

自耦变压器供电方式下降低高速铁路钢轨电位的方法及其仿真分析

张民, 何正友, 方雷, 钱清泉

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Methods to Reduce Rail Potential of High-Speed Railway Adopting Autotransformer Feeding System and Simulation Analysis on Them

ZHANG Min, HE Zhengyou, FANG Lei, QIAN Qingquan

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: In view of the fact that the rail potential in high-speed railway is much higher than that in common railways, it is necessary to adopt effective measures to decrease rail potential in high-speed railway to ensure human safety and equipment security. A model to analyze rail potential in traction supply system is built by Matlab/Simulink. Under various technical parameters and working conditions, the measures to decrease rail potential such as enlarging leakage conductance, adding connector of protective wire and grounding protective wire are added into the simulation model to research the distribution law of rail potential. Based on the results of simulation, the effects of these measures in decreasing rail potential are analyzed and assessed.

KEY WORDS: high-speed railway; autotransformer feeding system; rail potential; simulation analysis

摘要: 高速铁路较常速铁路钢轨电位急剧升高, 必须采取有效措施降低钢轨电位, 以保障人身和设备安全。用 Matlab/Simulink 建立了牵引供电系统钢轨电位分析模型。在不同技术参数和工况下, 将增大泄漏电导、增设钢轨与保护连接线、增设保护线接地等降低钢轨电位的方法应用到仿真模型中研究钢轨电位的分布规律。根据仿真结果分析评估了各种降低钢轨电位方法的效果。

关键词: 高速铁路; AT 供电系统; 钢轨电位; 仿真分析

0 引言

随着我国高速铁路的大规模兴建, 高速铁路的安全问题倍受关注。高速铁路具有列车运行速度

快、行车密度高、牵引电流大、故障短路电流大、钢轨泄漏电导小等特点, 这导致钢轨电位急剧升高。钢轨电位升高对人员生命安全、沿线设备、轨道信号电路、钢轨与枕木之间的绝缘等产生一系列不良影响^[1]。因此, 近年来国内外专家对钢轨电位越来越关注, 并对钢轨分布以及降低钢轨电位的方法、技术手段、钢轨电位的测试及电磁兼容影响等进行深入的研究^[2-6], 取得了较好的成果。在降低钢轨电位方法方面, 国内外有增大钢轨泄漏电导、增设保护线(connector of protective wire, PW)、增设钢轨与保护连接线(connector of protective wire, CPW)、PW 线接地、加入综合接地线等实用方法^[7-9], 但不同国家解决问题的思路和采取的技术措施并不一致。如何评价这些技术措施并确定相关设计参数还需进行深入研究。

文献[10]建立了重载电气化铁路钢轨电位监测系统。该系统可实时监测钢轨电位的变化情况, 以便排除由于钢轨电位过高导致的设备和人员安全隐患, 提出应对钢轨电位过高的技术措施。但是如何在高速铁路设计阶段给出对应的技术措施和设计参数, 其意义更为重要。自耦变压器(auto-transformer, AT)供电方式是一种既适合高速重载大电流运行, 又具有良好防干扰效果的供电方式, 具有明显的技术经济效益^[11]。世界高速铁路牵引供电系统首选 AT 供电方式, 我国高速铁路采用的也是 AT 供电方式。

基于此, 本文针对高速铁路 AT 供电方式, 探讨钢轨电位的分布规律和影响钢轨电位的因素, 分析降低钢轨电位的方法, 建立 Matlab/Simulink 牵引

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878188); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0799)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50878188).

