

双流制供电线路变压器直流偏磁问题研究

李雪飞¹ 孙文斌¹ 关超¹ 代骏² 刘炜²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 西南交通大学电气工程学院, 611730, 成都)

摘要 [目的] 为保障双流制线路中牵引变压器的安全性, 防止因直流偏磁电流过大而引起变压器振动和绕组温升增加, 进而导致变压器励磁电流畸变严重的问题, 有必要研究双流制供电线路变压器的直流偏磁程度。[方法] 介绍了双流制线路变压器直流偏磁问题; 将线路划分为不同小段, 将直流区段列车视为功率源, 交流区段列车和牵引变压器均视为电阻, 建立双流制系统链式电路模型。采用连续线性潮流计算方法, 计算某双流制线路交流区段变压器的直流偏磁电流, 并将其与实测数据进行对比, 验证所提计算方法的有效性。[结果及结论] 变压器的直流偏磁电流在某些时刻严重超标。所提计算方法具有导纳矩阵阶数最低、计算速度快等特点, 适用于双流制线路变压器的直流偏磁电流动态计算。

关键词 轨道交通; 双流制线路; 变压器直流偏磁

中图分类号 U226.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.005

DC Bias in Transformers of Dual Current Power Supply Lines

LI Xuefei¹, SUN Wenbin¹, GUAN Chao¹, DAI Jun², LIU Wei²

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611730, Chengdu, China)

Abstract [Objective] To ensure the safety of traction transformers in dual current power supply lines and prevent issues such as transformer vibration and winding temperature increase caused by excessive DC bias current, which can lead to severe distortion of excitation current, it is essential to study the degree of DC bias in transformers of dual current power supply lines. [Method] The DC bias problem in transformers of dual current power supply lines is introduced. By dividing the line into smaller sections, with trains in the DC segment modeled as power sources, and trains in the AC segment and traction transformers modeled as resistances, a chain-circuit model for the dual current power supply system is established. Using continuous linear load flow calculation method, the DC bias cur-

rent of transformers in the AC segment of a dual current power supply line is computed. The calculated results are compared with field-measured data to verify the validity and accuracy of the proposed method. [Result & Conclusion] The DC bias current in transformers significantly exceeds the standard at certain times. The proposed calculation method, characterized by minimal admittance matrix order and fast computation speed, is suitable for dynamic calculations of DC bias currents in transformers of dual current power supply lines.

Key words rail transit; dual current line; transformer DC bias current

双流制列车可在交流、直流线路贯通运行, 但需在交流、直流线路交界处设置交直转换段, 以完成不同供电制式的切换。当列车跨越交直转换段时, 直流区段列车的部分回流电流可经过转换段的列车车体进入交流区段, 引起交流区段车载变压器和牵引所牵引变压器的直流偏磁问题, 使得变压器振动、噪声和绕组温升均有所增加, 励磁电流严重畸变^[1-5]。

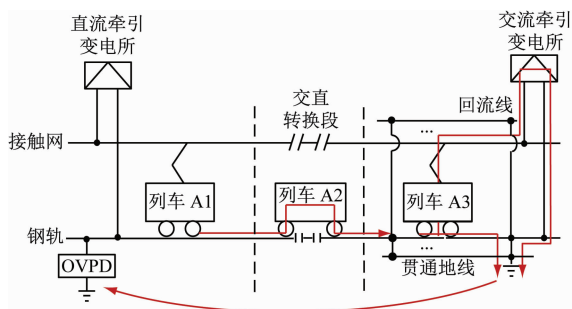
目前, 已有较多文献对变压器的直流偏磁问题开展了研究。文献[2]通过分析变压器几种磁饱和特性, 指出了直流偏磁的特殊性及其对设备的危害。文献[3]提出了直流偏磁影响的量化分析方法。文献[4]研究并分析了电力变压器在直流偏磁情况下的运行特性。文献[5]分析了直流偏磁电流对主变压器稳定性及寿命的影响, 并提出了一种新型电容隔离装置来解决该问题。

针对双流制列车, 文献[6]提出一种双流制线路的供电系统建模方法。文献[7]的研究结果表明, 在线路条件允许情况下, 当双流制列车通过接触网交直转换段时, 建议采用不停车、不降弓的车上切换方案。文献[8]分析了双流制列车配合信标通过交直转换段的过程, 并计算了列车通过中性段的惰行距离。然而, 目前尚未有文献针对双流制线路变压器的直流偏磁问题进行研究。

