

城市轨道交通直流牵引供电系统再生制动能量 利用对钢轨电位的影响

胡维锋¹ 夏 波²

(1. 重庆市轨道交通设计研究院有限公司, 401122, 重庆; 2. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 401122, 重庆//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 针对城市轨道交通直流牵引供电系统中杂散电流泄漏腐蚀和钢轨电位限制装置频繁动作的问题,对直流牵引供电系统再生制动能量利用给钢轨电位的影响进行了分析。建立了多列车动态运行过程中杂散电流和钢轨电位分布模型,仿真分析了杂散电流和钢轨电位的分布规律,并将其和列车功率的分布进行对比,得出了列车再生制动能量远距离利用量越大,钢轨电位增加越多。通过列车制动电流的利用量以及杂散电流最大值、钢轨电位最大值的对比分析,进一步验证了所提方法的正确性。

关键词 城市轨道交通; 直流牵引供电系统; 再生制动能量利用; 钢轨电位

中图分类号 U260.359

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.036

Influence of Regenerative Braking Energy Utilization of Urban Rail Transit DC Traction Power System on Rail Potential

HU Weifeng, XIA Bo

Abstract Aiming at problems of the stray current leakage corrosion in urban rail transit DC traction power supply system and the frequent operation of rail potential limiting device in urban rail system, the influence of regenerative braking energy utilization on rail potential in DC traction power supply is analyzed. Through establishing a distribution model of stray current and rail potential during multi-train dynamic operation, the distribution law of stray current and rail potential is simulated, analyzed and compared with the distribution of train power. It is concluded that the greater the distance utilization of regenerative braking energy, the greater the increase of rail potential. Finally, through a comparison between the application of train braking current, the maximum stray current and the maximum rail potential, the proposed method is further verified.

Key words urban rail transit; DC traction power system; regenerative braking energy; track potential

First-author's address Chongqing Rail Transit Design and

Research Institute Co., Ltd., 401122, Chongqing, China

目前我国城市轨道交通行业中轨道交通供电安全问题尤为突出,尤其是回流系统中杂散电流和钢轨电位的问题。杂散电流在回流过程中,会对地下附近管道(如天然气管道等)产生腐蚀,严重时会造成管道的泄漏^[1-4]。钢轨电位过高会导致钢轨电位限制装置(OVPD)频繁动作,进而诱发更多的杂散电流泄漏,甚至造成大面积停电事故发生^[5-7]。当前杂散电流和钢轨电位对城市轨道交通系统自身和其他工程的影响并未得到有效解决。因此,有必要对回流系统的钢轨电位和杂散电流分布规律进行研究。

文献[8]通过建立回流系统的暂态模型研究了回流电流的变化率和集肤效应对钢轨电位的影响,得到钢轨电位与回流电流的变化率和集肤效应呈正相关。文献[9]对负荷波动和交流分量影响模型进行了分析,得到交流分量越大,钢轨电位越高。

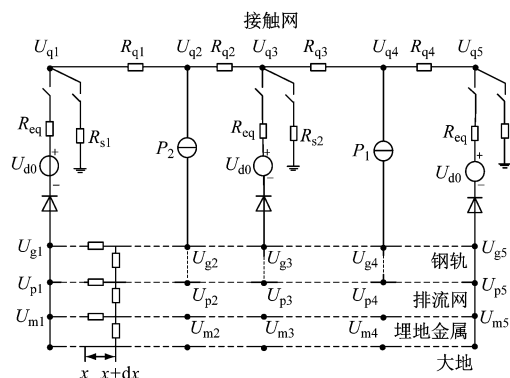
文献[10]研究了均匀和非均匀过渡电阻下钢轨电位的分布规律,得到过渡电阻的均匀性会对钢轨电位的分布产生影响,以及过渡电阻大小和杂散电流大小呈负相关。文献[11]在分析回流系统自身参数对钢轨电位影响规律的基础上,对不同供电模式下钢轨和排流网对地电压的规律进行了研究,得到列车不同运行工况下钢轨电位的分布规律。目前对钢轨电位和杂散电流分布规律的研究虽取得了一些成果,但随着制动电流的再生利用,牵引供电系统的能量分配复杂,制动电流的再生利用对钢轨电位分布的影响亦需进一步研究。

