

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.017

混合型再生制动储能装置在地铁中的应用

周宇, 秦斌, 王欣

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 地铁运行区间距离短, 启动、制动频繁, 其制动时会产生大量的再生制动能量。而传统的电阻耗能型制动不能充分利用再生制动能量, 造成能量浪费, 因此, 提出将超级电容和电阻混合型储能装置应用于地铁的方案, 并讨论了装置的构成及其控制策略。最后, 针对所提方案建立了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型, 并根据地铁运行特性进行了仿真实验。仿真结果表明, 所提方案可以有效地回收再生制动能量, 同时能稳定直流牵引网的电压。

关键词: 再生制动能量; 超级电容; 地铁; 电阻制动; Matlab/Simulink 仿真

中图分类号: U264.91⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)01-0093-06

Application of the Hybrid Regenerative Braking Energy Storage Device in Metro

ZHOU Yu, QIN Bin, WANG Xin

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The urban rail transit is characterized with short operation distance between adjacent stations, which results in a huge regenerative braking energy produced in the frequent starting and braking process. A great energy waste will arise for the traditional energy consumption braking due to the fact that it fails to make full use of regenerative braking energy. In view of this current situation, a scheme has thus been proposed of the application of the super capacitor and resistor hybrid energy storage device to the subway, followed by a discussion of the structure of the device and its control strategies. Finally, a simulation model based on Matlab/Simulink has been established according to the proposed scheme, and a simulation experiment has been carried out according to the subway operating characteristics. The simulation results show that the proposed method can effectively recycle the regenerative braking energy, with the DC traction network voltage stabilized.

Keywords: regenerative braking energy; super capacitor; subway; resistance braking; Matlab/Simulink simulation

1 研究背景

随着城市化建设的不断推进和人口的急剧增长, 交通不便给居民出行带来了诸多影响。城市轨道交通

中的地铁不仅运输量大、运行速度快、绿色无污染、乘坐舒适, 而且能够节省能源消耗, 对城市的发展具有重大意义^[1-2]。

收稿日期: 2017-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673166), 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4022), 湖南省教育厅科研基金资助重点项目(17A053)

作者简介: 周宇(1990-), 男, 安徽枞阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂电气系统信息集成和协调控制, E-mail: 692079896@qq.com

通信作者: 秦斌(1963-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事复杂工业过程建模与优化控制方面的教学与研究, E-mail: qinbin99@163.com

目前，应用于地铁中的电气牵引传动系统普遍采用可变电电压、可变频率（variable voltage and variable frequency, VVVF）的变频调速技术^[3]。当电气牵引传动系统电制动时，牵引电机由电动机拖动状态转换为发电机工况，地铁的动能转化为电能，并向直流牵引电网回馈^[4]。地铁运行的站间距离较短，频繁地启动、制动会产生大量的再生制动能量，由于能量具有单向流动性，因而当再生制动能量回馈至牵引网时会抬升牵引网电压，甚至可能超过电网的安全供电电压，为保证系统电压稳定在安全范围内，系统中必须加入制动能量吸收装置。

常见的再生制动能量吸收装置有电阻能耗型、飞轮储能型、逆变回馈型和超级电容储能型等。其中，电阻能耗型装置的技术较为成熟，应用较为普遍，但因它是以热能的形式释放掉制动能量，无疑会加剧车站温升、增加通风散热系统的负担，既不节能又不经济，并且达不到再生能量充分利用的目的；飞轮储能型装置因其对工作环境的要求较高，需密封于真空环境中，导致其造价较高、实现难度较大，尚处于研究阶段；逆变回馈型装置是将再生制动能量逆变回馈至牵引变电站中压侧（10 kV 或 35 kV）或站用配变站低压侧（400 V），这种能量回馈方式的缺点是对交流侧电网电压、电流产生畸变影响^[4]，带来谐波污染；超级电容储能型装置因具有功率密度大、充放电速度快、使用寿命长等特点而成为近年来的研发热点，该储能系统不仅能有效吸收地铁制动时产生的再生制动能量，而且能为地铁启动时提供一定的功率支撑^[5]。