某线路调试线进行牵引变压器直流偏磁电流测量时发现,变压器直流偏磁电流值严重超出国家相关标准。为了确认在正线运行时是否存在牵引变压器直流偏磁问题,本文对双流制线路牵引供电系统进行建模,研究交流区段变压器的直流偏磁问题。

1 双流制线路变压器直流偏磁问题

双流制线路包括直流区段、交流区段及交直转换段,其结构示意图及电流侵入原理示意图如图 1 所示。直流区段、交流区段的额定电压分别为直流 1 500 V 和单相工频 25 kV。在交直转换段,接触网设有电分相,钢轨处设有绝缘节,以实现交流、直流区段接触网和钢轨的隔离。



注:OVPD—过压保护装置。

图 1 双流制线路结构及电流侵入原理示意图

Fig. 1 Diagram of dual current line structure and current infiltration principle

当列车跨接交直转换段绝缘节两端钢轨时,直流区段其他列车的回流电流可经过交直转换段处的列车侵入交流区段,一部分通过交流区段的钢轨和牵引变电所接地网流入大地,另一部分则通过交流区段列车工作接地、车载牵引变压器、受电弓、接触网、牵引所变压器和接地网流入大地。直流牵引所一般配置了 OVPD,当 OVPD 闭合时,其会为直流偏磁提供回流路径,可能会导致牵引变压器直流偏磁。

2 双流制系统链式电路模型

本文将整条线路划分为直流、交流及交直转换段 3 个部分,对各部分划分切面,并进一步形成系统的节点导纳矩阵。分析直流偏磁问题,需建立牵引供电系统的直流模型。

牵引网一般用导纳矩阵描述。切面 i 与相邻切

面 $i+1$ 之间的互导纳矩阵为 $Y_{i,i+1}$,其值等于两切面间牵引网导纳矩阵的负值。切面的自导纳矩阵 Y_{ii} 可分为两部分:①由切面 i 的横向连接(包括通过导线间横向连接、接地和负荷等)引起的自导纳 $Y_{con,ii}$;②切面 i 与相邻切面 $i-1$ 通过牵引网连接引起的互导纳 $Y_{i,i-1}$ 、切面 i 与相邻 $i+1$ 通过牵引网连接引起的互导纳 $Y_{i,i+1}$ 。

则切面 i 的自导纳矩阵可以表示为:

$$Y_{ii} = Y_{con,ii} - Y_{i,i-1} - Y_{i,i+1} \quad (1)$$

2.1 牵引供电系统数学模型

采用文献[9]提出的链式电路模型分别对牵引供电系统各元件进行建模。

2.1.1 牵引网纵向连接

交流区段一般有回流线,而直流区段一般不设回流线。交流区段牵引网两切面之间的互导纳矩阵 $Y_{i,i+1}$ 为:

$$Y_{i,i+1} = -\frac{1}{l} R_{TPN}^{-1} = -\frac{1}{l} \text{diag}^{-1}(R_{T1}, R_{R1}, R_{F1}, R_{T2}, R_{R2}, R_{F2}) \quad (2)$$

式中:

l ——牵引网长度;

R_{TPN} ——牵引网的单位电阻矩阵;

R_{T1}, R_{T2} ——上行和下行接触网单位电阻;

R_{R1}, R_{R2} ——上行和下行钢轨单位电阻;

R_{F1}, R_{F2} ——上行和下行回流线单位电阻。

对于直流区段牵引网,可删去式(2)中的回流线单位电阻,故导纳矩阵 $Y_{i,i+1}$ 为 4 阶方阵,切面 i 与切面 $i+1$ 间的互导纳矩阵为式(2)的负值。

2.1.2 牵引网横向连接

对于交流牵引网,若在切面 i 上仅采用上行、下行钢轨横向连接,则其自导纳 $Y_{con1,ii}$ 可以表示为:

$$Y_{con1,ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta & 0 & 0 & -\Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta & 0 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

