

基于超级电容的电力牵引特性研究*

李玲^{1,2}, 李宏魁²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804;
2. 河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 以超级电容为唯一动力来源, 以研究适用于轻轨交通车辆的储能式牵引系统为目的, 设计了电力牵引系统的牵引制动特性。该牵引系统以超级电容单体串联用于系统的供电, 从而驱动逆变器和电机转动; 通过手柄控制牵引、惰行与制动工况, 分别设定对应的特性曲线。在 Matlab/Simulink 环境下, 仿真线路的运行状况, 输出储能电源的电流、电压、耗电量等。实验表明, 以超级电容器作为牵引动力电源的驱动方式, 完全满足列车的运行要求, 并且在 1500 m 平直道上运行后的耗电量只有 22%, 再生制动时的能量全部回馈吸收, 可以实现能源的高效循环利用, 明显优于传统轻轨车辆。

关键词: 轨道交通; 超级电容; Matlab 仿真; 储能式; 牵引; 制动

中图分类号: U264

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)24-0078-04

Research on electric tractive characteristics based on supercapacitor

Li Ling^{1,2}, Li Hongkui²

(1. Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Henan Construct Professional Technical Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In this paper, supercapacitor is developed as the only power source for light rail transit vehicles. Connection in series, supercapacitors supply power for the system, and thus drive the inverter and electrical machine rotate. Tractive, coasting and braking mode is controlled by the handle, which has the corresponding characteristic curve. Running state of the line is verified through simulation under Matlab/Simulink environment. The output is current, voltage, power consumption of the energy storage power supply and so on. The experiment showed that supercapacitors as the driving mode of the traction power supply, completely meet the operational requirements of the train, and the power consumption is only 22% after running on 1500 meters straight track, which has significant advantages such as low energy consumption, high regenerative braking energy, to achieve efficient energy recycling, better than the traditional light rail vehicles.

Key words: rail transit; supercapacitor; Matlab simulation; energy storage; traction; braking

通过储能技术的应用, 实现轨道交通功能、性能、品质的提升, 是新世纪新能源政策指导下轨道电力牵引技术“绿色”策略的研究方向^[1]。超级电容器是近年来发展迅速的一种新型的大容量的能量存储器件, 是解决和改善电力性能应用的突破性元器件。超级电容具有优良的技术指标, 是理想的高功率储能器件, 非常适用于作为城市轨道交通车辆的能源动力。

国内外对于超级电容作为储能装置在城市轨道交通中的应用研究, 多是由于快速吸收再生制动能量和瞬

间峰值的补偿, 改善直流电网供电质量。国外, 西门子公司开发的地面超级电容储能装置^[2]以及庞巴迪运输部与德国曼海姆交通公司合作开发的车载超级电容储能装置^[3], 都是从节能的角度出发, 通过车载超级电容器实现制动能量回收以及应急情况下利用超级电容器中储存的能量保持列车的运行(路程有限), 只能在部分线路上实现轻轨车的无接触网运行。国内, 南车株洲电力机车有限公司于 2012 年 8 月 10 日成功下线储能式电力牵引轻轨车辆原型车, 这是世界上首台采用超级电容作为主动力能源的轻轨车辆, 可以实现全线无接触网运营, 具有开创性的价值。

* 基金项目: 2012 年河南省重点科技攻关计划项目(122102210040)

技术与方法 Technique and Method

转折点。

$$a = \frac{F(80) - W(80)}{G_r \times (1 + \gamma)} = 0.3 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

$$\Rightarrow F(80) = 0.3 G_r \times (1 + \gamma) + W(80) = \frac{X}{v_k} \quad (3)$$

$$\Rightarrow X = 415\ 173 \quad (4)$$

$$\frac{3.6P}{v_2} = \frac{X}{v_2} = \frac{F_{\max} \times v_1}{v_2} \quad (5)$$

$$v_2 = \frac{X}{F_{\max} \times v_1} = \frac{415\ 173}{198.792\ 0 \times 36} = 58 \text{ km/h} \quad (6)$$

综上所述,确定牵引特性如下:

$$F = \begin{cases} 198.792 \text{ (kN)} & 0 \text{ km/h} \leq v \leq 36 \text{ km/h} \\ \frac{7156.5}{v} \text{ (kN)} & 36 \text{ km/h} \leq v \leq 58 \text{ km/h} \\ \frac{415\ 173}{v^2} \text{ (kN)} & 58 \text{ km/h} \leq v \leq 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (7)$$

参考不同城市轨道交通列车的制动特性,电气制动常用方式有恒转矩制动和恒转矩制动+自然特性。选择 $v = 60 \text{ km/h}$ 作为恒转矩与自然特性的转折点,并认为 $v = 7.5 \text{ km/h}$ 时电制动力开始下降,并且在 $v = 2.5 \text{ km/h}$ 时电制动力可视已经为零。