供电系统钢轨电位仿真模型，仿真分析不同轨道泄漏导电情况及采用不同接地方法后钢轨电位降低的效果。

1 AT 供电方式原理

图 1 为高速铁路 AT 供电方式简图。图中：AT₁、AT₂ 为自耦变压器，其变比为 2:1；接触网与轨道间的绕组匝数为 n_1 、正馈线和轨道之间的绕组匝数为 n_2 ， $n_1=n_2$ ； I 为机车电流； I_{T1} 、 I_{T2} 分别为机车所在位置接触线两端的电流； I_{R1} 、 I_{R2} 分别为机车所在位置钢轨两端的电流； I_F 为正馈线电流；自耦变压器间隔为 L ；机车与 AT₁ 相距 x_d 。沿铁道每隔约 10km 设置 1 个原边副边比为 2:1 的自耦变压器，其两端分别接入接触线和正馈线，中点接钢轨。自耦变压器原边接入电源，电压为 55kV；副边接负载，电压为 27.5 kV。当自耦变压器漏抗不为 0 时，各自耦变压器均向列车供电，且各自耦变压器副边电流之和等于列车电流。各自耦变压器原边与副边电流之比为 1:2。因自耦变压器的接入将牵引变电所供电电压提高了 1 倍，因此相同电力机车条件下牵引变电所电流减半，牵引网电压损失降低，牵引变电所供电距离增加^[11-13]。另外，正馈线与接触线中电流大小相等、方向相反，这会抵消接触线电流对通信的干扰，具有较好的通信防护作用。

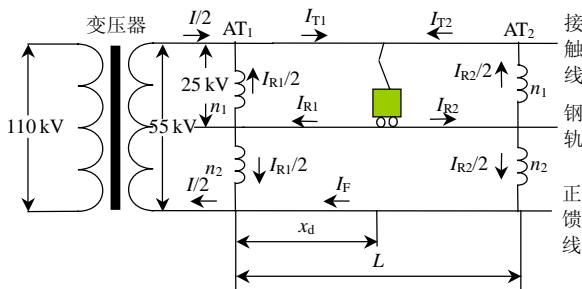


图 1 高速铁路 AT 供电方式
Fig. 1 AT power supply mode of high-speed railway

2 钢轨电位理论分析

如图 1 所示，设自耦变压器间隔为 L ，机车处于位置 x_d ，由接触线和正馈线电流在钢轨上引起的感应电压^[14]分别为

$$\begin{cases} U_1 = Z_{TR} I_{T1} + Z_{RF} I_F \\ U_2 = Z_{TR} I_{T2} + Z_{RF} I_F \end{cases} \quad (1)$$

式中： Z_{TR} 为接触线与钢轨间互阻抗； Z_{RF} 为钢轨与正馈线间互阻抗。

在 $0 < x < x_d$ 段，其边界条件如下：

$$\begin{cases} \frac{U}{I + I_{R1}} = -Z_0, & x = 0 \\ \frac{U}{I + I_{R1}} = Z_0, & x = L \end{cases} \quad (2)$$

式中： U 为 27.5kV； Z_0 为钢轨特性阻抗 $Z_0=(Z_R/Y)^{1/2}$ ， Z_R 为钢轨自阻抗， Y 为钢轨对地泄漏导纳。

在 $x_d \leq x \leq L$ 段，其边界条件如下：

$$\begin{cases} \frac{U}{I - I_{R2}} = -Z_0, & x = x_d \\ \frac{U}{I - I_{R2}} = Z_0, & x = L \end{cases} \quad (3)$$

则在 $0 < x < x_d$ 段，模型中的待定系数如下：

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_1}{Z_R} - I_{R1} \right) e^{-\gamma x_d} \\ B_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_1}{Z_R} - I_{R1} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中钢轨传播常数 $\gamma=(Z_R Y)^{1/2}$ 。

在 $x_d \leq x \leq L$ 段，模型中的待定系数如下：

$$\begin{cases} A_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_2}{Z_R} + I_{R2} \right) e^{-\gamma L} \\ B_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_2}{Z_R} + I_{R2} \right) e^{\gamma x_d} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $I_{R1} = \frac{L - x_d}{L} I$ ； $I_{R2} = \frac{x_d}{L} I$ ； $I_{T1} = I_{R1} + \frac{1}{2} I_{R2}$ ；

$I_{T2} = -\frac{1}{2} I_{R2}$ ； $I_F = -\frac{1}{2} I_{R2}$ ；耦合因数 $n_{12}=Z_{TR}/Z_R$ ；