Δ ——无穷大,本文取为 10^6 。

式(3)中的导体排序为上行接触网、上行钢轨、上行回流线、下行接触网、下行钢轨和下行回流线。

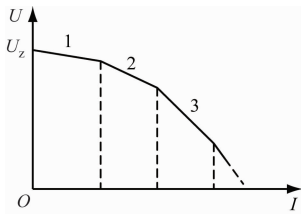
在切面 i 上,若上行钢轨、下行钢轨、接触网均采用横向连接,则其自导纳 $Y_{con2,ii}$ 可以表示为:

$$Y_{\text{con2},ii} = \begin{bmatrix} \Delta & 0 & 0 & -\Delta & 0 & 0 \\ 0 & \Delta & 0 & 0 & -\Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\Delta & 0 & 0 & \Delta & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta & 0 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于直流区段牵引网,其导纳矩阵表达式删去回流线对应的行和列即可。

2.1.3 直流牵引所切面

直流牵引网整流机组外特性一般使用其分段折线特性^[7],如图2所示。



注: U —整流机组电压; I —整流机组电流; U_z —戴维南等值电路电压; 图中数字1、2、3表示整流机组的3段工作曲线。

图2 整流机组外特性

Fig. 2 External characteristics of rectifier unit

在正常工作时,整流机组工作于第1段折线,即图2中的线段1。第1段折线斜率的绝对值即为戴维南等值电路的电阻 R_z ,其倒数记为 G_z ,即 $G_z = 1/R_z$ 。牵引所切面 i 的自导纳矩阵 $Y_{\text{con3},ii}$ 可以表示为:

$$Y_{\text{con3},ii} = \begin{bmatrix} G_z + \Delta & -G_z & -\Delta & 0 \\ -G_z & G_z + \Delta & 0 & -\Delta \\ -\Delta & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & -\Delta & 0 & \Delta + \frac{1}{R_v} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:

R_v ——直流牵引所钢轨电位限制装置 OVPD 等值电阻。

当 OVPD 闭合时, R_v 取值为牵引变电所接地网接地电阻 $R_{e,dc}$,即 $R_v = R_{e,dc}$;当 OVPD 断开时, R_v 取值为无穷大,即 $R_v = \Delta$ 。

直流牵引所切面 i 的注入电流向量 $I_{1,i}$ 为:

$$I_{1,i} = \begin{bmatrix} \frac{U_z}{R_z} & -\frac{U_z}{R_z} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

2.1.4 直流区段列车切面

列车切面 i 的注入电流向量 $I_{2,i}$ 为:

$$I_{2,i} = \begin{bmatrix} -\frac{P_{dcA}}{U_{i,trA}} & \frac{P_{dcA}}{U_{i,trA}} & -\frac{P_{dcB}}{U_{i,trB}} & \frac{P_{dcB}}{U_{i,trB}} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

式中:

P_{dcA} ——上行列车 A 功率;

P_{dcB} ——上行列车 B 功率;

$U_{i,trA}$ ——上行列车 A 处接触网与钢轨电压差;

$U_{i,trB}$ ——上行列车 B 处接触网与钢轨电压差。

当某切面仅上行(下行)存在列车时,可令

$P_{dcB} = 0$ ($P_{dcA} = 0$)。

2.1.5 交流牵引所切面

对于交流牵引所,可根据牵引变压器接线方式和参数确定其直流电阻,牵引变压器常采用 Vv 接线方式。对于某供电臂而言,牵引变压器实际为单相变压器,通过其短路损耗、额定电压 U_N 和额定容量 S_N 可计算其低压侧绕组电阻的倒数,即变压器的绕组电导 G_y 。

牵引网切面 i 的自导纳矩阵 $Y_{\text{con4},ii}$ 为:

$$Y_{\text{con4},ii} = \begin{bmatrix} G_y + \Delta & -G_y & 0 & -\Delta & 0 & 0 \\ -G_y & G_y + 2\Delta & -\Delta & 0 & -\Delta & 0 \\ 0 & -\Delta & \Delta & 0 & 0 & 0 \\ -\Delta & 0 & 0 & \Delta & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta & 0 & 0 & 2\Delta + G_{e,ac} & -\Delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Delta & \Delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$G_{e,ac}$ ——交流牵引变电所接地网接地电阻的电导。

2.1.6 交流区段列车切面

若列车的自导纳矩阵 $Y_{\text{con5},ii}$ 为:

$$Y_{\text{con5},ii} = \begin{bmatrix} G_{a1} & -G_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_{a1} & G_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{a2} & -G_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_{a2} & G_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:

