

基于列车制动功率的地面式储能系统阈值优化研究*

董礼玮 王之琪 胡景泰 梁海泉 左建勇

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 对地面式储能系统与制动电阻联合工作时的阈值设定进行优化研究。以降低再生制动能量的线路损耗与稳定列车受电弓处牵引网压为目标,提出了一种根据列车最大制动回馈功率的阈值优化方法。采用地铁实际线路参数进行仿真,结果表明:阈值优化后,单车制动时再生制动能量回收率得到有效提升;多车制动时列车受电弓处网压得到抑制,避免再生制动失效情况的发生。

关键词 地铁; 列车再生制动; 地面式储能系统; 阈值优化; 能量回收率

中图分类号 U223.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.029

Threshold Optimization of Stationary Energy Storage System Based on Train Braking Power

DONG Liwei, WANG Zhiqi, HU Jingtai, LIANG Haiquan, ZUO Jianyong

Abstract Optimization of threshold of the stationary energy storage system and braking resistor is studied. In order to reduce the energy loss of regenerative brake on the line impedance and to stabilize the voltage of pantograph, a threshold optimization method based on maximum braking feedback power of train is proposed. The simulation is conducted by using actual line parameters of metro. The results show that the method can effectively improve the energy recovery rate of regenerative brake in the case of single-vehicle brake and can reduce the voltage of pantograph and avoid the failure of regenerative brake in the case of multi-vehicle brake.

Key words metro; train regenerative brake; stationary energy storage system; threshold optimization; energy recovery rate

Author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

超级电容器具有功率密度大、充放电速度快、循环寿命长、效率高等优点^[1-2],因此适用于回收地

铁车辆在频繁启停过程中产生的大量再生制动能量^[3]。对储能系统的工作阈值进行优化通常可实现更好的能量管理效果。文献[4]在考虑线路阻抗和变电所非理想空载输出状态的基础上,提出了设置动态阈值提高储能系统工作性能的控制方法。文献[5]提出了基于空载电压和SOC(荷电状态)的动态阈值控制方法,用于改善牵引网空载电压波动对储能装置的影响。文献[6]研究了包括制动电阻启动电压、储能装置吸收阈值等因素在内的多目标优化,成功地提高了整体节能率。

本文考虑制动能量的线路阻抗损耗,推导了储能系统充电阈值与能量回收率的关系,验证了通过提高储能系统充电阈值降低能量损耗的可行性。为了保证受电弓处网压处于正常工作范围,同时最大限度提高能量回收率,对制动电阻工作阈值进行了优化研究。在此基础上,提出了一种根据列车最大制动回馈功率的储能系统和制动电阻工作阈值优化方法。最后通过仿真,分别在单车制动和多车制动工况下对该阈值优化方法的有效性进行了验证。

1 储能系统结构及控制策略

1.1 储能系统结构

地铁的地面式再生制动储能系统由双向DC/DC变换器和超级电容储能装置两部分组成,如图1所示。其中,双向DC/DC变换器由降压斩波(Buck)电路和升压斩波(Boost)电路两部分组成。在Buck模式下,能量从直流电网流向储能装置,储能装置处于充电状态;在Boost模式下,能量由储能装置流向直流电网,储能装置处于放电状态。

