之间电势差也最大,导致产生杂散电流更容易流向变压器C。

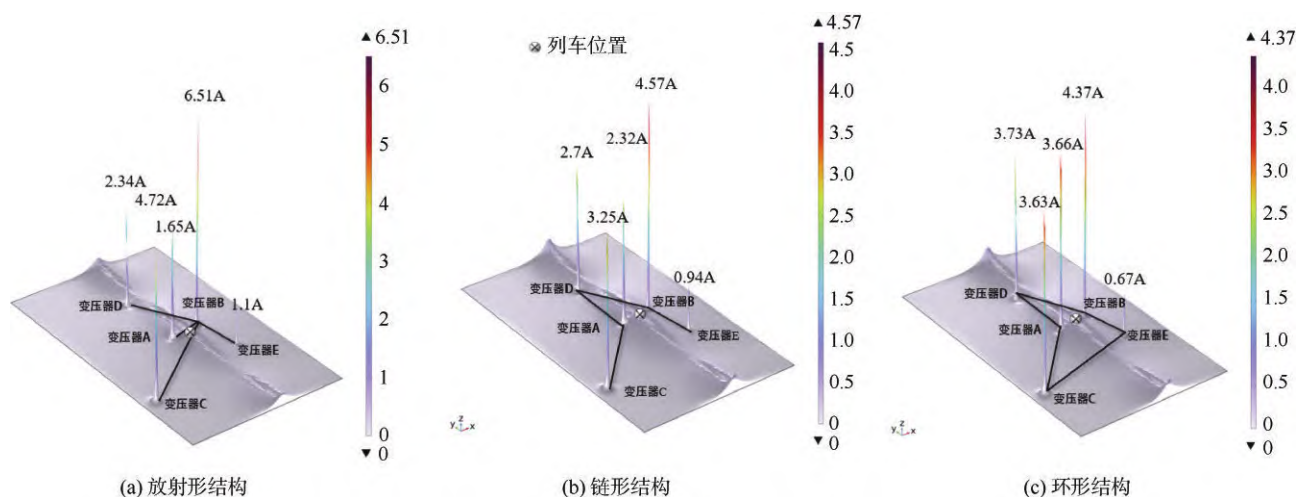


图11 3种典型电网拓扑结构下各变压器中性点电流分布

Figure 11 Current distribution at the neutral point of each transformer under three typical grid topologies

入侵环形结构的杂散电流绝对值总量为16.06 A,相比放射形结构,环形结构的电网回路多一条,意味着杂散电流侵入电网的路线增多,故杂散电流值也比较大,但是由于各连接变压器之间的接地网电势差比放射形小很多,所以受影响程度比放射形结构小。

相比于前两者结构,链形结构受杂散电流影响程度小很多,入侵电网系统的电流绝对值总量是13.78 A。这是因为在链形结构中,电网回路数为4条且各连接变压器间接地网电势差相比于放射形要小很多。

如图12所示,变电站接地网周边的地表电位产生畸变现象,这是因为电网变压器接地网的小电阻特性,使得杂散电流更容易侵入该点位变压器的中性点;而在3种不同电网拓扑结构下的地表电位分布是一样的,说明地表地位分布只和列车运行状态、变压器接地电阻大小及位置等因素有关,与电网拓扑结构无关。

综上所述,在3种典型电网拓扑结构中,放射形结构受地铁杂散电流影响程度最高,其枢纽变压器中性点电流高达6.51 A,在对杂散电流进行防护时应重

点关注此类变压器;当列车处于加速状态时,靠近地铁线路的变压器容易成为杂散电流侵入电力系统的入口,而远离地铁线路的变压器则容易成为出口,且两连接变压器间距离越长,变压器受杂散电流影响程度越高;随着电网回路增加,侵入回路的杂散电流总量也增多,对应的变压器受到的杂散电流威胁更大。