G_{a1} 、 G_{a2} ——上行和下行列车车载变压器高压侧绕组电阻的电导。

若上行(下行)线路无列车,则可令 $G_{a1} = 0$ ($G_{a2} = 0$)。

2.1.7 交直转换段自导纳与互导纳矩阵

对于交直转换段,直流区段末端切面 i 和交流区段首端切面 $i+1$ 的自导纳、两切面间的互导纳作如下定义:①假设交直转换段两侧切面之间的接触网通过导纳 Y_T 连接,钢轨通过导纳 Y_P 连接;②直流区段和交流区段之间的接触网断开,为避免系统导纳矩阵奇异,直流接触网、交流接触网之间用 1 个非常小的导纳取值 δ 进行连接,即 $Y_T = \delta$,可取 $\delta = 10^{-6}$;③直流区段和交流区段之间的钢轨断开。当无列车跨越时,绝缘节两侧钢轨之间的导纳 $Y_P = \delta$ 。

交直转换段两侧切面间的互导纳矩阵 $Y_{i,i+1}$ 为:

$$Y_{i,i+1} = - \begin{bmatrix} Y_{T1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{P1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{T2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{P2} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

当列车跨越交直转换段时,要求其机车断路器处于断开状态,故此时电流向量为零向量。

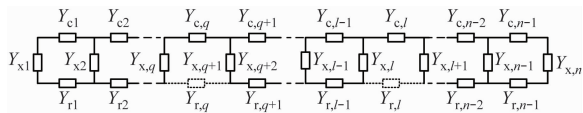
2.2 系统节点导纳矩阵

双流制线路牵引供电系统等值电路如图 3 所示。按照切面顺序建立全线牵引供电系统的节点导纳矩阵 Y_s ,则有:

$$Y_s = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & Y_{n-1,n-1} & Y_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & Y_{n,n-1} & Y_{n,n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

假设直流牵引网电压初始值等于其额定电压,由电压初始值按切面顺序形成注入切面的电流向量 I_s ,则有:

$$I_s = [I_1 \quad I_2 \quad \cdots \quad I_n]^T \quad (12)$$



注: $Y_{c,m}$ —车体纵向导纳 ($m=1,2,\dots,n$); $Y_{x,m}$ —车体接地电阻导纳 ($m=1,2,\dots,n$); $Y_{r,m}$ —钢轨纵向导纳 ($m=1,2,\dots,n$)。

图3 双流制线路牵引供电系统等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of dual current line traction power supply system

3 直流偏磁电流计算

假设直流侧牵引网电压初始值为其额定电压,

使用连续线性潮流算法^[10]迭代求解可得全线供电系统直流电压 U_s ,则有:

$$U_s = Y_s^{-1} I_s \quad (13)$$

由牵引变电所切面 j 的电压向量 U_j 可计算牵引变压器的直流偏磁电流 I_{d1} ,则有:

$$I_{d1} = Y_y (U_{T,j} - U_{R,j}) \quad (14)$$

式中:

Y_y ——切面 j 处的节点导纳矩阵;

$U_{T,j}$ ——切面 j 处的接触网电压向量;

$U_{R,j}$ ——切面 j 处的钢轨电压向量。

当列车在上行线路运行时,由机车切面 h 的电压向量 U_h 可计算车载变压器流过的直流电流 I_{d2} ,则有:

$$I_{d2} = Y_h (U_{3k-2,h} - U_{3k-1,h}) \quad (15)$$

式中:

Y_h ——切面 h 处的节点导纳矩阵;

$U_{3k-2,h}$ ——切面 h 处的接触网电压向量;

$U_{3k-1,h}$ ——切面 h 处的钢轨电压向量;

k ——上行或下行,当 $k=1$ 时代表上行,当 $k=2$ 时代表下行。

4 现场试验与机理分析

为验证上述模型的准确性,本文针对某调试线进行现场实测,并根据现场情况进行理论分析。

4.1 现场试验

该调试线路为单线平直线路,全长为 1.1 km,全线均为柔性接触网供电,无回流线,其结构示意图如图 4 所示。直流牵引所距离线路起点 0.15 km,交直转换段距离线路起点 0.60 km,交流牵引所距离线路起点 0.65 km。交流变压器型号为 S-DC10-5000/10/27.5,额定容量为 5 MVA,额定电压为 10 kV/27.5 kV,额定电流为 406.8 A/181.82 A,短路损耗为 36 kW。