1.2 储能系统控制策略

直流牵引网电压变化能够直接反映列车运行状态,因此本文采用以牵引变电所出口处网压为控

*上海市磁浮与轨道交通协同创新中心资助项目

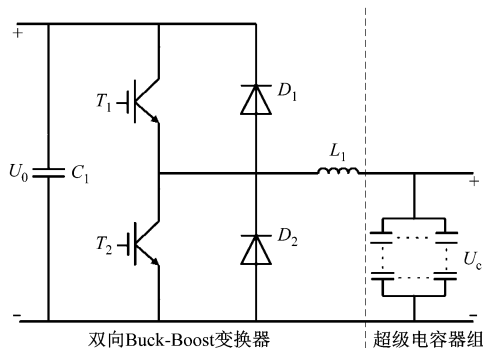


图1 地面式再生制动储能系统结构

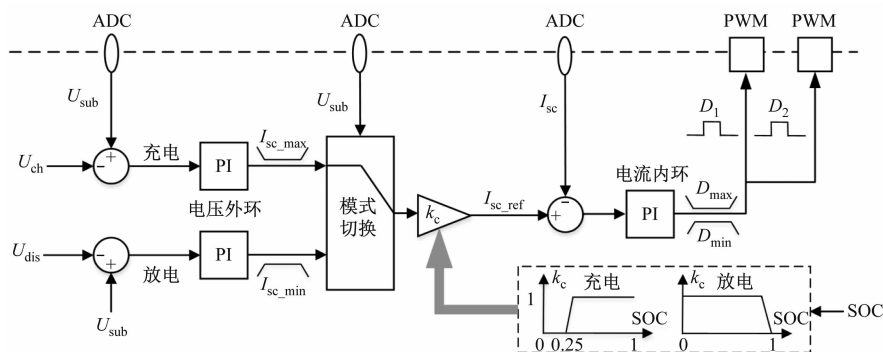


图2 地面式再生制动储能系统控制框图

2 储能系统阈值优化分析

制动能量由车辆向储能系统传输的过程中,有一部分损耗在线路阻抗上。为减少损耗能量,最大限度地将其回收是阈值优化的关键。在制动过程中,列车某时刻向牵引网反馈功率为定值,若改变储能系统充电阈值,则牵引变电所出口处网压受控会发生改变,线路上电流随之产生变化,从而影响线路的能量损耗。下面假设储能系统的容量能够完全吸收单列车制动能量,使用广州地铁4号线万胜围站到车陂南站区间实际参数,对储能系统充电阈值与制动能量回收率的关系进行推导。

列车制动回馈功率和线路参数的关系:

$$P_e = I_{\text{line}} U_t \quad (1)$$

列车受电弓处网压与储能系统充电阈值的关系:

$$U_t = U_{\text{chl}} + I_{\text{line}} R_{\Sigma} \quad (2)$$

制动回馈功率在线路上的损耗功率为:

$$P_{\text{line}} = I_{\text{line}}^2 R_{\Sigma} \quad (3)$$

储能装置的内阻损耗功率为:

$$P_{\text{sclost}} = I_{\text{sc}}^2 R_{\text{sc}} = I_{\text{line}}^2 R_{\text{sc},o} = k I_{\text{line}}^2 R_{\Sigma} \quad (4)$$

式中:

P_e ——列车制动回馈功率;

I_{line} ——牵引网电流;

U_t ——列车受电弓处网压;

U_{chl} ——储能系统充电阈值;

R_{Σ} ——线路总阻抗,包括接触网阻抗、钢轨阻抗以及受电弓阻抗;

P_{line} ——线路上的损耗功率;

P_{sclost} ——储能装置的内阻损耗功率;

R_{sc} ——储能装置等效内阻;

I_{sc} ——储能装置工作电流;

$R_{\text{sc},o}$ ——根据储能装置的实际内阻损耗等效到牵引网上的电阻;

k ——内阻等效系数,取0.2。

能量回收率 η 的计算公式为:

$$\eta = 1 - \frac{\int (P_{\text{line}} + P_{\text{sclost}}) dt}{\int P_e dt} \quad (5)$$

结合式(1)~(5),并经过化简得到:

$$\eta = 1 - 1.2 \frac{R_{\Sigma}}{U_{\text{chl}}^2} \frac{\int P_e^2 dt}{\int P_e dt} \quad (6)$$