本文对制动电流再生利用下的钢轨电位和杂散电流分布规律进行了研究,通过仿真对比分析了钢轨电位、杂散电流和制动电流再生利用的关系,

可为城市轨道交通牵引供电系统的钢轨电位治理提供理论基础。

1 城市轨道交通牵引供电系统建模

为分析钢轨电位的分布规律,本文建立了如图1所示的牵引供电系统等效模型。其中,列车为时变功率源模型,是目前仿真模型中应用最多的模型^[12-13];牵引变电所为理想电压源与电阻的串联组合,同时考虑列车的再生制动,在牵引变电所处并联可变电阻吸收制动列车的多余能量^[14-15];接触网和钢轨则按集中参数建模,其电阻率是恒定的,阻值仅与长度有关^[16];回流系统等效为电阻网络模型^[17]。



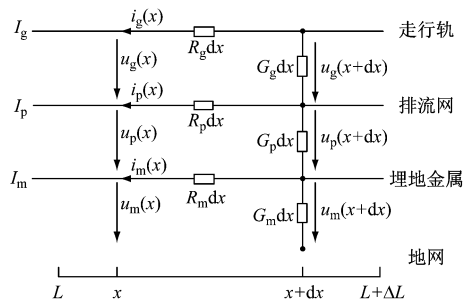
注: U_{qi} 为变电所或列车处的接触网电压; U_{gi} 为钢轨电压; U_{pi} 为排流网电压; U_{mi} 为埋地金属电压; P_1, P_2 为列车功率; U_{d0} 为变电所空载电压; R_{eq} 为变电所等效内阻; R_{si} 为能量吸收装置等效电阻; R_{qi} 为接触网等效电阻; x 为横向长度。

图1 牵引供电系统等效模型

Fig. 1 Equivalent model of traction power supply system

沿 x 正方向构建回流系统微元等效电阻网络,如图2所示。根据基尔霍夫定律对图2中各电压、电流的关系进行分析,建立如下参数模型:

$$\begin{cases} \frac{du_g(x)}{dx} = R_g i_g(x) - R_p i_p(x) \\ \frac{du_p(x)}{dx} = R_p i_p(x) - R_m i_m(x) \\ \frac{du_m(x)}{dx} = R_m i_m(x) \\ \frac{di_g(x)}{dx} = G_g u_g(x) \\ \frac{di_p(x)}{dx} = -G_g u_g(x) + G_p u_p(x) \\ \frac{di_m(x)}{dx} = -G_p u_p(x) + G_m u_m(x) \end{cases} \quad (1)$$



注: $i_g(x)$ 为钢轨电流; $i_p(x)$ 为排流网电流; $i_m(x)$ 为埋地金属电流; $u_g(x)$ 为钢轨对排流网电压; $u_p(x)$ 为排流网对埋地金属电压; $u_m(x)$ 为埋地金属对大地的电压; G_g 为钢轨对排流网的过渡电阻; G_p 为排流网对埋地金属的过渡电阻; G_m 为埋地金属对大地的过渡电阻; L 为研究的钢轨某位置; ΔL 为单位钢轨区间。

图2 回流系统微元等效电阻网络

Fig. 2 Micro equivalent resistance network of return system

将式(1)进行简化,得到:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} u_g(x) \\ u_p(x) \\ u_m(x) \\ i_g(x) \\ i_p(x) \\ i_m(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & R_g & -R_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_p & -R_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_m \\ G_g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_g & G_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_p & G_m & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_g(x) \\ u_p(x) \\ u_m(x) \\ i_g(x) \\ i_p(x) \\ i_m(x) \end{bmatrix} \quad (2)$$

求解式(2),得到:

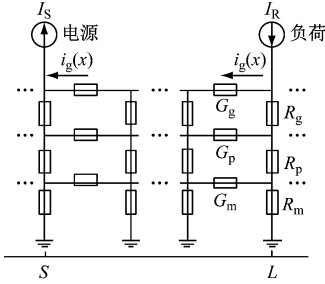
$$\begin{bmatrix} u_g(x) \\ u_p(x) \\ u_m(x) \\ i_g(x) \\ i_p(x) \\ i_m(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 x} \\ c_2 e^{\lambda_2 x} \\ c_3 e^{\lambda_3 x} \\ c_4 e^{\lambda_4 x} \\ c_5 e^{\lambda_5 x} \\ c_6 e^{\lambda_6 x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