本研究主要探讨了将车载式超级电容 + 电阻混合型储能装置应用于地铁中的储能方案。相比于大容量配置的地面式超级电容储能系统，车载式超级电容具有体积较小、质量较轻、投入成本较低、牵引网线路损耗较小等优点。因此，针对地铁列车再生制动能量如何有效利用和抑制因列车启动、制动引起的直流牵引网电压波动较大等问题，拟系统介绍超级电容和电阻主从配合的地铁再生制动能量利用方案的构成、原理及其控制策略。并且在 Matlab/Simulink 软件上搭建了地铁混合型再生制动储能装置的仿真电路，根据地铁牵引制动特性进行仿真实验。实验结果表明，所提出的方案实现了稳定牵引网电压和节能优化的目的。

2 地铁运行特性曲线分析

地铁运行的速度曲线如图 1 所示。图 1 中，OC 段为地铁加速牵引运行阶段，其中 OA 段为恒转矩区，AB 段为恒功率区；BC 段为自然特性区；CD 段为地铁惰性运行阶段；DE 段为地铁制动减速运行阶段。

段为地铁惰性运行阶段；DE 段为地铁制动减速运行阶段。

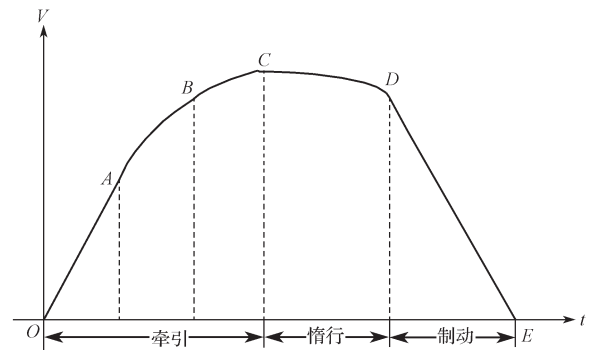
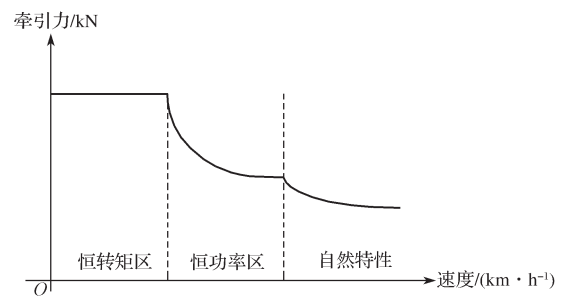


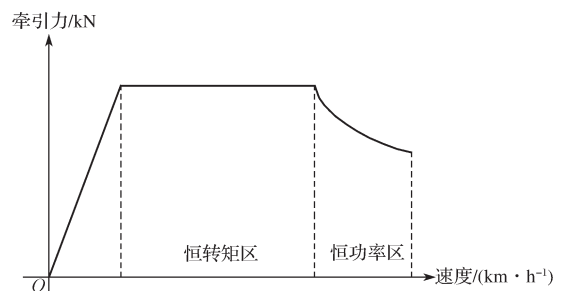
图 1 地铁运行的速度曲线

Fig. 1 Speed curve of metro operation

地铁的牵引力和制动力特性曲线如图 2 所示。为便于仿真分析，可将地铁的牵引阶段视为理想加速阶段，其加速至恒定速度运行一段时间后，再以恒定的减速度制动停车。



a) 牵引力特性曲线



b) 制动力特性曲线

图 2 地铁运行中的牵引、制动力特性曲线

Fig. 2 Characteristic curve of traction and braking power in metro operation

3 超级电容 + 电阻混合型储能系统及控制策略

3.1 系统结构

本研究提出的混合型储能系统原理如图 3 所示。整个混合型储能系统主要由牵引供电系统、中间连接环节、地铁牵引传动系统、制动电阻吸收模块和超级电容储能模块 5 部分组成。

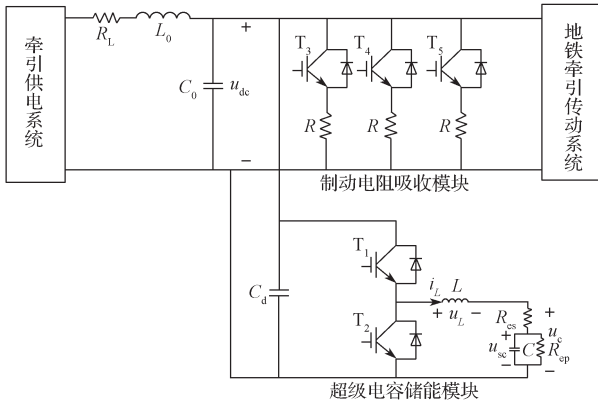


图 3 混合型储能系统原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of hybrid energy storage system