注: TS—直流牵引所; AD—交直转换段; TPS—交流牵引主变电所; SDC1—直流区段车站; SAC1—交流区段车站。

图4 线路结构示意图

Fig.4 Diagram of line structure

变压器直流偏磁测试原理示意图如图 5 所示。由于调试线长度仅为 1.1 km,不允许两辆车同时运

行,本文使用短接线代替跨接绝缘节的列车。测试过程中,牵引变压器一次侧断开;用铜线短接交直转换段两侧钢轨,模拟列车跨接交直转换段;短接二次侧接触网与钢轨,模拟列车运行。对交流牵引变电所变压器接地端子加装传感器,霍尔电流传感器采样频率为6 400 Hz。测量工况为单车运行且列车仅在直流区段运行。

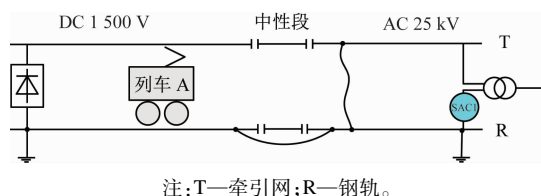


图5 变压器直流偏磁测试原理示意图

Fig. 5 Diagram of transformer DC bias current testing principle

试验时,交流牵引所内变压器直流偏磁电流如图 6 所示。直流电流实测值一般在 $0.20 \sim 0.60 \text{ A}$ 左右波动,测试时间为 13:57 时,直流电流高达 1.53 A 。

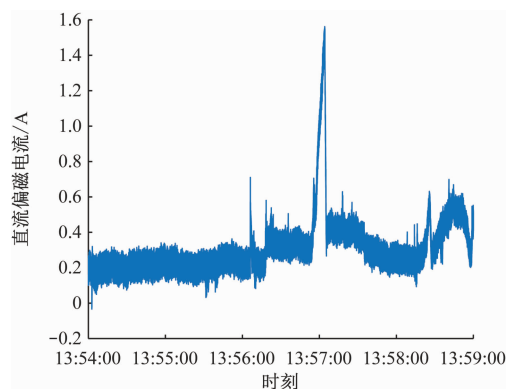


图6 交流牵引所内变压器直流偏磁电流(试验)

Fig. 6 Transformer DC bias current at AC traction substation (experiment)

4.2 仿真分析

为研究直流区段列车在不同位置时对变压器直流偏磁的影响,假设列车 B 始终在交直转换段处跨接钢轨绝缘节,列车 A 由 SDC1 向 AD 运行,在此过程中监测流过交流牵引所中变压器的直流偏磁电流。该调试线交流、直流区段的牵引网相同,实测牵引网直流偏磁仿真参数如表 1 所示。

采用 ACTPS 软件对列车 A 进行牵引计算和供电计算,可以获得列车功率、位置和时间之间的关系,使用本文所提方法进行分析,可获得直流偏磁电流。仿真中,交流牵引所变压器直流偏磁电流如

表 1 实测牵引网直流偏磁仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of field-measured traction network DC bias current

参数	取值
直流区段牵引网电压/ V	1 650
牵引网单位电阻/(Ω/km)	0.017 3
牵引变电所接地网接地电阻/ Ω	0.50
交流牵引所变压器等效电阻/ Ω	0.55
跨接交直流换段列车车体等效电阻/ Ω	0.01
交流区段牵引网电压/ kV	27.5
钢轨单位电阻/(Ω/km)	0.02
直流区段钢轨对地分布电阻/ Ω	1.70
列车车载变压器等效电阻/ Ω	0.50

图 7 所示。由图 7 可知:直流电流主要在 0.20 A 左右波动,在 33 s 时达到最大值 1.42 A,仿真值相对实测值的误差为 7.2%。结合前文分析可知,直流偏磁电流实测值略大,这是由于采用短接线代替了跨接绝缘节列车的缘故。

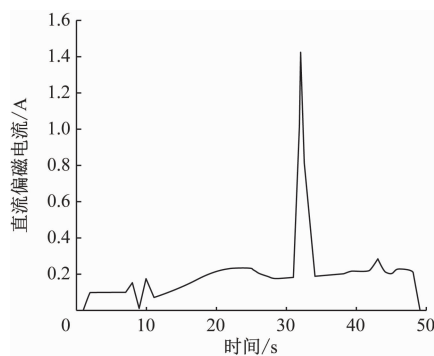


图7 交流牵引所变压器直流偏磁电流(仿真)

Fig. 7 Transformer DC bias current at AC traction substation (simulation)