B ——特征向量矩阵;
 λ_i ——特征向量矩阵 B 的第 i 个特征值;
 β_i —— λ_i 对应的特征向量;
 b_{ij} —— B 中第 i 行、第 j 列的元素。

为求解式(3)中各电压、电流的大小,可将原先复杂的回流系统分解为不同的求解域,每个求解域均可采用图 3 所示的电路图表示。根据图 3 所示电路的电压、电流关系,即可求解得到参数值 $c_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 。



注: I_S 为变电所或制动列车供给对应负荷的电流; I_R 为牵引列车或能量吸收装置接受的电流; $[S, L]$ 为求解域区间。

图 3 分析域内的电阻网络图

Fig. 3 Resistance network diagram in the analysis domain

$[S, L]$ 内的电压和电流大小可由某一时刻的潮流计算获得。各电流满足式(5)的电参数平衡条件:

$$Y_{S,L} = \begin{bmatrix} i_g(S) & i_p(S) & i_m(S) & i_g(L) & i_p(L) \\ i_m(L) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I_S & 0 & 0 & I_R & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

将其代入式(3),得到:

$$\begin{cases} i_g(S) = \beta_4 [c_1 e^{\lambda_1 S} c_2 e^{\lambda_2 S} c_3 e^{\lambda_3 S} c_4 e^{\lambda_4 S} c_5 e^{\lambda_5 S} c_6 e^{\lambda_6 S}]^T \\ i_p(S) = \beta_5 [c_1 e^{\lambda_1 S} c_2 e^{\lambda_2 S} c_3 e^{\lambda_3 S} c_4 e^{\lambda_4 S} c_5 e^{\lambda_5 S} c_6 e^{\lambda_6 S}]^T \\ i_m(S) = \beta_6 [c_1 e^{\lambda_1 S} c_2 e^{\lambda_2 S} c_3 e^{\lambda_3 S} c_4 e^{\lambda_4 S} c_5 e^{\lambda_5 S} c_6 e^{\lambda_6 S}]^T \\ i_g(L) = \beta_4 [c_1 e^{\lambda_1 L} c_2 e^{\lambda_2 L} c_3 e^{\lambda_3 L} c_4 e^{\lambda_4 L} c_5 e^{\lambda_5 L} c_6 e^{\lambda_6 L}]^T \\ i_p(L) = \beta_5 [c_1 e^{\lambda_1 L} c_2 e^{\lambda_2 L} c_3 e^{\lambda_3 L} c_4 e^{\lambda_4 L} c_5 e^{\lambda_5 L} c_6 e^{\lambda_6 L}]^T \\ i_m(L) = \beta_6 [c_1 e^{\lambda_1 L} c_2 e^{\lambda_2 L} c_3 e^{\lambda_3 L} c_4 e^{\lambda_4 L} c_5 e^{\lambda_5 L} c_6 e^{\lambda_6 L}]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$Y_{S,L}$ —— $[S, L]$ 内各电流参数列矩阵。

令:

$$K = \begin{bmatrix} b_{41} e^{\lambda_1 S} & b_{42} e^{\lambda_2 S} & \dots & b_{46} e^{\lambda_6 S} \\ b_{51} e^{\lambda_1 S} & b_{52} e^{\lambda_2 S} & \dots & b_{56} e^{\lambda_6 S} \\ b_{61} e^{\lambda_1 S} & b_{62} e^{\lambda_2 S} & \dots & b_{66} e^{\lambda_6 S} \\ b_{41} e^{\lambda_1 L} & b_{42} e^{\lambda_2 L} & \dots & b_{46} e^{\lambda_6 L} \\ b_{51} e^{\lambda_1 L} & b_{52} e^{\lambda_2 L} & \dots & b_{56} e^{\lambda_6 L} \\ b_{61} e^{\lambda_1 L} & b_{62} e^{\lambda_2 L} & \dots & b_{66} e^{\lambda_6 L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

则式(6)可转化为式(8),进一步可由式(9)提取参数值 $c_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 。

$$K \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \end{bmatrix}^T = Y_{S,L} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \end{bmatrix}^T = K^+ Y_{S,L} \quad (9)$$