耦合因数 $n_{23}=Z_{RF}/Z_R$ 。

由上述公式得出的 AT 供电方式下钢轨电流和钢轨电压分布如下：

$$I(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} (n_{12} I_{R1} + n_{23} I_F - I_{R1}) (e^{-\gamma(x_d-x)} + e^{-\gamma x}) - (n_{12} I_{R1} + n_{23} I_F), & 0 \leq x \leq x_d \\ \frac{1}{2} (n_{12} I_{R2} + n_{23} I_F + I_{R2}) (e^{-\gamma(L-x)} + e^{-\gamma(x_d-x)}) - (n_{12} I_{R2} + n_{23} I_F), & x_d \leq x \leq L \end{cases}$$

$$U(x) = \begin{cases} -\frac{1}{2} Z_0 (n_{12} I_{R1} + n_{23} I_F - I_{R1}) \cdot (e^{-\gamma(x_d-x)} - e^{-\gamma x}), & 0 \leq x \leq x_d \\ -\frac{1}{2} Z_0 (n_{12} I_{R2} + n_{23} I_F + I_{R2}) \cdot (e^{-\gamma(L-x)} - e^{-\gamma(x_d-x)}), & x_d \leq x \leq L \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知，钢轨电位与列车电流、钢轨特性阻抗成正比，并受钢轨与接触网的电磁耦合程度 n 影响。因此从根本上降低钢轨电位的方法为：降低钢轨单位长度阻抗 Z_R 与增大大地回路综合泄

漏电导。与直接供电方式不同的是，对于 AT 供电方式，除了在电源点存在钢轨集中流出电流外，在一些回流线，AT 中点处也存在钢轨集中流出电流。对于 AT 供电方式，负荷点两边的钢轨都是回流回路的一部分，由负荷点向两边钢轨注入的电流和感应电流相互影响，同时也受到钢轨对地漏电导的影响。因此，计算更为困难。

3 钢轨电位仿真模型

高速铁路 AT 供电馈线示意图 2。图中 T 代表接触线，R 代表钢轨，F 代表正馈线。本文根据图 2 采用 Matlab/Simulink 建立仿真模型。考虑高速铁路实际运行时存在多列车且上下行同时有列车运行的情况，选取列车速度为 350km/h，紧密运行情况下 3 min 追踪发车，则 2 列车之间的距离为 17.5 km。本文所建的 AT 供电区间模型长为 30km，含 3 个 AT 段，系统各阻抗参数为某高速铁路实际值。因此该牵引变电所最多可为 4 列列车供电。各种型号的高速列车功率不同，产生的牵引电流不同，本文采取功率为 8.8 MW 的 CRH3(China Railway High-Speed)动车组参数进行计算，对机车采用恒阻抗模型。

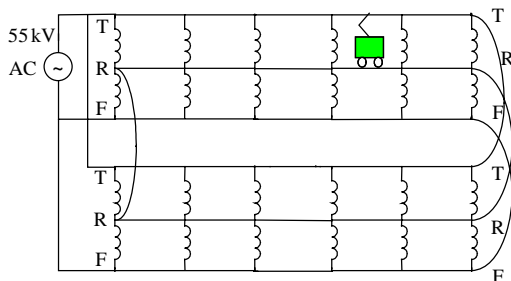


图 2 高速铁路复线 AT 供电示意
Fig. 2 Schematic diagram of double track AT-fed system of high-speed railway

4 影响钢轨电位的因素

4.1 钢轨漏电导对钢轨电位的影响

钢轨的漏电导是影响钢轨电位的主要因素之一。目前各国采用的轨道漏电导范围差别较大：德国各种轨道的漏电导为 0.02~50 S/km；日本有渣轨道的漏电导为 0.01~0.1 S/km，板式轨道的漏电导为 0.0001~0.2 S/km。受不同外部因素的影响，漏电导的范围一般较大，考虑其公共部分，本文仿真时漏电导设在 0.05~1 S/km 范围内^[15]。根据京津城际轨道交通牵引供电系统线路数据配置资料，计算阻抗参数^[16]如下：

接触网自阻抗 $Z_T=0.1577+j0.5812\Omega/\text{km}$ 、钢轨

自阻抗 $Z_R=0.1175+j0.5565\Omega/\text{km}$ 、正馈线自阻抗 $Z_F=0.1700+j0.7346\Omega/\text{km}$ 、保护线自阻抗 $Z_P=0.2500+j0.7676\Omega/\text{km}$ 、接触网与钢轨互阻抗 $Z_{TR}=0.0500+j0.2859\Omega/\text{km}$ 、钢轨与正馈线互阻抗 $Z_{RF}=0.0500+j0.2859\Omega/\text{km}$ 。

