

多种新型城轨牵引供电系统 仿真与节能分析

刘明亮¹, 田忠北², 董鸿志³, 郑俊锋¹, 朱东坡¹, 陈磊⁴

(1. 合肥市轨道交通集团有限公司, 合肥 230001; 2. 伯明翰大学, 英国伯明翰 B152TT;
3. 利物浦大学, 英国利物浦 L693BX; 4. 通控研究院(安徽)有限公司, 合肥 230001)

摘要: 为降低城轨牵引供电系统中的能源消耗, 对多种新型城轨供电系统的节能策略开展研究。首先, 基于传统潮流计算求解方法, 建立城市轨道交通牵引供电系统的等效电路模型, 并考虑城轨车辆牵引能量的非线性特性及多车模型中的等效电路变化。然后, 利用等效电路模型以及各节点电压, 设计系统的潮流解析方法。最后, 结合合肥市轨道交通1号线相关数据, 利用多列车运行仿真模拟结果, 分析现有牵引供电系统与逆变回馈、储能、光伏3种新型牵引供电系统的牵引变电站功率、电压、能耗等指标。研究表明: 相比于现有牵引供电系统, 具有逆变回馈的牵引供电系统可以显著减小牵引变电所能耗, 具有储能系统的牵引供电系统能够有效降低牵引变电所峰值功率, 具有光伏系统的牵引供电系统可减小24.89%的牵引变电站能耗。研究结果以期为提高城市轨道交通的节能减排效率提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 牵引供电系统; 逆变回馈; 储能系统; 光伏系统

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)04-0118-07

Simulation and Energy Saving Analysis of Various New Urban Rail Traction Power Supply Systems

LIU Mingliang¹, TIAN Zhongbei², DONG Hongzhi³, ZHENG Junfeng¹, ZHU Dongpo¹, CHEN Lei⁴

(1. Hefei Rail Transit Group Co., Ltd., Hefei 230001; 2. University of Birmingham, Birmingham B152TT, UK;
3. University of Liverpool, Liverpool L693BX, UK; 4. Tong Kong Research Institute (Anhui) Co., Ltd., Hefei 230001)

Abstract: To enhance the energy efficiency of urban rail traction power-supply systems, this study investigated various strategies aimed at reducing energy consumption. An equivalent circuit model of an urban rail transit traction power supply system was initially developed based on traditional power flow calculation methods. This model considered the nonlinear characteristics of traction energy for urban rail vehicles and variations in the equivalent circuit within a multivehicle context. Subsequently, a power flow analysis method was devised utilizing the established equivalent circuit model and node voltages. Finally, using data from Hefei rail transit line 1 and results from multitrain operation simulations, the study analyzed power, voltage, and energy consumption across different traction power-supply configurations: existing systems and three new systems integrating inverter feedback, energy storage, and photovoltaic technologies. The findings indicate significant advantages for the new systems: the system with inverter feedback notably reduces traction substation energy consumption, while the energy storage system effectively reduces peak power demands. Additionally, the system incorporating photovoltaic technology achieves a substantial

收稿日期: 2023-02-09 修回日期: 2024-03-27

第一作者: 刘明亮, 男, 本科, 高级工程师, 主要从事轨道交通电力系统建设与维护工作, liumingliang@hfgdjt.com

基金项目: 广东省自然科学基金(2023A1515012949)

引用格式: 刘明亮, 田忠北, 董鸿志, 等. 多种新型城轨牵引供电系统仿真与节能分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(4): 118-124.

LIU Mingliang, TIAN Zhongbei, DONG Hongzhi, et al. Simulation and energy saving analysis of various new urban rail traction power supply systems[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 118-124.

24.89% reduction in traction substation energy consumption compared to the existing setup. These results serve as a valuable reference for optimizing energy efficiency and emissions reduction efforts in urban rail transit systems, offering insights into practical strategies for enhancing operational sustainability.