式中:

K^+ ——矩阵 K 的广义逆矩阵。

将求得的参数值 $c_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 代入式(3),可得到该分析域内的各电压和电流大小。

根据杂散电流的定义,该分析域内 x 处的杂散电流 $i_s(x)$ 可由式(10)计算得到,钢轨电位 $u_G(x)$ 可由式(11)计算得到。

$$i_s(x) = I_S - i_g(x) \quad (10)$$

$$u_G(x) = u_g(x) + u_p(x) + u_m(x) \quad (11)$$

式中:

$i_s(x)$ ——求解域内的杂散电流;

$u_G(x)$ ——求解域内的钢轨电位。

某时刻下,将全线划分为连续不同的分析域求解,其他分析域的杂散电流和钢轨电位分布也可由上述方法得到^[18-19]。

列车动态运行时,其牵引电流处于不断变化中,导致任一时刻分析域的划分可能不同。根据列车潮流计算,分析列车运行工况,将不同工况下任一时刻牵引供电回流系统划分为不同的分析域求解,进而得到列车动态运行下的杂散电流和钢轨电位。

2 数值仿真对比分析

以 3 所变电站、2 列列车的运行工况为例,通过设置不同的发车时间间隔,观察制动电流再生制动能量利用对钢轨电位的影响。3 种工况下的发车时间间隔 Δt 和停车时间,如表 1 所示。

表 1 3 种工况下的 Δt 和停车时间

Tab.1 Departure time interval and stop time under three operating conditions

工况	$\Delta t/s$	停车时间/s
1	220	30
2	144	30
3	180	30

不同工况下的列车功率-时间关系如图 4 所示。由图 4 可知,不同发车时间间隔下,制动列车和牵引列车之间的能量交换是不同的。

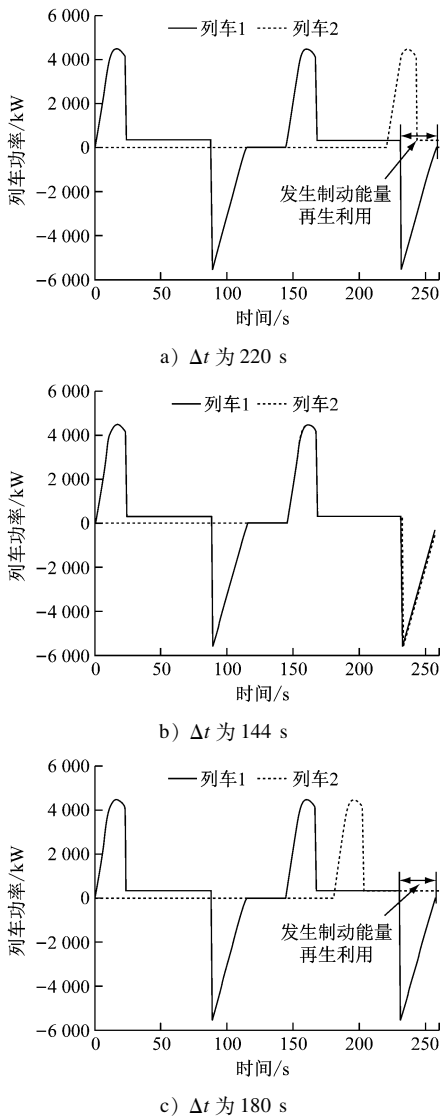


图 4 不同 Δt 时的列车功率-时间曲线

Fig. 4 Power-time curve of departing trains at different Δt

1) Δt 为 220 s 的条件下,在 231 ~ 244 s 时制动列车 1 和加速列车 2 存在能量再生利用。随着列车 2 转入匀速运行,在 245 ~ 258 s 时,制动列车 1 和匀速列车 2 之间也存在能量再生利用。

2) Δt 为 144 s 的条件下,列车 1、2 之间基本无能量传递。通过潮流计算可知,仅在 232 s 时发生了能量的再生利用,基本可认为在此发车时间间隔下列车之间不存在能量的再生利用。