取牵引变电所位置为横坐标起始点，机车位于距牵引变电所 15 km 处漏电导不同时钢轨电位的分布见图 3，漏电导不同时负荷点的钢轨电位见图 4。

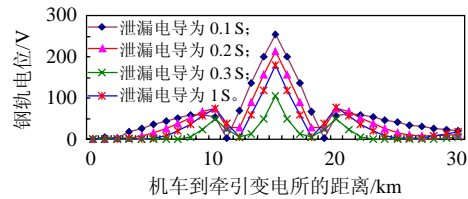


图 3 机车位于 15 km 处漏电导不同时钢轨电位分布
Fig. 3 Rail potential distribution for different leakage conductances when locomotive is at 15 km

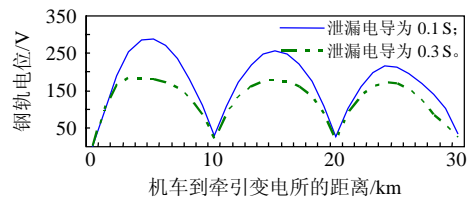


图 4 不同漏电导时负荷点的钢轨电位
Fig. 4 Rail potential at the load point with different leakage conductances

由图 3、4 可以看出，轨道漏电导对钢轨电位有较大影响，钢轨电位随轨道漏电导的增加而减小。图 3 所示轨道漏电导 1 S/km 时钢轨最高电位(106.4 V)比 0.01 S/km 时钢轨最高电位(255.0 V)降低了 148.6 V。由图 4 可知，机车在 AT 牵引网正常运行时，运行至两 AT 段中点处，负荷点钢轨电位达最大值。

因此可以看出，改善钢轨漏电导可以达到降低钢轨电位的目的。由于施工条件的限制，钢轨漏电导难以改变，因此需要采用其他措施进一步增加大地回路综合漏电导，以降低钢轨电位。

4.2 CPW 线对钢轨电位的影响

为降低钢轨电位，可以在 AT 段中部对保护线(PW 线)和钢轨做辅助连接，即 CPW 线。一般 CPW 线的位置根据其数目来确定，并将 AT 段均分。设定轨道漏电导为 0.3 S/km。加 CPW 线且漏电导为 0.3 S/km 时的钢轨电位分布见图 5。图 6 为 CPW 线为 5 条时负荷点钢轨电位的仿真结果。

由图 5 可以看出，设置 1 条和 3 条 CPW 线时

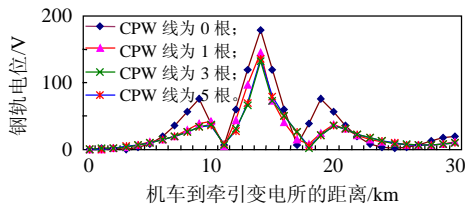


图 5 加 CPW 线且泄漏电导为 0.3 S/km 时的钢轨电位分布

Fig. 5 Rail potential distribution for adding CPW line with leaking conductance of 0.3 S/km

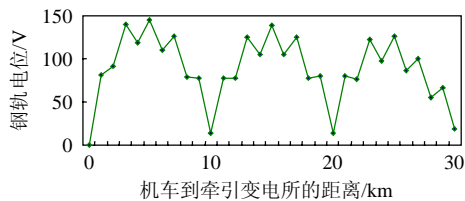


图 6 4 条 CPW 线且泄漏电导为 0.3 S/km 时负荷点的钢轨电位

Fig. 6 Rail potential distribution at the load point for adding four CPWS with leaking conductance of 0.3 S/km

钢轨电位的降低效果较明显,设置 3 条和 5 条 CPW 线时变化效果不明显。虽然增加 3 条以上降低效果不是很明显,但这种方法投资不多,可以考虑在 3 条的基础上多增加 1 至 2 条。但增加超过 5 条,效果更不明显就不可取了,所以建议工程实际在 AT 段为 10 km 时,设置 4 条 CPW 线,AT 段为 15 km 时,设置 5 条 CPW 线。一方面考虑把 AT 段均分,另一方面对降低钢轨电位有良好的效果。

4.3 PW 线接地对钢轨电位的影响

将 PW 线通过支柱接地,每隔一定距离将 PW 线与信号用综合地线相连,信号综合地线的接地阻值一般约为 1 Ω/km。在泄漏电导为 0.3 S/km 时接入 3 条 CPW 线,PW 线接地时钢轨电位分布如图 7 所示。PW 线 3 处接地后的负荷点钢轨电位见图 8。