由式(6)可得能量回收率与储能系统充电阈值的关系,如图3所示。由图3可知,能量回收率随着

储能系统充电阈值单调递增。在实际控制过程中,储能系统充电阈值在 1 500 V 往上,此时随着充电阈值增大,能量回收率增长越来越缓慢,最终趋近水平。

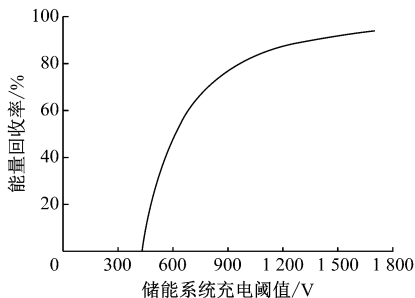


图3 储能系统充电阈值与能量回收率关系

储能系统充电阈值越高,能量回收率越大,但若设置过高,当接近制动电阻工作阈值 U_{ch2} 时会触发制动电阻工作。因此, U_{ch1} 的设置应小于 U_{ch2} 。制动电阻工作阈值的取值决定了储能系统充电阈值的上限,若要最大限度提升能量回收率,制动电阻工作阈值要设置得更高一些。受电弓处网压由于线路阻抗的存在比出口处网压要高, U_{ch2} 设定得过高可能会导致再生制动失效。为了避免再生制动失效,同时最大限度提高能量回收率,有必要对制动电阻的工作阈值 U_{ch2} 设定范围进行研究。

制动电阻工作时受电弓处网压应满足:

$$U_t = U_{ch2} + I_{line} R_{\Sigma} \quad (7)$$

$$U_t \leq 1\,800 \quad (8)$$

结合式(1)、式(7)和式(8),可推导出制动电阻工作阈值的取值范围为:

$$U_{ch2} < \min\left(\frac{3\,600^2 - 4P_e R_{\Sigma}}{7\,200}\right) = \left(\frac{3\,600^2 - 4P_{e,max} R_{\Sigma,max}}{7\,200}\right) \quad (9)$$

式中:

$P_{e,max}$ ——最大制动回馈功率;

$R_{\Sigma,max}$ ——最大线路总阻抗。

因此,在保证受电弓处网压处于正常工作范围的前提下,使能量回收率最大的 U_{ch1} 和 U_{ch2} 取值分别为:

$$\begin{cases} U_{ch1} = U_{ch2} - \Delta U_1 \\ U_{ch2} = \frac{3\,600^2 - 4P_{e,max} R_{\Sigma,max}}{7\,200} - \Delta U_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:

ΔU_1 、 ΔU_2 ——取值裕度,取值应分别为储能系

统和制动电阻工作时电压波动引起的最大偏差值。

3 仿真验证

为了验证上文的阈值优化分析,将所研究线路区间的参数以及车辆制动功率曲线输入到仿真模型中,对单车制动和多车制动两种工况下分别进行验证。

3.1 单车制动

初始条件下设置储能系统充电阈值为 1 500 V,制动电阻工作阈值为 1 650 V。在单列车制动的工况下,牵引变电所出口处网压曲线如图 4 所示,储能装置充电电流与电压如图 5 所示。

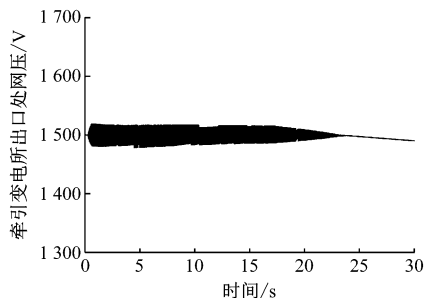


图4 单车制动时牵引变电所出口处网压

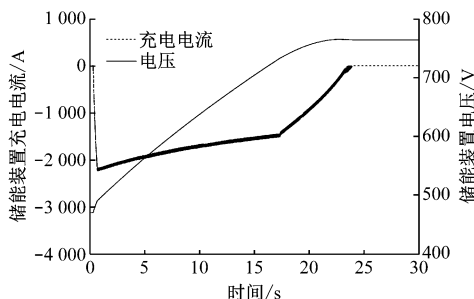


图5 单车制动时储能装置充电电流和电压

由图 4 可知,牵引变电所出口处网压在整个制动过程都维持在 1 500 V 左右,波动范围在 $\pm 1.5\%$ 左右,制动能量都被储能系统吸收,制动电阻未启动。根据图 5 中储能装置的电压变化,计算出再生制动能量回收率为:

$$\eta = \frac{E_s}{E_f} = \frac{\frac{C \cdot \Delta(U_{sc}^2)}{2}}{\int P_e dt} = 93.2\% \quad (11)$$

式中:

E_s ——储能装置吸收能量;

E_f ——列车再生制动反馈能量;

C ——储能装置等效电容;

U_{sc} ——储能装置电压。

根据式(10),计算出优化的 U_{ch1} 和 U_{ch2} 分别为 1 670 V、1 690 V,即该阈值配置下能量回收率达到最大。在制动电阻工作阈值 U_{ch2} 分别为 1 650 V 和 1 690 V 的情况下,改变储能系统充电阈值并进行多次仿真,结果如图 6 所示。由图 6 可知,当储能系统充电阈值 U_{ch1} 为 1 500 ~ 1 630 V 时,优化前后的制动能量回收率都随着 U_{ch1} 的增大呈增长趋势,这与式(6)的推导结果保持一致。当 U_{ch1} 为 1 635 V 时,优化前的能量回收率轻微下降,这是因为在控制过程中网压会产生波动,在储能系统充电阈值接近制动电阻工作阈值时,容易触发制动电阻工作,从而消耗了一部分能量,由此也验证了式(10)中留有取值裕度的必要性。随着 U_{ch1} 继续增大,在制动电阻上消耗的能量变得更多,制动能量回收率迅速下降。而优化后的能量回收率继续增长,在 U_{ch1} 为 1 670 V 时达到最大值 94.3%,较初始阈值条件下 93.2% 的能量回收率提高了 1.1%。同理, U_{ch1} 增长到 1 690 V 之后,制动能量回收率开始迅速下降。

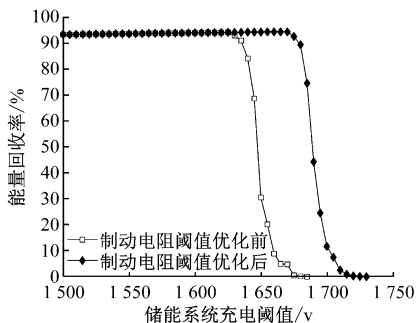


图6 制动电阻阈值优化前后能量回收率

3.2 多车制动

根据所研究区间发车时刻表可知,在制动过程中可能出现最大回馈功率的工况是上下行车辆同时制动。该情况下,制动能量超过储能装置容量,储能装置会提前充满,制动电阻随后开始吸收多余能量。此时阈值优化的主要目的是为了保证列车受电弓处网压不超过临界值,避免再生制动的失效。仍以初始的阈值状态进行仿真,该工况下牵引变电所出口处网压如图 7 所示,列车受电弓处网压如图 8 所示。

由图 7 可知,在第 17 s 左右,牵引变电所出口处网压由 1 500 V 上升到 1 650 V,此时储能装置处于过充状态,在 SOC 限流控制下已停止工作,制动电阻投入工作吸收多余制动能量。由图 8 可知:在