列车制动计算方程:

$$B + W = G_T \times (1 + \gamma) \times a \quad (8)$$

其中, B 为列车制动力, W 为列车阻力, G_T 为列车牵引质量, γ 为回转系数, a 为加速度。

对式(8)进行变形:

$$\Sigma B(v) = -\Sigma W(v) + \Sigma [G_T \times (1 + \gamma) \times a(v)] \quad (9)$$

又 $a = 1 \text{ m/s}^2$, 所以以速度作为变量进行求和,并代入 $a(v) = 1 \text{ m/s}^2$, 即可获得恒转矩阶段的制动转矩。

自然特性段:

$$C = B \times v^2 = 191.1 \times 60^2 = 687\ 960 \quad (10)$$

$$B_{\text{电}} = \begin{cases} 37.58v - 93.95 \text{ (kN)} & 2.5 \text{ km/h} \leq v \leq 7.5 \text{ km/h} \\ 191.1 \text{ (kN)} & 7.5 \text{ km/h} \leq v \leq 60 \text{ km/h} \\ \frac{687960}{v^2} \text{ (kN)} & 60 \text{ km/h} \leq v \leq 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (11)$$

3 仿真结果分析

在 Matlab/Simulink 中进行建模,仿真运行后,得出的牵引特性曲线如图 3 所示。

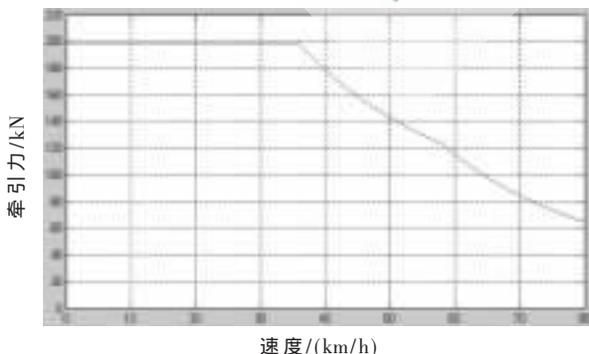


图 3 牵引特性曲线

特征点参数:速度 36 km/h 处为恒功点,最大牵引力 198.8 kN ; 58 km/h 处为自然特性始点,牵引力 123.4 kN ; 最高速度点 80 km/h ,牵引力 64.9 kN 。

同样可以得出电气制动特性曲线,如图 4 所示。

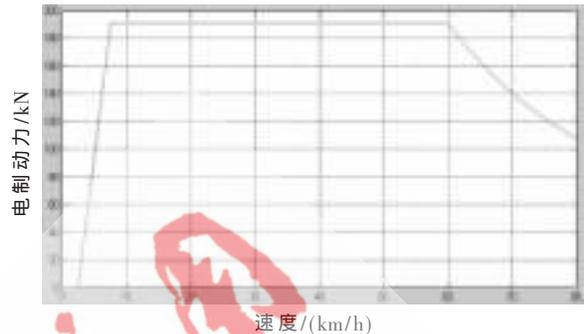


图 4 电气制动特性曲线

特征点参数:速度 2.5 km/h 处制动力为 0; 10 km/h 处牵引力 191.1 kN ; 最高速度点 80 km/h 处制动力 107.5 kN 。

整体牵引系统仿真结果如图 5 所示,运行里程为 $1\ 500 \text{ m}$,列车采用牵引、惰行、制动 3 个阶段运行,总运行时间为 92 s 。其中,牵引段用时 33 s ,行程 446 m ,列车达到最高速度 80 km/h 开始惰行;惰行段运行时间为 34 s ,行程 769 m ;制动段用时 25 s ,行程 285 m 。

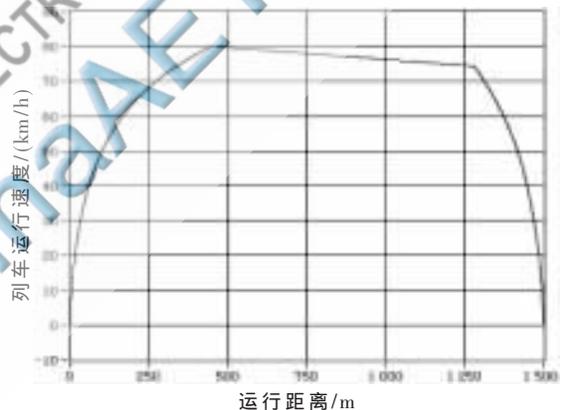


图 5 仿真的运行特性曲线

在仿真过程中,储能电源部分以电流值作为输入,电压值作为输出,连接受控电压源模块作为模型的供能。通过仿真运行曲线可以看出,储能系统的电压范围在 $575 \text{ V} \sim 825 \text{ V}$ 之间,如图 6 所示。满足整车的额定工作电压 $\text{DC } 750 \text{ V}$ 、工作电压范围 $\text{DC } 500 \text{ V} \sim 900 \text{ V}$ 的要求。