Keywords: urban rail transit; traction power supply system; inverse feedback; energy storage system; photovoltaic system

随着城市发展, 城轨列车运营能耗日益增加。根据对国内外城轨运营单位的相关情况调研, 牵引能耗约占城轨运营总能耗的 40%~55%^[1]。列车制动停车过程中会产生大量的再生制动能量, 这些能量除了按一定比例(通常为 20%至 80%, 由地铁车辆实际运行密度和实际距离所决定)被其他相邻区间行驶的列车吸收利用外, 剩余的再生能量以热能的形式被车载制动电阻消耗掉, 产生巨大的能源浪费^[2]。

国内外研究表明, 在牵引变电站加装逆变回馈系统或储能系统, 能够提升再生制动能量的利用率, 进而降低城轨列车的电能消耗^[3-7]。然而逆变回馈系统和储能系统在降低变电站能耗及减少碳排放方面效果受限。随着新能源的发展, 在牵引变电站加装光伏等新能源, 可进一步降低牵引变电站的电能消耗, 但新能源常受到天气等因素影响^[8]。目前, 对具有储能和新能源的牵引供电系统的研究集中在能量管理^[9]及其控制方法的优化^[10]方面。而对于具有逆变回馈、储能系统和新能源的牵引供电系统的节能特性, 没有进行深入分析及对比。

基于传统潮流计算求解方法, 本文首先建立了城市轨道交通牵引供电系统的等效电路模型, 并考虑城轨车辆牵引能量的非线性特性及多车模型中的等效电路变化, 给出系统潮流解析步骤; 然后, 基于城市轨道交通多种牵引供电系统的模型特征, 设计针对每种系统的潮流解析方法; 最后, 以合肥市轨道交通 1 号线为基础建立等效模型, 对牵引供电系统及多列车运行进行仿真模拟, 并从功率、电压、能耗等方面将本文提出的牵引供电系统与现有多种牵引供电系统进行了对比分析。

1 新型多车牵引供电系统等效模型

1.1 传统牵引供电模型

直流牵引供电系统直接通过整流器从交流电网上取电。如图 1 所示, 现代交流变直流牵引供电系统主要包括交流中压网络、变压器、整流器以及起保护作用的交直流断路器, 最终输出稳定直流供给运行的列车。

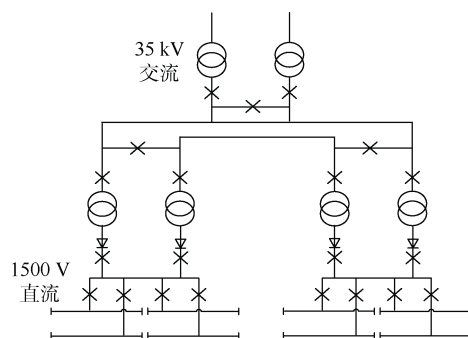


图 1 交流变直流牵引供电系统模型

Figure 1 Alternating direct traction power supply system model

牵引供电系统等效为串联内阻和二极管的电流源, 实现传统牵引变电所的单向导通的整流特性分析。接触网和钢轨(回流轨)等效为有固定电阻率的电阻, 其阻值大小由长度决定, 即由列车运行位置决定。运行列车被等效为理想功率源, 在某一运行时刻列车的功率为恒定值, 由列车运行状态驾驶策略决定。当列车处于牵引工况时, 列车从接触网吸收功率; 当列车处于惰性工况时, 列车不吸收功率; 当列车处于再生制动工况时, 列车向接触网发出功率。

1.2 新型牵引供电模型

随着电力电子技术和新能源的不断发展, 牵引供电系统的供电方式也得到了创新。逆变回馈的牵引供电系统可以将列车产生的再生制动能量通过接触网回馈至变电站。同时, 搭载储能的牵引供电系统可与变电站协同为列车提供动力, 并在列车产生再生制动能量时吸收相应功率。新能源整合的牵引供电系统首先接受新能源供给, 然后再通过牵引整流机组提供电力。传统牵引变电站的等效电路如图 2 所示。其中, U_0 为变电站空载电压, R_{sub} 为变电站等效电阻, R_1 、 R_2 和 R_3 为线路等效电阻。

当牵引供电系统接入逆变回馈、储能、光伏后, 其等效电路变化如图 3 所示。

图 3(a)所示为含有逆变回馈的牵引变电站等效电路。当牵引变电站处于整流模式时, 整流二极管工作, 逆变装置为开路状态。当牵引变电站处于逆变模式时, 整流二极管为开路状态, 逆变装置工作。图 3(b)所示为含有储能的牵引变电站等效电路, 储能系统与变电