根据 DL/T 437—2012《高压直流接地极技术导则》可知,单相变压器绕组允许流过的最大直流电流为额定电流的 0.3%。该调试线交流变压器二次侧额定电流为 181.82 A,其 0.3% 对应为 0.55 A。由此可知,在双流制线路中,变压器的直流偏磁电流在某些时刻严重超标,值得关注。

5 结语

本文基于牵引网的链式电路模型对双流制线路的直流区段、交流区段及交直转换段牵引网进行建模,得到其节点导纳矩阵。通过全线牵引网的电压、电流分布计算获得交流区段牵引变电所变压器

的直流偏磁电流。现场实测验证了本文所提计算方法的准确性。研究发现,在双流制线路中,变压器的直流偏磁电流在某些时刻严重超标,值得关注。

参考文献

- [1] 李冰,王泽忠,刘格,等.特高压变压器直流偏磁对绕组电流的影响[J].电工技术学报,2020,35(7):1422.
LI Bing, WANG Zezhong, LIU Ke, et al. Research on winding current of UHV transformer under DC-bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1422.
- [2] 张晓宇,郑超,莫品豪,等.直流偏磁对变压器保护的影响及直流偏磁保护改进[J].电力系统自动化,2021,45(4):148.
ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, et al. Influence of DC magnetic bias on transformer protection and improvement of DC magnetic bias protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 148.
- [3] 谢志成,钱海,林湘宁,等.直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法[J].电力自动化设备,2019,39(2):216.
XIE Zhicheng, QIAN Hai, LIN Xiangning, et al. Quantitative state assessment method for transformer under DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 216.
- [4] 柳林,尤方圆,余汪洋,等.电力变压器直流偏磁振动噪声特征研究[J].电气技术,2019,20(7):9.
LIU Lin, YOU Fangyuan, YU Wangyang, et al. The study of characteristics of the transformer vibration noise under DC magnetic bias[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(7): 9.
- [5] 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(1):7.
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(1): 7.
- [6] 刘炜,杨凌云,马庆安,等.双制式列车接地系统的车-地联合牵引供电计算[J].西南交通大学学报,2024,59(3):501.
LIU Wei, YANG Lingyun, MA Qing'an, et al. Vehicle-ground united traction power supply calculation in dual-system train grounding system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(3): 501.
- [7] 王志荣.双流制列车过中性段供电切换方案[J].都市轨道交通,2016,29(6):125.
WANG Zhirong. Power supply switching scheme of dual-current vehicle on neutral section[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 125.
- [8] 赵奇峰.双流制市域铁路过中性段供电实施方案[J].铁道建筑技术,2023(5):109.
ZHAO Qifeng. Implementation scheme of power supply through neutral section of dual-current suburban railway[J]. Railway Construction Technology, 2023(5): 109.
- [9] 吴命利.电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J].中国电机工程学报,2010,30(28):52.
WU Mingli. Uniform chain circuit model for traction networks of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52.
- [10] 叶润峰,魏应冬,李占赫,等.城市轨道交通柔性直流牵引供电系统钢轨电位快速计算方法[J].中国电机工程学报,2023,43(14):5311.
YE Runfeng, WEI Yingdong, LI Zhanhe, et al. Fast calculation of rail potential of flexible DC traction power supply system for urban rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5311.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 第一作者:李雪飞,正高级工程师,013200018212@ccrccg. cc
通信作者:代骏,硕士研究生,1506701626@qq. com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第20页)

- WANG Chuanhua. Analysis and experimental study on loosening characteristics of bolted connection structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [2] 孙鹏玮.单螺栓节点初始预紧力松弛研究[D].大连:大连理工大学,2019.
SUN Pengwei. Study on relaxation of initial preload of single bolt joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [3] 于泽通,刘建华,张朝前,等.轴向交变载荷作用下螺栓联接结构的松动试验研究[J].摩擦学学报,2015,35(6):732.
YU Zetong, LIU Jianhua, ZHANG Chaoqian, et al. An experimental study on self-loosening of bolted joints under axial vibration[J]. Tribology, 2015, 35(6): 732.
- [4] 李国栋,战立超,姜朝勇,等.某型地铁车辆轴箱弹簧下盖螺栓断裂机理分析[J].城市轨道交通研究,2020,23(9):10.
LI Guodong, ZHAN Lichao, JIANG Chaoyong, et al. Analysis of bolt fracture mechanism on the axle box spring lower cover of A metro vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(9): 10.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:韩光旭,高级工程师,hanguangxu_2000@163. com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license