3) Δt 为 180 s 的条件下,在 231 ~ 258 s 时制动列车 1 和匀速列车 2 存在能量再生利用。

上述为 3 种工况下不同 Δt 与列车功率之间的关系,基于此进一步分析列车间能量再生利用对钢轨电位的影响。首先分析 Δt 为 220 s 时,杂散电流和钢轨电位的分布和能量再生利用的关系,此时杂

散电流和钢轨电位动态分布如图 5 所示。

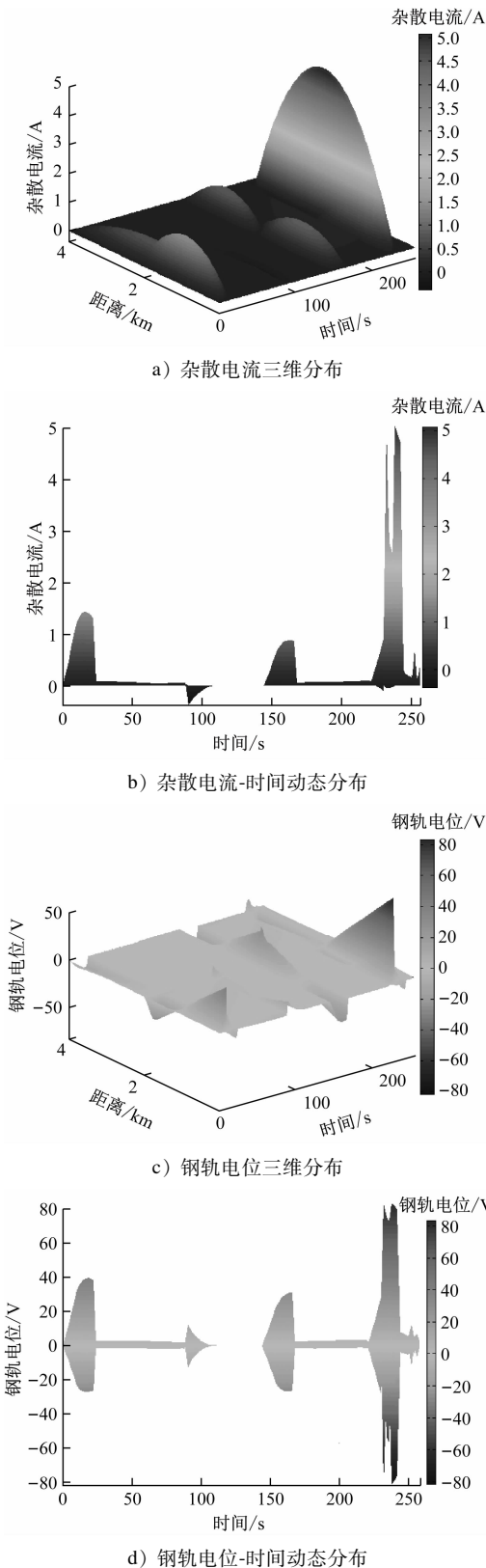


图 5 Δt 为 220 s 时杂散电流和钢轨电位分布图

Fig. 5 Stray current and rail potential distribution when Δt is 220 s

观察图 5,结合列车运行功率图和列车运行工况分析得到:

1) 当 Δt 在 $0 \sim 230$ s 范围内时,列车之间无能量交换,列车运行所带来的杂散电流和钢轨电位均在允许范围内。

2) 当 Δt 在 $231 \sim 244$ s 范围内时,随着列车 1 制动,列车 2 仍在加速牵引,列车之间存在较大的能量流通,此阶段制动功率传输的最大值为 $1\,076$ kW,杂散电流和钢轨电位在此时间段内也急剧增大,甚至接近其限制。随着加速列车转入匀速运行,所需牵引电流减小,制动列车为其提供的电能减少,此时传输的最大制动功率为 298.3 kW,相应的杂散电流和钢轨电位也较小,且在规定范围内波动。

通过以上分析可知,能量再生利用对杂散电流和钢轨电位的影响很大。当制动电流的再生利用较大时,即牵引列车传输的制动电流越大,杂散电流和钢轨电位也就越大。

为了更好地分析能量的再生利用与杂散电流和钢轨电位的关系,本文设发车时间间隔为 $230 \sim 258$ s,将制动电流的再生利用量与杂散电流和钢轨电位的最大值进行对比,结果如图 6~7 所示。