站并联。图3(c)所示为含有光伏的牵引变电站等效电路，光伏系统与变电站并联。其中， R_{s1} 表示变电站的等效电源内阻。在此模型中，储能及光伏均被等效为功率源。在仿真计算中，储能充电功率规定为正值，放电功率为负值；列车牵引时功率为正值，制动时功率为负值。

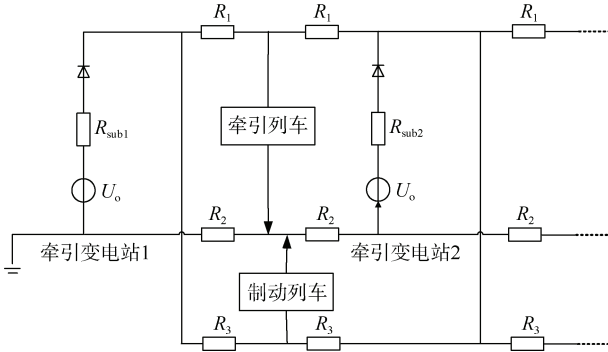


图 2 传统牵引供电系统等效电路模型
Figure 2 Equivalent circuit model of traditional traction power supply system

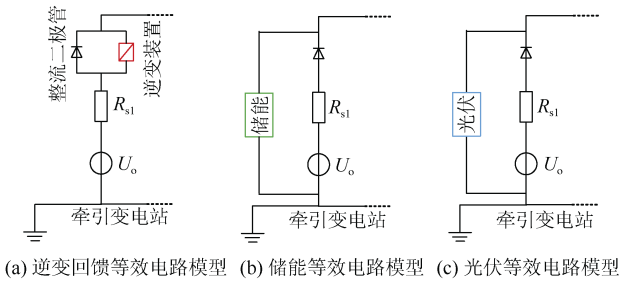


图 3 牵引供电系统等效电路模型
Figure 3 Equivalent circuit model of traction power supply system

对于逆变牵引变电站等效模型，由于变电站能量呈非线性特性，如图 4 所示，当其工作在整流模式下，特性曲线为蓝色曲线， U_{oc} 为开路电压。当其工作在逆变回馈模式下，其特性曲线为红色曲线， U_{invert} 为逆变工作状态开启电压。

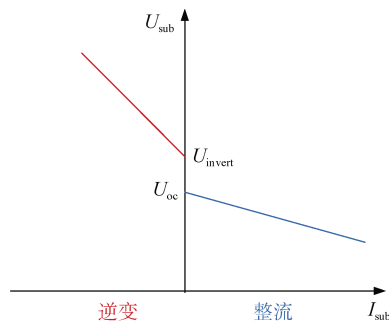


图 4 牵引变电站能量特性曲线
Figure 4 Traction substation characteristic curve

储能等效模型如图 5 所示，由等效电阻 R 及电容 C 组成，经过 DC/DC 输出功率。其功率输出为

$$U_C = U_{C0} + \frac{1}{C} \int I_{SC} dt \quad (1)$$

$$U_{SC} = U_C + I_{SC}R \quad (2)$$

$$U_{ESS} = \frac{U_{SC}I_{SC}}{I_{ESS}} \quad (3)$$

式中， U_C 为电感电压； U_{C0} 为电感初始电压； C 为电容； R 为电阻； U_{SC} 为超级电容侧电压； I_{SC} 为超级电容侧电流； U_{ESS} 为牵引侧储能电压； I_{ESS} 为牵引侧储能电流。