1) 牵引供电系统。牵引供电系统连接牵引变电所和牵引网^[6]。首先, 牵引变电所将城市电网中压 10~35 kV 交流电经降压、整流为城市轨道交通所需的标准直流电压 (750 V 或 1 500 V), 再经牵引网输送给地铁, 为机车提供电能。牵引变电所主要由 24 脉波整流机组组成, 经 24 脉波整流输出的直流电脉动较小、直流供电质量较高。牵引网包括馈电线、接触网、第三轨和回流线等部分, 是地铁取流、安全有效运行的重要环节。

2) 中间连接环节。其起连接牵引网和机车、制动能量吸收装置的作用。牵引网中虽存在线路阻抗, 但因实际的线路阻抗是随着地铁运行距离而变化的, 故本研究不予考虑, 且忽略分布电导、电容的影响, 因此, 由电感 L_0 和电容 C_0 构成中间滤波、连接环节。

3) 地铁牵引传动系统。地铁的牵引电机采用永磁同步电机的 SVPWM (space vector pulse width modulation) 矢量控制方式, 以实现地铁的启动、惰性或巡航和制动工况的模拟。永磁同步电机具有高效节能、高功率密度、高功率因数和重量轻等优点, 因而在轨道交通牵引系统中日益受到关注。相比于传统感应电机, 永磁同步电机的能耗更低, 并且可设计成全封闭结构, 降低噪声污染, 在低功率场合可实现直接驱动^[7]。

4) 制动电阻吸收模块。该模块在地铁制动时向电网回馈再生制动能量。地铁制动瞬时功率较大, 超过牵引网安全运行电压 1 800 V 时, 制动电阻投入工作, 将网压波动抑制在安全电压以内。制动电阻不仅能吸收过高的再生制动能量, 优化超级电容超容量配置, 减小车载超级电容体积、降低投入成本, 还能在超级电容储能系统出现故障时退出运行, 维持牵引网电压稳定。

5) 超级电容储能模块。因线路中存在阻抗, 故地铁在启动加速时, 牵引网电压跌落; 地铁制动减速时,

牵引网电压抬升。超级电容储能系统通过非隔离型双向 DC-DC 变换器, 快速放电、充电补偿一定的牵引网跌落电压和吸收部分制动能量, 实现“削峰填谷”、平衡直流侧电压和再生制动能量回收利用的目的^[8]。

3.2 控制策略

地铁制动减速时, 超级电容和电阻联合吸收再生制动能量的控制策略如图 4 所示。

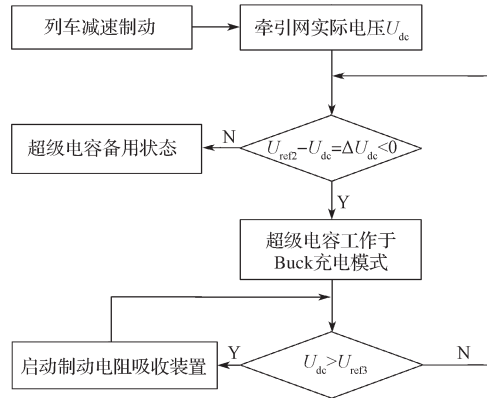


图 4 地铁再生制动控制流程图

Fig. 4 Metro regenerative braking control flow chart

设参考电压 U_{ref1} 、 U_{ref2} 分别为地铁启动加速和制动减速时超级电容放电、充电给定的电压阈值, 本研究中设定 $U_{ref1}=1\ 300\ V$, $U_{ref2}=1\ 600\ V$ 。

图 4 中 U_{ref2} 为地铁制动时启动超级电容吸收制动能量的电压阈值, 根据动能定理, 地铁制动时的初速度越大, 瞬时功率越大, 向电网反送的电能越多, 牵引网电压很可能会超过 1 800 V 的安全运行电压。这时单纯依靠超级电容吸收全部制动能量, 无论是从技术上还是成本上都不太现实^[9]。因此, 当牵引网电压超过二级参考电压 $U_{ref3}=1\ 700\ V$ 时, 启动制动电阻吸收装置, 将牵引网电压稳定在 1 800 V 以内, 防止再生制动失效。