由图 6~7 可知, Δt 为 220 s 时,制动列车和加速列车重合度较大; Δt 为 $230 \sim 258$ s 时,列车制动电流的再生利用量增加,特别是 $232 \sim 234$ s、 $238 \sim 243$ s 时制动电流的再生利用量均达到了 $1\,000$ A 以上,此时对应的杂散电流和钢轨电位也增大,特别是钢轨电位增大到 83.58 V。因此,制动电流的再生利用量影响杂散电流、钢轨电位幅值及分布;随着制动电流的再生利用量增大,杂散电流和钢轨电位的最大值也相应增大。

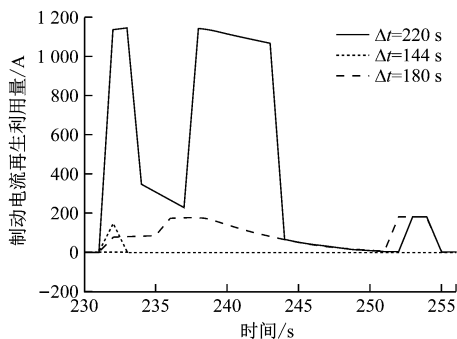
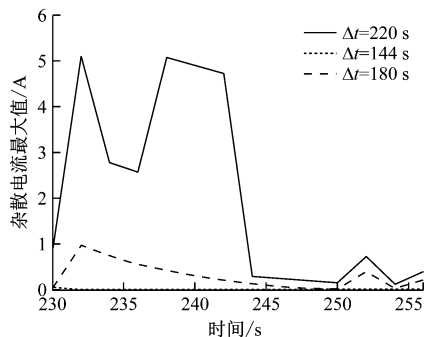
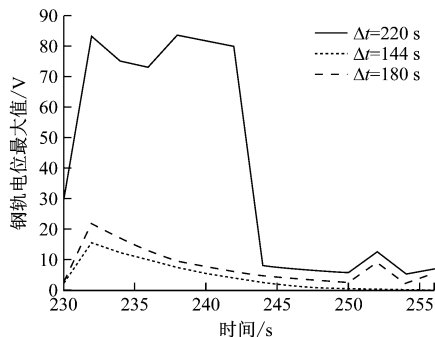


图 6 制动电流的再生利用量

Fig. 6 Regenerative utilization of braking current



a) 杂散电流最大值



b) 钢轨电位最大值

图 7 杂散电流和钢轨电位的最大值曲线

Fig. 7 Maximum curve of stray current and rail potential

3 结语

本文建立了多列车动态运行过程中钢轨电位与杂散电流分布模型,并通过仿真分析了牵引供电系统再生制动能量利用对钢轨电位与杂散电流的影响。通过调节多列车的发车时间间隔改变系统再生制动能量的分配,同时对比钢轨电位与杂散电流的幅值变化发现,系统再生制动能量直接影响回流系统钢轨电位和杂散电流的分布。在城市轨道交通线路运营中,应切实协调再生制动能量利用对牵引供电系统节能和供电安全的影响,以保障系统运行安全与经济。

参考文献

- [1] 刘争,李威力,钟周全. 地铁杂散电流的危害及检测实例[J]. 全面腐蚀控制,2016(9):56.
LIU Zheng, LI Weili, ZHONG Zhouquan. The harm of subway stray current and detection instance[J]. Total Corrosion Control, 2016(9):56.
- [2] 谭春波,许罡,许明忠,等. 接地极单极大地回路电流运行对天然气管道的影响[J]. 油气储运,2018(6):670.
TAN Chunbo, XU Gang, XU Mingzhong, et al. Effect of monopolar earth-return operation of grounding electrode on natural gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018(6):