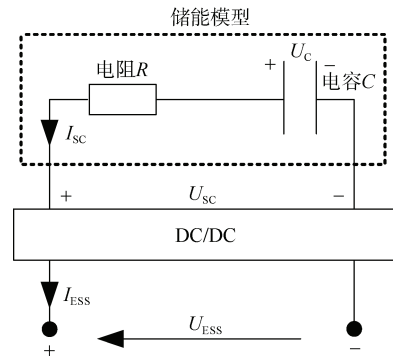


图 5 储能等效模型
Figure 5 Energy storage equivalent model

在此模型中，储能有 3 种工作模式，充电、放电及备用状态，如图 6 所示。工作模式由其电压决定：当储能电压 $U_{ESS} > U_{oc}$ 时，储能充电；当储能电压 $U_{ESS} < U_{thre}$ 时，储能放电；当储能电压 $U_{oc} > U_{ESS} > U_{thre}$ 时，储能处于备用状态。其中 U_{thre} 为设定的储能放电电压阈值，可根据系统需要进行调整。此外，为延长储能系统使用寿命，系统荷电状态 SOC 需满足 $SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$ ， SOC_{min} 和 SOC_{max} 为荷电状态最小及最大值。其中， P_{ESS_dis} 为储能装置放电功率， P_{ESS_ch} 为储能装置充电功率。

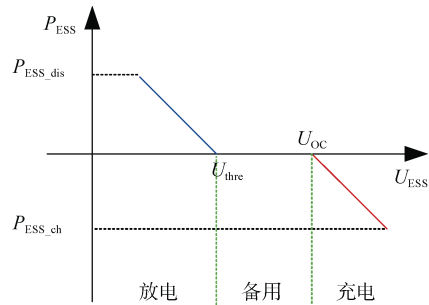


图 6 储能工作模式
Figure 6 Energy storage Equivalent model Energy storage working mode

在本文中,将光伏系统等效模型考虑为功率源^[8],为模拟模型输出特性,设定模型每 50 s 功率变化一次(模型出力情况由一组随机数进行模拟,在仿真时段内模型功率满足 $[0, 2.5 \text{ MW}]$),每个牵引变电站均安装 0.25 MW 的光伏发电系统。光伏仅在所在牵引变电站供电时(即变电站电压低于空载电压时),对牵引系统进行供能。

2 新型牵引供电系统潮流解析

基于新型多车牵引供电等效模型及传统潮流解析方法,提出各系统潮流解析步骤。在此方法中,首先根据运行图数据中某一时刻列车运行位置,把牵引供电网络支路化,确定各区间电阻值并建立系统导纳矩阵 Y 。此导纳矩阵具有实矩阵、对称矩阵和稀疏矩阵的特性。

然后,依据节点电压法,通过高斯消去法求解式(4),得到系统各节点电压和牵引变电站工作负荷等。由于列车被等效为理想功率源模型,因而在节点电压方程中的输入电流矩阵中包括牵引变电站输入电流值和列车电流。根据式(5)列车运行功率可以求得列车电压电流的函数关系,假设列车一个初始电压即可得到列车初始电流值,代入节点电压方程,可以得到新的列车电压,经过迭代计算即可得出各节点最终电压值。

$$V = Y^{-1}I \quad (4)$$

$$P_T = P_T(t) = U_T(t)I_T(t) \quad (5)$$

其中,

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{s1} + Y_1 & -Y_1 & \dots & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + Y_{s2} + Y_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & Y_{n-2} + Y_{sn-1} + Y_{n-1} & -Y_{n-1} \\ 0 & 0 & \dots & -Y_{n-1} & Y_{sn} + Y_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Y_n = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, V 为节点电压矩阵; Y 为牵引供电网络电阻 R 的导纳矩阵; I 为流入节点的电流矩阵; P_T 为牵引功率; t 为系统运行时刻; U_T 为牵引电压; I_T 为牵引电流; n 为节点序号; Y_{sn} 为节点电压; Y_n 为每个节点 n 的导纳矩阵。

当变电站处于逆变回馈状态时,只需根据特性曲线改变模型内阻参数即可。当储能系统工作时,充电状态的功率通过充电特性曲线改变内阻,并由潮流解析获得;放电状态则将电流与牵引变电站电流相加并输出,随后基于此数据更新各节点电压。当光伏出力时,电流与牵引变电站电流相加并输出,随后基于此数据更新各节点电压。