超级电容储能系统可在地铁启动加速时补偿一定的牵引网跌落电压, 其充电、放电储能控制框图如图 5 所示。

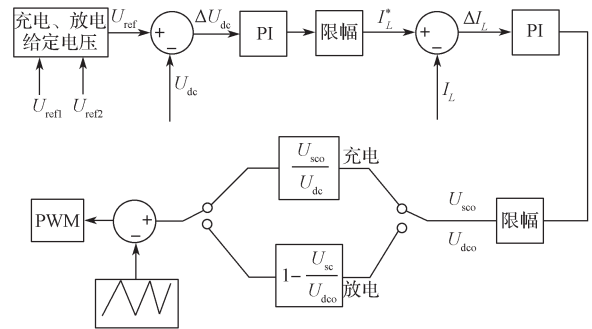


图 5 超级电容储能系统控制框图

Fig. 5 Flow chart of super capacitor energy storage system control

DC-DC 双向变换器不仅实现了储能系统和牵引网之间能量的双向流动, 还提供了一个稳定的控制策略。基于小信号模型的状态空间平均法分析, 采用电压、电流的双闭环控制策略, 在双闭环控制模式下, 系统的动态响应速度快、稳定范围宽^[10]。

根据给定的参考电压和牵引网实际电压, 可经电压外环调节得到超级电容充电、放电的参考电流 I_L^* , 电流内环输出为控制占空比 D 的端电压 U_{sco} 和 U_{dco} ,