- 670.
- [3] 莫依达. 杂散电流对凯源燃气公司埋地管道的腐蚀与控制研究[D]. 重庆:重庆科技学院,2017.
- MO Yida. Corrosion and control research of stray current on buried pipeline of Kaiyuan Gas Company[D]. Chongqing:Chongqing University of Science and Technology,2017.
- [4] 周军峰,谭海川,张鑫,等. 直流杂散电流对天然气管道干扰影响案例分析[J]. 腐蚀与防护,2018(9):713.
- ZHOU Junfeng, TAN Haichuan, ZHANG Xin, et al. Case study on interference effect of DC stray currents on natural gas pipelines[J]. Corrosion & Protection,2018(9):713.
- [5] BERTOLINI L, CARSANA M, PEDEFERRI P, et al. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1056.
- [6] 高圣夫,刘炜,郑杰,等. 直流牵引供电系统钢轨电位限值问题及其治理方案[J]. 城市轨道交通研究,2017(8):59.
- GAO Shengfu, LIU Wei, ZHENG Jie, et al. Rail over-voltage protection in DC traction power supply system research and solutions[J]. Urban Mass Transit,2017(8):59.
- [7] 叶龙. 浅析地铁直流牵引供电系统框架保护原理及保护设置方案[J]. 机电信息,2018(21):5.
- YE Long. Analysis on frame protection principle and protection setting scheme of metro DC traction power supply system[J]. Mechanical and Electrical Information,2018(21):5.
- [8] 戴曙. 回流系统暂态模型下钢轨电位的研究[J]. 科技创新与应用,2017(6):22.
- DAI Shu. Study on rail potential under transient model of reflux system[J]. Technology Innovation and Application,2017(6):22.
- [9] 丁大鹏,蒋功连,陈民武,等. 城市轨道交通直流牵引供电系统负荷波动对钢轨电位的影响分析[C]//全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 第九届电能质量研讨会论文集. 北京:中国标准出版社,2018:560-567.
- DING Dapeng, JIANG Gonglian, CHEN minwu, et al. Analysis of influence of load fluctuation on rail potential in urban rail transit DC traction power supply system[C]//Systems Aspects for Electrical Energy Supply. Proceedings of the ninth Symposium on Power Quality. Beijing: Standards Press of China, 2018: 560-567.
- [10] 朱峰,李嘉成,曾海波,等. 城市轨道交通轨地过渡电阻对杂散电流分布特性的影响[J]. 高电压技术,2018(8):2738.
- ZHU Feng, LI Jiacheng, ZENG Haibo, et al. Influence of rail-to-ground resistance of urban transit systems on distribution characteristics of stray current[J]. High Voltage Engineering,2018(8):2738.
- [11] 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.
- LIU Mingjie. Study on dynamic characteristics of metro stray current based on CDEGS[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2018.
- [12] 刘海东,何天健,袁振洲,等. 城市轨道交通直流牵引供电仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报,2004(9):1944.
- LIU Haidong, HE Tianjian, YUAN Zhenzhou, et al. Simulation of DC traction power for mass transit railway[J]. Journal of System Simulation,2004(9):1944.
- [13] 刘炜,李群湛,李鲲鹏,等. 城市轨道交通直流牵引供电系统模型及其仿真研究[J]. 电气应用,2009(7):60.
- LIU Wei, LI Qunzhan, LI Kunpeng, et al. Model and simulation of DC traction power supply system for urban rail transit[J]. Electrotechnical Application,2009(7):60.
- [14] 韦莉,张逸成,达世鹏,等. 城市轨道交通牵引系统仿真技术研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011(8):1161.
- WEI Li, ZHANG Yicheng, DA Shipeng, et al. Study of simulation technology for traction power system of urban rail transit[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011(8):1161.
- [15] GU J D, YANG X F, TRILLION Q, et al. Modelling and simulation of double-train macroscopic representation emulator in urban rail transit[C]//IEEE. International Conference on Energy Conversion Congress and Exposition. New York: IEEE, 2018: 3928-3933.
- [16] PIRES C L, NABETA S I, CARDOSO J R. ICGG method applied to solve DC traction load flow including earthing models[J]. IET Electric Power Applications, 2007,1(2):193.
- [17] 杜贵府. 直流牵引供电系统回流安全关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- DU Guifu. Key technologies of reflux safety in DC traction power systems[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2017.
- [18] 刘颖熙. 城市轨道交通杂散电流动态分布及泄漏监测研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- LIU Yingxi. Research on the dynamic distribution and leakage monitoring of stray current in urban rail transit[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2017.
- [19] 吴晗. 城市轨道交通牵引供电系统再生制动仿真研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- WU Han. Simulation and study of traction power supply system considering regenerative braking for urban rail transit[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2017.

(收稿日期:2019-12-02)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704