在包含再生制动的直流牵引供电计算过程中,列车在再生制动工况时,会产生电流到接触网,并导致接触网网压升高。列车实际运行时,如果列车安全电压高于最大安全网压时,部分再生制动电能会被制动电阻消耗,以防止由于网压过高造成的危害,在仿真过程中也需要设置相应的最高安全网压,而且安全电压的大小影响再生制动能量的利用效率。由于再生制动电能反馈的原因,部分牵引变电站输出电流会减少,但是鉴于牵引变电站是单向整流机组,不能反向传输电流,因此对于仿真结果需要进一步判断变电站电压是否高于原有变电站最大电压。若变电站电压高于最高安全网压,变电站会自动关闭,不再输出电流。多车仿真器算法结构流程如图 7 所示。

3 合肥 1 号线牵引供电系统仿真分析

3.1 现有牵引供电系统仿真参数

现有牵引供电系统仿真基于合肥轨道交通 1 号线(上行线是九联圩站至天水路站,下行线是天水路站至九联圩站)。线路总长为 28 681.64 m,接触网单位阻抗为 $0.147 \Omega/\text{km}$,变电站阻抗为 $0.051 \text{ 25}/0.041 \Omega$,直流额定电压为 1 500 V,直流空载电压为 1 664 V,最高直流输出电压为 1 800 V。变电站分布参数如表 1 所示。

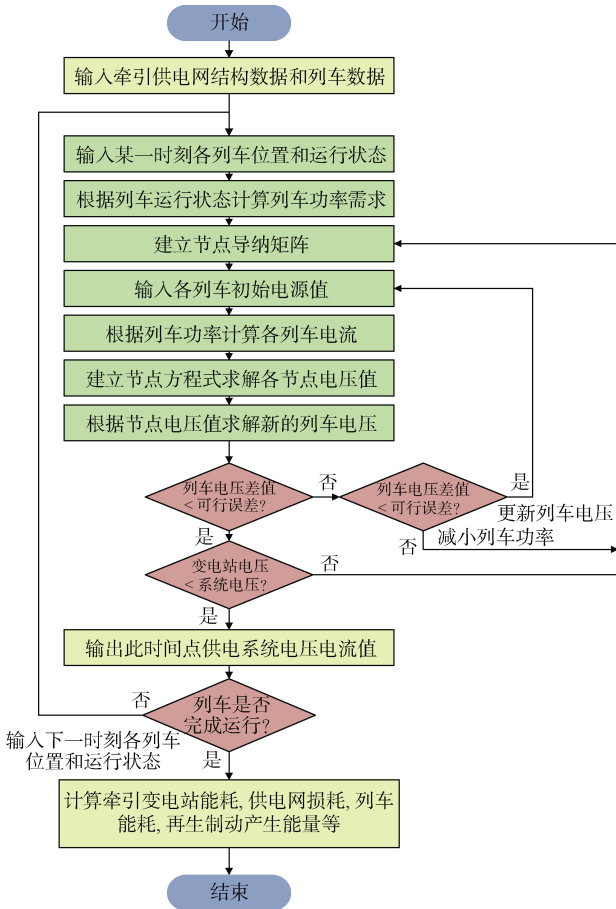


图 7 多车仿真器算法流程

Figure 7 Flow chart of multi-car simulator algorithm

表 1 变电站分布

Table 1 Substation distribution

变电站序号	距离/m	变电站序号	距离/m
1	0	8	19 778.91
2	2 114.62	9	22 491.24
3	4 834.39	10	24 281.70
4	8 346.03	11	25 195.49
5	10 752.91	12	26 872.41
6	13 720.36	13	28 681.64
7	16 128.03	—	—