再与三角波比较得到触发开关管导通的脉冲 PWM, 从而控制超级电容吸收或释放能量。

4 系统仿真建模及结果分析

4.1 系统建模

利用 Matlab/Simulink 软件搭建地铁混合型再生制动储能装置的仿真电路, 如图 6 所示。

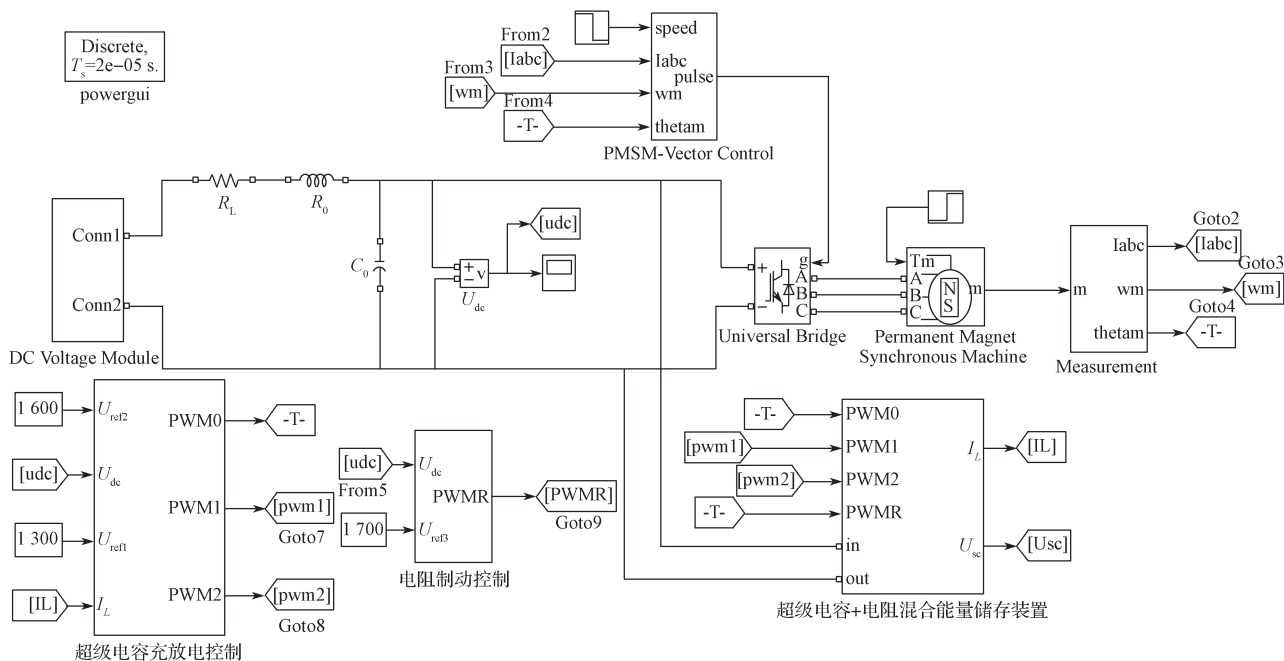


图 6 超级电容 + 电阻混合储能装置的仿真电路

Fig. 6 Simulation of main circuit of ultra-capacitor and resistor hybrid energy storage devices

4.2 仿真结果与分析

4.2.1 地铁以初速度 50 km/h 制动

地铁以初速度为 50 km/h 制动且无超级电容时, 牵引网的电压波形曲线如图 7 所示, 地铁永磁牵引电机的转速曲线如图 8 所示。

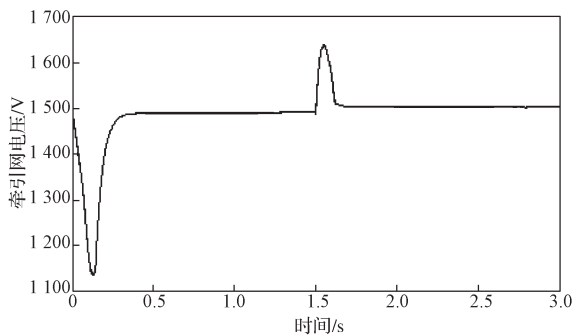


图 7 50 km/h 初速度制动且无超级电容时地铁的牵引网电压波形曲线

Fig. 7 Voltage curve of traction network at an initial speed of 50 km/h without the super capacitor

由图 7 可知, 当地铁以 50 km/h 的初速度制动,

且无超级电容和电阻制动装置投入时, 牵引网的电压波动较大。0~0.15 s 为地铁加速阶段, 其电压迅速跌落至 1 300 V 以下; 此后, 进入巡航模式, 电网电压逐渐回升至 1 500 V 左右; 1.5 s 时, 地铁以初速度 50 km/h 制动, 牵引网电压被抬升至 1 650 V 左右。

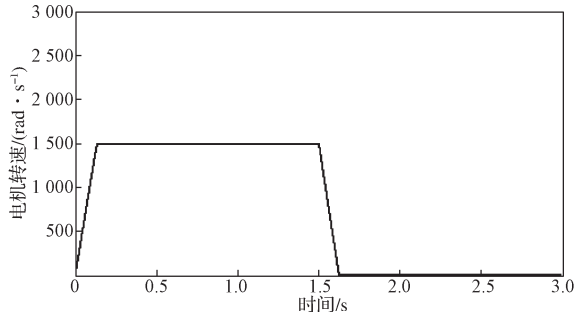


图 8 50 km/h 初速度制动时地铁的电机转速曲线

Fig. 8 Motor speed curve of the subway at an initial speed of 50 km/h

由图 8 可知, 永磁同步电机矢量控制系统的速度响应动态性能较好。

当地铁以 50 km/h 的初速度制动, 并且超级电容储能装置投入运行后, 所得的牵引网电压波形曲线如图 9 所示。

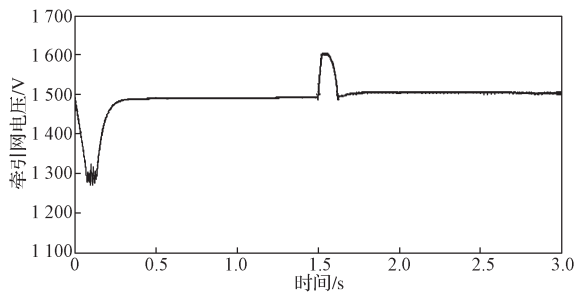
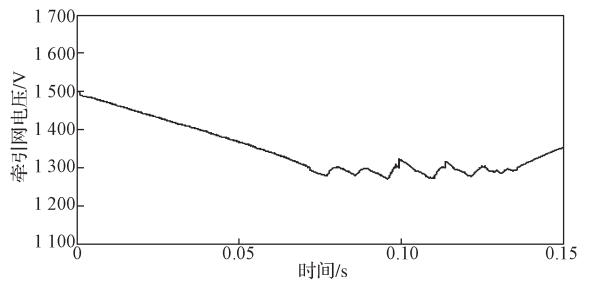