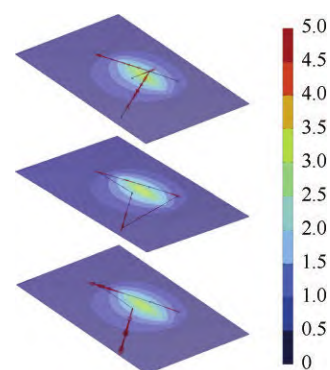


图12 3种典型电网拓扑结构下地表电位分布  
Figure 12 Ground potential distribution under three typical grid topologies

## 4 结论

本文搭建了地铁线路与电网回路动态耦合有限元模型,仿真分析地铁线路与电网回路不同相对位置时,侵入电网回路中的杂散电流情况,并探究3种典型电网拓扑结构对于侵入电网的杂散电流的影响,结果如下:

1) 当电网回路全部处于地铁线路一侧时,随着两者夹角的增大,侵入回路中的杂散电流增大,流向不变;当电网回路在空间上跨越地铁线路时,随着两者夹角的增大,侵入回路的杂散电流减少。

2) 随着电网拓扑结构的复杂,侵入电网的杂散电流总量也在增多;两连接变压器间距离越长,二者接地网电势差越大,则侵入电网回路中杂散电流越大。

3) 在3种电网拓扑结构中,放射形结构受杂散电流影响程度最高,其枢纽变压器中性点电流高达6.51 A,在对杂散电流进行防护时应重点关注此类变压器。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘宇,樊佳慧,贺力霞,等.2016年中国城市轨道交通运营线路统计与分析[J].都市轨道交通,2017,30(1):4-6.  
LIU Yu, FAN Jiahui, HE Lixia, et al. China's operational urban rail transit lines, 2016: statistics and analysis[J]. Urban rapid rail transit, 2017, 30(1): 4-6.
- [3] 顾靖达,杨晓峰,郑琼林,等.基于不同接地方式与列车工况的负阻变流器牵引供电系统轨道电位与杂散电流[J].电工技术学报,2021,36(8):1703-1717.  
GU Jingda, YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, et al. Rail potential and stray current on negative resistance converter traction power system under different grounding schemes and train conditions[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(8): 1703-1717.
- [4] 易强,杨帆,林永宏,等.广州地铁对换流变中性点直流偏磁影响及其仿真分析[J].变压器,2020,57(11):41-46.  
YI Qiang, YANG Fan, LIN Yonghong, et al. Simulation analysis and research on DC bias of transformer neutral point caused by Guangzhou metro[J]. Transformer, 2020, 57(11): 41-46.
- [5] CHEN Dezhi, FENG Zhiyu, WANG Qingpeng, 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.
- [6] 王格万,潘超,郑逸丹,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.
- [7] 伍国兴,陈龙,史云涛,等.深圳变电站500 kV主变压器直流偏磁现象测试及抑制分析[J].广东电力,2020,33(1):118-124.  
WU Guoxing, CHEN Long, SHI Yuntao, et al. Analysis on test and suppression of DC bias of 500 kV main transformer in Shenzhen substation[J]. Guangdong electric power, 2020, 33(1): 118-124.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 马德良,方江敏,钱瑶虹.排流网情况下地铁杂散电流分布数值模拟研究[J].机电工程,2017,34(12):1465-1468.  
MA Deliang, FANG Jiangmin, QIAN Yaohong. Numerical simulation of stray current distribution in metro network with drainage[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2017, 34(12): 1465-1468.
- [11] 澹台乐瑛,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.
- [12] 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. Key influencing factors of subway stray current geoelectric field[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(6): 1122-1129.
- [13] 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.
- [14] 李琦,黄华,桂俊平,等.杂散电流干扰下变电站接地网保护研究[J].水电能源科学,2017,35(9):182-186.  
LI Qi, HUANG Hua, GUI Junping, et al. Study of substation ground grid protection under stray current interference[J]. Water resources and power, 2017, 35(9): 182-186.

(编辑:王艳菊)