系统中列车为高功率牵引制动模式(功率约 3 MW), 分别考虑发车间隔为 5 min 的高峰期和发车间隔为 7 min 的平峰期。

3.2 传统牵引供电系统仿真结果

在高功率牵引制动模式下, 对高峰期现有牵引供电进行仿真。传统牵引供电系统仿真上行列车运行情况如图 8 所示。

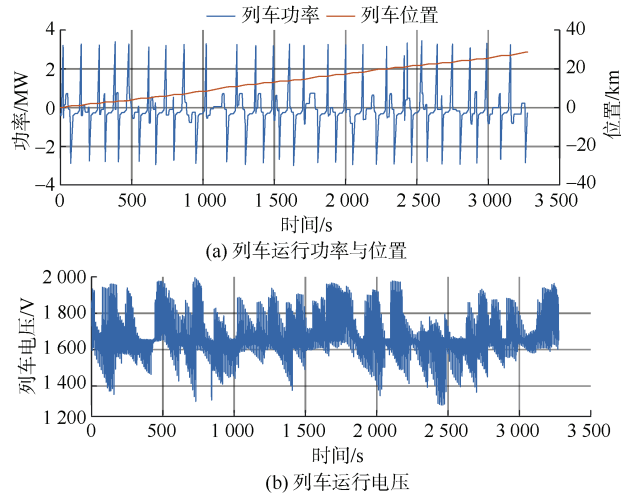


图 8 传统牵引供电系统仿真上行列车运行情况(发车间隔 5 min)

Figure 8 Operation of the upper train (5 minutes between departures)

3.3 新型牵引供电系统仿真结果

3.3.1 逆变回馈牵引供电系统仿真结果

在高功率牵引制动模式下, 考虑所有变电站安装逆变回馈系统, 列车所产生的再生制动能量将反馈到接触网, 对高峰期牵引供电进行仿真。上行列车运行情况如图 9 所示。

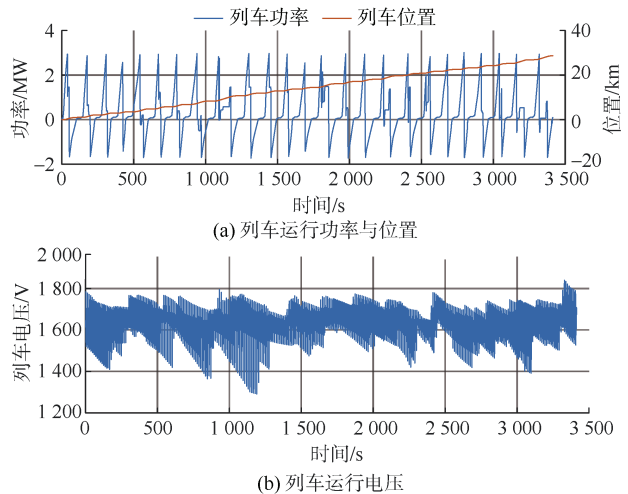


图 9 逆变回馈牵引供电系统仿真上行列车运行情况 (发车间隔 5 min)

Figure 9 The inverter feedback traction power supply system simulates the uplink operation (5 minutes between departures)

3.3.2 储能牵引供电系统仿真结果

储能系统工作模式下, 放电时以变电站开路电压为放电模式开启电压。接触网上有多余再生制动能量时储能系统即开启充电模式, 以保证有充足荷电状态。其余时刻储能系统均处于备用状态。储能系统基本参

数包括：额定功率为 1.5 MW，额定电压为 1 500 V，最大荷电状态为 0.9，总容量为 8.4 kW·h，最小荷电状态为 0.2，荷电状态初始值为 0.5。

基于高功率牵引制动模式，考虑系统内每个变电站均配备储能系统，高峰期对牵引供电进行仿真(储能系统放电工作电压为 1 633 V)。上行列车运行情况如图 10 所示。

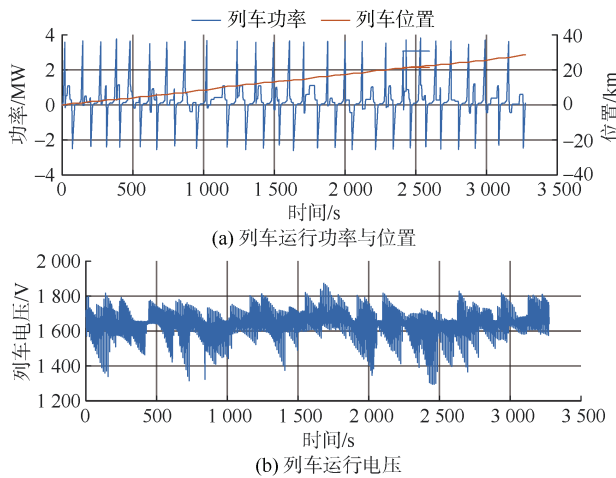


图 10 储能牵引供电系统仿真上行列车运行情况(发车间隔 5 min)

Figure 10 The energy storage traction power supply system simulates the uplink operation (5 minutes between departures)