图 9 50 km/h 初速度制动且启动超级电容后的牵引网电压波形曲线

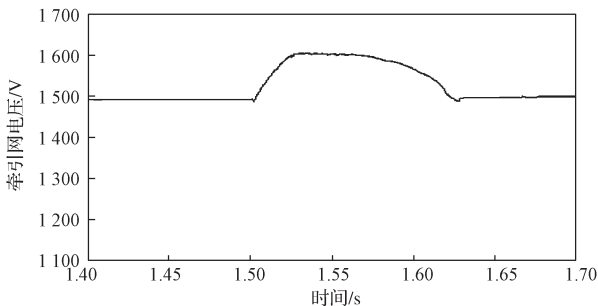
Fig. 9 Voltage waveform curve of the traction network at an initial speed of 50 km/h with the super-capacitor booted

由图 9 可以得知, 设定超级电容放电的电压阈值为 1 300 V, 故当牵引网电压跌落至 1 300 V 以下时, 超级电容储能装置投入运行, 将牵引网跌落电压稳定在 1 300 V 左右; 1.5 s 时地铁制动减速, 牵引网电压抬升至 1 600 V 以上, 但因未达到电阻制动装置启动电压阈值 (1 750 V), 再生制动能量全部由超级电容储能系统吸收。

图 10 是启动超级电容后牵引网电压波形曲线的局部放大图。



a) 加速阶段



b) 制动阶段

图 10 启动超级电容后的牵引网电压波形局部放大曲线
Fig. 10 Voltage waveform curve of the traction network with the super-capacitor booted

由图 9 和 10 可知, 超级电容储能系统接入牵引网后, 具有很好的节能稳压效果。

4.2.2 地铁以初速度 80 km/h 制动

地铁以 80 km/h 的初速度制动时, 牵引网的电压波形曲线如图 11 所示。

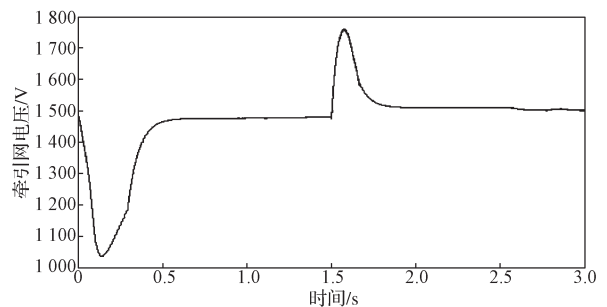
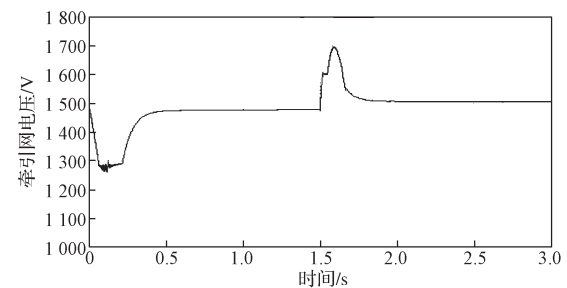


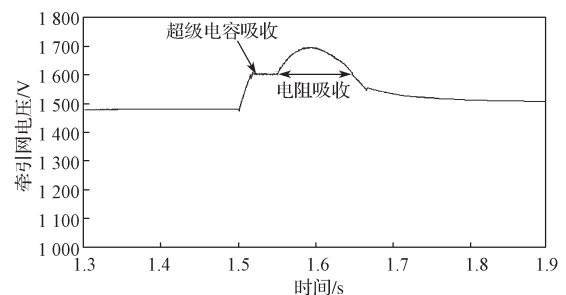
图 11 80 km/h 初速度制动时对应的牵引网电压波形曲线
Fig. 11 Voltage curve of traction network at an initial speed of 80 km/h