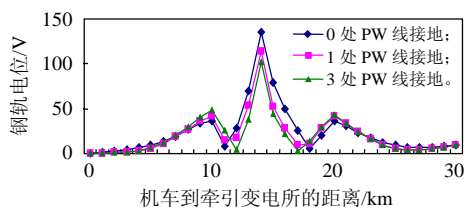


图 7 PW 线接地时钢轨电位分布

Fig. 7 The distribution of rail potential when PW is connected to the earth

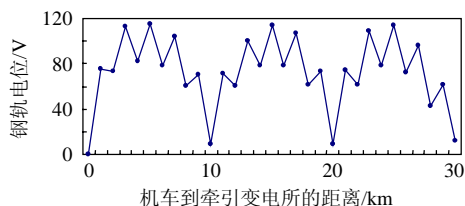


图 8 PW 线 3 处接地后的负荷点钢轨电位

Fig. 8 The rail potential at the load point when three PWs are connected to the earth

由图 7、8 可知,增设 PW 线接地线可有效降低钢轨电位:在增设 CPW 线的同时,设置 1 处 PW 线接地钢轨电位(113.4 V)比不设任何措施时钢轨电位(178.3 V)降低了 65.5 V,降低百分数为 36.4%;增设 3 处 PW 接地钢轨电位(101.3 V)比不设任何措施时钢轨电位(178.3 V)降低了 77 V,降低百分数为 43.2%;而设置 1 处 PW 线接地时钢轨电位为 113.4 V,即接触电压为 56.7 V,低于 EN50122-1 标准规定的安全电压值不大于 60 V^[17]。因此可认为加入这些降低钢轨电位的方法可以满足 EN50122-1 规定的安全电压的要求。

4.4 比较分析

根据上述仿真结果,本文列出了各种措施下钢轨电位降低情况,如表 1 所示。由表 1 可知,钢轨对地泄漏电导对钢轨电位的影响较大,但由于高速铁路无砟轨道广泛使用,特别是我国高速铁路高架区段多,钢轨泄漏电导难以增大。

表 1 各种措施下钢轨电位的降低情况比较

Tab. 1 Comparison of the rail potential reduction by different approaches

降低措施	负荷点钢轨 电位最大值/V	钢轨电位 降低值/V	降低 百分数/%		
泄漏电导为 0.1 S/km	254.991 1	—	—		
泄漏电导为 0.2 S/km	212.549 6	42.441 5	16.64		
泄漏电导为 0.3 S/km	178.351 5	76.639 6	30.06		
泄漏电导为 1.0 S/km	106.376 4	148.614 7	58.28		
0 条 CPW 线	178.351 5	—	—		
泄漏电导为 0.3 S/km	1 条 CPW 线	145.618 5	32.733 0	18.35	
	3 条 CPW 线	135.119 7	43.231 8	24.24	
	5 条 CPW 线	132.912 1	45.439 4	25.48	
泄漏电导为 0.3 S/km 且	0 处 PW 线接地	135.119 7	—	—	
	1 处 PW 线接地	113.433 8	21.685 9	16.05	
	3 条 CPW 线	3 处 PW 线接地	101.297 3	33.822 4	25.03

保护线通过 CPW 线与钢轨并联,利用其分流作用减小钢轨电位,因此充分增设 CPW 线可以降低钢轨电位,同样条件下增加 3 条 CPW 线,钢轨电位降低幅度达 24.24%。但 CPW 线增加到 5 条后电位降低幅度不明显。如果考虑投资,则并非 CPW 线增设得越多越好。增设 PW 线接地数目,同等条件下也能很好地降低钢轨电位。仿真结果可为钢轨电位降低方法评价和设计提供一定参考。

综上所述,上述各种方法对降低钢轨电位有明显效果,采用 CPW+PW+增大钢轨泄漏电导的方法能使钢轨电位达到规定的安全电压。

5 结论

在建立基于 Matlab/Simulink 钢轨电位分析模型的基础上, 根据京津城际线路参数仿真分析了不同泄漏电导、不同数目 CPW 线、不同数目 PW 接地数目等 3 种情况下, 钢轨电位的变化规律, 结果表明:

1) 基于仿真模型得到的钢轨电位分布规律与理论计算规律符合, 这说明仿真模型可用于定量分析不同降低方法及技术参数对钢轨电位的影响。

2) 3 种钢轨电位方法均能有效降低钢轨电位: 轨道道泄漏电导对钢轨电位影响最大, 从 0.1 S/km 到 1 S/km, 最高钢轨电位降低达 58.28%; 设置 CPW 线能降低钢轨电位, 但超过 3 条以后电位降低效果变化不大; PW 线接地数目越多, 钢轨电位降低越大, 但考虑工程实际, 接地数目不宜过多。

3) CPW+PW+增大钢轨泄漏电导能有效降低钢轨电位, 达到规定的安全电压。

参考文献

- [1] 李群湛. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007: 243-264.
- [2] Mariscotti A, Pozzobon P. Synthesis of line impedance expressions for railway traction systems[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2003, 52(2): 420-430.
- [3] Yang C F, Hwang J T, Lee T H. Effects of magnetic field induction and ground potential rise on pilot wire relay system operations[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3): 290-294.
- [4] 杨岗. 客运专线综合接地系统方案研究[J]. 中国铁路, 2006(8): 53-55.
Yang Gang. Research on comprehensive grounding plan of PDL[J]. Chinese Railways, 2006(8): 53-55(in Chinese).
- [5] Cella R, Giangaspero G, Mariscotti A, et al. Measurement of AT electric railway system currents and validation of a multiconductor transmission line model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1721-1726.
- [6] Sobral S T, Azzam G, Sobral S C. Ground potentials and currents in substations fed exclusively by power cables: an example leblon substation[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latin America, Sao Paulo, Brazil: IEEE PES, 2004: 91-95.
- [7] 陈屹, 邓云川. 遂渝线无砟轨道综合接地系统钢轨电位与电流分布的分析[J]. 铁道工程学报, 2007(S1): 426-429.
Chen Yi, Deng Yunchuan. Analysis of rail potential and current distribution of integrated earthing system for ballastless track of sui-yu railway line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(S1): 426-429(in Chinese).
- [8] 李红梅. 客运专线接触网回流接地系统的优化设计[J]. 中国铁路, 2005(11): 41-43.
Li Hongmei. The optimal design of passenger dedicated line catenary's system back to ground[J]. Chinese Railways, 2005(11): 41-43(in Chinese).
- [9] Mariscotti A, Pozzobon P, Vanti M. Distribution of the traction return current in AT electric railway systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(23): 119-212.
- [10] 艾兵, 董安平, 吴广宁, 等. 重载电气化铁路钢轨电位监测系统[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(3): 67-72.
Ai Bing, Dong Anping, Wu Guangning, et al. Research on rail potential and ground surface potential distribution in heavy loading electric railway[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(3): 67-72(in Chinese).
- [11] Pilo E, Rouco L. A reduced representation of 2x25kV electrical systems for high-speed railways[C]//The 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference. Chicago, Illinois, United States, 2003: 199-205.
- [12] Cella R, Giangaspero G, Mariscotti A, et al. Measurement of AT electric railway system currents and validation of a multiconductor transmission line model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1721-1726.
- [13] 何正友, 方雷, 郭东, 等. 基于 AT 等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 1-7.
He Zhengyou, Fang Lei, Guo Dong, et al. Algorithm for power flow of electric traction network based on equivalent circuit of at-fed system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 1-7(in Chinese).
- [14] 吴命利, 黄足平, 辛成山. 降低电气化铁道钢轨电位技术措施的研究[C]//中国电气化铁路两万公里学术会议. 北京: 中国铁道学会, 2005: 30-38.
- [15] Xie Shaofeng. Study on methods to reducing rail potential of high-speed railway[C]//Proceedings of 32nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. France: IECON, 2006: 1042-1046.
- [16] 张婧晶. 高速铁路综合接地系统的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [17] EN50122-1 Railway applications—fixed installations part 1: protective provisions relating to electrical safety and earth[S].



张民

收稿日期: 2010-10-04。

作者简介:

张民(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通牵引供电系统, E-mail: xnjzdm@126.com;

何正友(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代信号处理与信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配电网综合自动化等方面的研究工作;

方雷(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通牵引供电系统; 钱清泉(1936), 男, 中国工程院院士, 研究领域包括铁道电气化与自动化、工业监控技术等。

(责任编辑 杜宁)