3.3.3 光伏牵引供电系统仿真结果

在高功率牵引制动模式下，考虑所有变电站均安装光伏发电系统(容量为 0.25 MW)，对高峰期牵引供电进行仿真。在变电站均考虑光伏发电系统时，上行列车运行情况如图 11 所示。

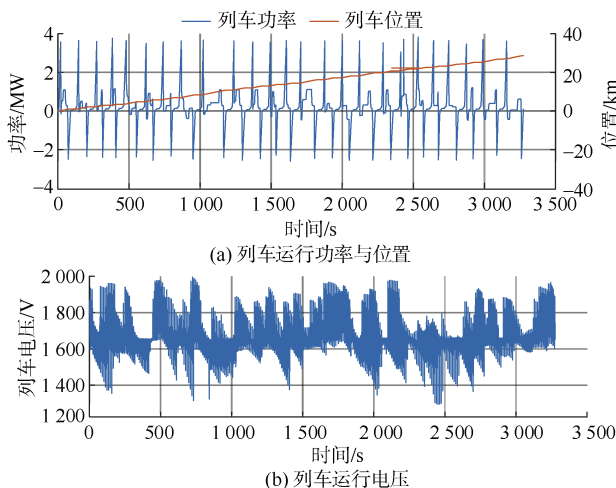


图 11 光伏牵引供电系统仿真上行列车运行情况(发车间隔 5 min)

Figure 11 Photovoltaic traction power supply system simulation of the operation of the vehicle (5 minutes between departures)

3.4 对比与分析

以合肥轨道交通 1 号线工作日一天共有 153 趟车次计算，全天列车仿真能耗为 80 742 kW·h(3 MW 牵引制动模式)，则一年约为 2 947 万 kW·h(3 MW 牵引制动模式)。

由表 2 可知，逆变回馈及储能系统均能降低牵引供电系统的能耗。其中储能系统由于充电状态的限制，能耗相比逆变回馈要高，但其可减小牵引变电站峰值功率(储能与变电站同时提供牵引能，从而减小变电站峰值功率)。安装光伏系统的牵引供电系统在减小牵引变电站能耗方面表现最佳，分别在 5 min 和 7 min 发车间隔下减少 23.11%和 24.89%的能耗。

表 2 各牵引供电系统仿真结果对比
Table 2 Comparison of simulation results of each traction power supply system

系统	发车间隔/min	变电站总能耗/(kW·h)	能耗减小率/%
现有牵引供电系统	5	507.38	基准值
	7	548.35	基准值
逆变回馈牵引供电系统	5	471.57	7.05
	7	474.92	13.39
储能牵引供电系统	5	479.74	5.44
	7	482.87	11.94
光伏牵引供电系统	5	390.11	23.11
	7	411.85	24.89

在 3 MW 牵引制动模式下，具有逆变回馈系统的列车全天能耗为 72 405 kW·h，则一年约为 2 643 万 kW·h。具有储能系统的列车全天能耗为 73 569 kW·h，一年约为 2 685 万 kW·h。具有光伏发电系统列车全天能耗为 61 350 kW·h，一年约为 2 239 万 kW·h。

各牵引系统的仿真潮流求解时间存在差异，传统牵引供电系统求解时间为 23.5 s，逆变回馈牵引供电系统求解时间为 29.3 s，储能牵引供电系统求解时间为 30.1 s，光伏牵引供电系统求解时间为 24.5 s。仿真速度可满足城轨牵引供电系统的仿真与节能分析。

4 结论

1) 基于传统潮流计算解析方法，研究了多种新型城轨供电系统的节能策略，建立了城市轨道交通牵引供电系统等效电路模型。

2) 对新型城轨牵引供电模型多车运行进行了仿真，仿真结果表明，与现有牵引供电系统相比，具有逆变回馈牵引供电系统能够明显减小变电站能耗，节

能最高可达 13.39%；具有储能系统牵引供电系统能够明显减小变电站峰值功率，节能最高可达 11.94%；安装光伏发电的系统可显著减少牵引变电站功耗，节能最高可达 24.89%，同时提升了清洁能源的使用比例。