资料显示,国内外装有储能系统的轻轨或地铁列车再生制动的能量是牵引能量的 30% 左右。但是,再生制动也有限制条件,即其所产生的能量需要由其他列车所吸收,如果能量得不到吸收,则会使网压提高或者只能通过制动电阻消耗这部分能量,从而导致能源的浪费。而其被吸收的量取决于列车的运行密度,如广州地铁一号线的行车间隔为 $360 \text{ s} \sim 420 \text{ s}$ 时,其吸收利用率仅为 10% 。

采用超级电容作为电源,从耗电量变化图(图 7)中可以看出,耗电量只有 22% ,而且再生制动的能量回收

技术与方法 Technique and Method

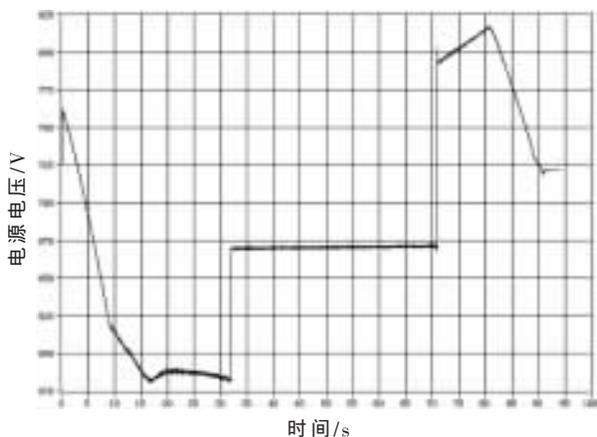


图6 储能电源电压变化值

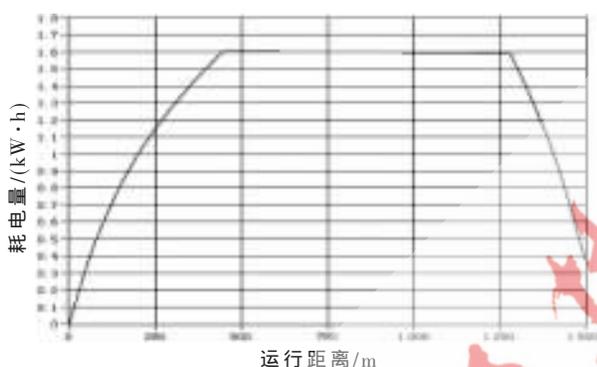


图7 耗电量变化值

在车辆自身的制动过程中全部回馈吸收,不需要其他列车吸收,其能量的回收利用率,从而可以节约能源的消耗,明显优于传统车辆。

本文以超级电容器作为车辆运行的唯一动力来源,根据中小运量轨道交通车辆的特点,设计了电力牵引系统的牵引、制动特性,并在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真实验。实验表明,以超级电容器作为牵引动力电源的驱动方式,完全满足列车的运行要求,并且在 1 500 m 平直道上运行后,再生制动时的能量全部回馈吸收,从而

可以节约能源的消耗,实现能源的高效循环利用,明显优于传统轻轨车辆。现阶段只是进行理论验证,后续研究还会依据不同线路条件、不同列车编组,对超级电容器组件及其管理系统以及牵引制动特性进行完善和优化,以实现完全无供电网条件下轻轨车辆的高效运行。

参考文献

- [1] 刘友梅. 轨道电力牵引新能源策略的思考[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(5): 1-4.
 - [2] ALLEGRE A L, BOUSCAYROL A, VERHILLE J N. Reduced-scale-power hardware-in-the-loop simulation of an innovative subway[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1175-1185.
 - [3] AYAD M Y, BECHERIE M, HENNI A, et al. Sliding mode control and unit power factor applied to embarked supercapacitors for electrical train traction[C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari: 2010: 334-339.
 - [4] 杨颖, 陈中杰. 储能式电力牵引轻轨交通的研发[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(5): 7-16.
 - [5] ALLEGRE A L, BOUSCAYROL A. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 4001-4012.
 - [6] 梁海泉, 谢维达, 孙家南, 等. 超级电容器时变等效电路模型参数辨识与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 949-954.
 - [7] 谢维达. 电力牵引与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
 - [8] 孙中央. 列车牵引计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- (收稿日期: 2013-08-25)

作者简介:

李玲, 女, 1979 年生, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向: 轨道交通电力牵引控制。

李宏魁, 男, 1955 年生, 高级工程师, 主要研究方向: 土木工程。