由图 11 可知, 地铁以 80 km/h 的初速度制动时, 牵引网的电压峰值超过了 1 700 V, 逼近电网最高安全运行电压 (1 800 V)。

可见, 当地铁以 80 km/h 的初速度制动时, 向电网回馈的制动能量较多, 超级电容储能装置受容量限制不能完全吸收所产生的再生制动能量。此时, 需要电阻制动装置投入工作, 以消耗过剩的制动能量, 将电网最高峰值电压控制在 1 700 V 以内。启动超级电容 + 电阻混合储能装置后的牵引网电压波形曲线如图 12 所示。



a) 完整波形



b) 局部放大

图 12 启动超级电容 + 电阻混合储能装置后的牵引网电压波形曲线

Fig. 12 Voltage waveform of the traction network with the super capacitor and resistor hybrid energy storage devices booted

由图 12 可知, 超级电容 + 电阻混合型储能装置可以有效地回收再生制动能量, 同时稳定直流牵引网电压。

5 结语

针对城市轨道交通地铁启动加速和制动减速阶段会引起牵引网电压较大范围波动的问题, 提出将超级电容 + 电阻混合型储能装置应用于城市轨道交通地铁的方案。利用超级电容的储能优势, 减少电阻制动装置的投入, 不仅充分利用了再生制动能量, 而且具有很好的牵引网稳压效果, 既节能又经济。通过仿真结果分析, 验证了该方案控制策略的合理性和可行性。

参考文献:

- [1] 吴凡. 地铁再生制动能量利用方案[J]. 科技经济导刊, 2016(7): 74-75.
WU Fan. Metro Regenerative Braking Energy Utilization Scheme[J]. Technology and Economic Guide, 2016(7): 74-75.
- [2] 梁枫, 秦斌, 王欣, 等. 基于粒子群算法的地铁列车节能运行优化[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(6): 29-33.
LIANG Feng, QIN Bin, WANG Xin, et al. Optimization of Energy Saving Operation for Metro Trains Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(6): 29-33.
- [3] 马瑜冰, 张泽萌, 吴越, 等. 逆变 + 电阻混合型再生制动逆变装置在城市轨道交通中的应用[J]. 变频器世界, 2014(11): 48-51.
MA Yubing, ZHANG Zemeng, WU Yue, et al. The Design of Communication Between PLC and Frequency Converter Based on Modbus RTU Protocol[J]. The World of Inverters, 2014(11): 48-51.
- [4] 张一, 成建国, 吴松荣, 等. 基于超级电容的地铁列车再生制动能量利用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(9): 56-60.
ZHANG Yi, CHENG Jianguo, WU Songrong, et al. Analysis of Regenerating Energy Utilization Based on Metro Vehicle Super Capacitor[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(9): 56-60.
- [5] 成建国, 吴松荣, 张一, 等. 城轨车辆车载式超级电容储能系统研究[J]. 现代城市轨道交通, 2016(2): 7-11.
CHENG Jianguo, WU Songrong, ZHANG Yi, et al. Study on On-Board Supercapacitor Energy Storage System of Transit Vehicle[J]. Modern Urban Transit, 2016(2): 7-11.
- [6] 闫小伟. 城市轨道交通车辆再生制动能量利用技术比较研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
YAN Xiaowei. A Comparative Research on Regenerative Energy Utilization Technique in Urban Rail System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [7] 马颖涛, 李红, 李岩磊, 等. 轨道交通中永磁同步牵引系统的优势与挑战[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 66-70.
MA Yingtao, LI Hong, LI Yanlei, et al. Overview of Advantages and Challenges of Permanent Magnet Synchronous Traction System in Railway Transit[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(3): 66-70.
- [8] 张秋瑞, 葛宝明, 毕大强. 超级电容在地铁制动能量回收中的应用研究[J]. 电气化铁道, 2012, 23(2): 40-43.
ZHANG Qiurui, GE Baoming, BI Daqiang. Research on the Application of Super Capacitor in the Subway Braking Energy Recovery[J]. Electric Railway, 2012, 23(2): 40-43.
- [9] 边宏超. 地铁牵引系统混合型再生制动能量吸收及利用方案的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
BIAN Hongchao. Research on the Mixed Type of Regenerative Braking Energy Absorption and Utilization of Metro Traction System[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [10] 武利斌. 基于超级电容器的城轨再生制动储能仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
WU Libin. Simulation Research on Regenerative Braking Energy Storage in Urban Rail Based on Super Capacitor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

(责任编辑: 廖友媛)