本文主要探究了单一新型牵引系统的案例分析和节能效果，下一步将重点研究混合式新型牵引供电系统，包括合理优化牵引供电系统的储能设备参数、明确光伏发电系统的配比及制定相应的协同控制策略等。

参考文献

- [1] 张冲, 王斌, 谢胜茂. 列车牵引节能技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(6): 13-18.
ZHANG Chong, WANG Bin, XIE Shengmao. Research on energy saving technology of train traction[J]. Modern urban transit, 2021(6): 13-18.
- [2] 刘向飞. 城市轨道交通逆变回馈系统装置控制研究[J]. 中国科技信息, 2018(16): 85-87.
LIU Xiangfei. Research on device control of inverted feedback system in urban rail transit[J]. China science and technology information, 2018(16): 85-87.
- [3] 桑佳楠, 丁明进, 刘春松. 再生制动能量电容储能装置组网及协同控制系统[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 187-190.
SANG Jianan, DING Mingjin, LIU Chunsong. Networking and synergetic control system for regenerative braking energy capacitor energy storage device[J]. Urban mass transit, 2022, 25(9): 187-190.
- [4] 李昕. 城市轨道交通逆变回馈型再生制动能量吸收装置应用效果分析[J]. 铁道技术监督, 2022, 50(6): 49-52.
LI Xin. Application effect analysis of inverter feedback type regenerative brake energy absorption device for urban rail transit[J]. Railway quality control, 2022, 50(6): 49-52.
- [5] 杨中平, 林飞. 储能技术在地面式再生制动能量吸收和利用装置中的应用[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 1-8.
YANG Zhongping, LIN Fei. Application of energy storage technology in stationary regenerative braking energy absorption and utilization devices[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 1-8.
- [6] 刘安海, 于惠钧, 黄星, 等. 地铁车辆再生制动混合型储能回收装置研究[J]. 电工技术, 2021(1): 1-4.
LIU Anhai, YU Huijun, HUANG Xing, et al. Research on regenerated braking hybrid energy storage and recovery device for metro vehicles[J]. Electric engineering, 2021(1): 1-4.
- [7] 王晓鹏, 连成华, 任宝兵, 等. 含逆变回馈装置的城轨牵引供电系统建模与节能计算[J]. 铁道机车与动车, 2019(8): 16-19.
WANG Xiaopeng, LIAN Chenghua, REN Baobing, et al. Modeling and energy-saving calculation of urban rail traction power supply system with inverter feedback device[J]. Railway locomotive and motor car, 2019(8): 16-19.
- [8] 丁鑫. 城市轨道交通新型光伏发电系统研发[J]. 电工技术, 2020(16): 31-32.
DING Xin. Research and development of Novel Photovoltaic power generation system for urban rail transit[J]. Electric engineering, 2020(16): 31-32.
- [9] SENGOR I, KILICKIRAN H C, AKDEMIR H, et al. Energy management of a smart railway station considering regenerative braking and stochastic behaviour of ESS and PV generation[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2018, 9(3): 1041-1050.
- [10] YANG Z H, YANG Z P, XIA H, et al. Brake voltage following control of supercapacitor-based energy storage systems in metro considering train operation state[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(8): 6751-6761.

(编辑: 王艳菊)

合肥轨道首创全空间智能感知巡检新模式

2024年7月22日, 部署于合肥轨道4号线全线的无人机顺利升空, 自动执行轨道安全保护区巡检任务, 同时, 隧道内量子数据开始实时传输、人工智能模型开始实时计算, 标志着合肥轨道正式上线运行全空间智能感知巡检系统。该系统融合了低空智能巡检与量子精密测量两大核心技术, 这种技术模式为国内首创。

为最大程度保障轨道交通线网运营安全, 防止违规施工影响结构安全, 近年来, 合肥轨道深耕低空和量子技术, 首创全新模式的全空间智能感知巡检系统。该系统使用无人机“特种兵”低空实时监测地面情况, 地下有量子精密测量“哨兵”负责地下监测和预警地面情况, 两者都装备了智能算法大脑, 分工明确、各显其能, 共同协作实现轨道安全全方位监控与预警, 为乘客乘车安全加上了双保险。

摘编自 <https://www.chinametro.net/index.php?m=newscon&id=539&aid=60222>