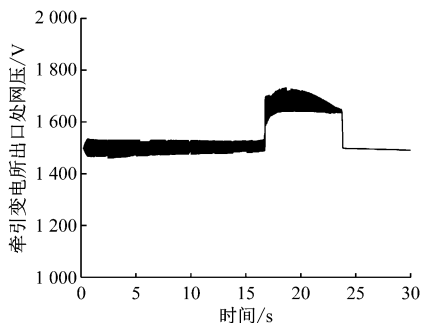


图7 多车制动时牵引变电所出口处网压

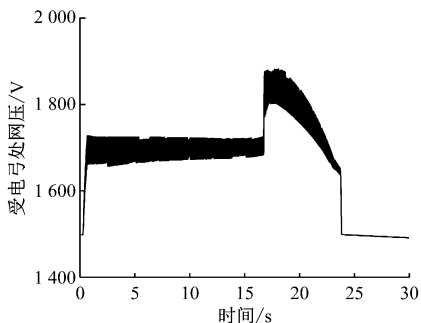


图8 多车制动时列车受电弓处网压

第 17 s 之前,储能装置工作时,列车受电弓处网压都维持在正常的工作电压范围内;第 17 s 之后,制动电阻投入工作,受电弓处网压在一段时间内超过了 1 800 V,导致再生制动的失效。根据式(10)进行制动电阻工作阈值优化,将制动电阻工作阈值 U_{ch2} 设为 1 550 V,储能系统充电阈值 U_{ch1} 设为 1 530 V,阈值优化后的列车受电弓处网压如图 9 所示。

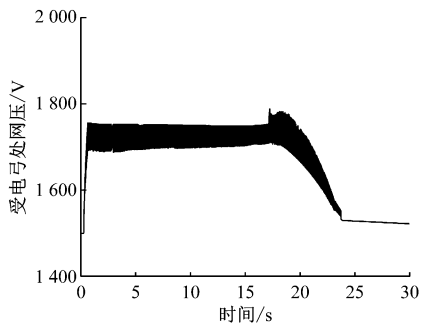


图9 阈值优化后多车制动时列车受电弓处网压

由图 9 可知,阈值优化后,列车受电弓处网压始终控制在 1 800 V 以下,避免了再生制动失效情况的发生,从而验证了阈值优化的有效性。

4 结语

本文以降低再生制动能量的线路损耗与稳定列车受电弓处网压为目标,提出了一种储能系统和

(下转第 147 页)

表 3 扣件横向偏移算法检测结果表

试验情况	图片数/张		
	扣件向左 横向偏移	扣件向右 横向偏移	扣件处于 安全状态
试验设定	150	150	700
试验结果	147	148	700
占比/%	98.0	98.7	100

经过试验可验证算法的可靠性,通过对比设置试验的表格可以看出,算法的可靠性达到 98%。在试验的结果中,2 个扣件向左横向偏移未检出,3 个向右横向偏移未检出,原因为量值较小。在试验的同时,记录算法特征提取部分所消耗的时间,并与 OTSU 特征提取算法和分水岭特征提取算法进行对比,经过试验证明,采用本文算法比 OTSU 特征提取处理算法速度提升了 16%。

4 结论

本文提出了一种针对 Pandrol SFC 型弹条扣件脱离安全位置问题的横向偏移计算方法。首先,利用图像降噪标准化得到图像,进行聚类二值强化和边界分割提取;其次,对处理后的图像进行图像轮廓提取,运用矩不变原理和安全扣件属性对轮廓进行筛选,获得关键轮廓并且定位出 2 个螺母和紧扣垫;最后,对比计算扣件关键四边形的面积计算偏移量。本文提出了一种新型的检测扣件是否发生横向偏移的方法,识别精度能达到 98%,特征提取的速度相对于传统特征提取算法提高了 16%,对于目前扣件横向松动的检测具有一定的应用价值。

(上接第 141 页)

制动电阻联合工作时的阈值优化方法。仿真结果表明:在单车制动时,该方法能够有效地提高再生制动能量回收率,较初始的阈值状态能量回收率提高了 1.1%,从长期来看可以带来可观的经济效益;在多车制动时,列车受电弓处网压始终维持在 1 800 V 以下,可避免再生制动失效情况的发生。

参考文献

[1] 赵洋,梁海泉,张逸成. 电化学超级电容器建模研究现状与展望[J]. 电工技术学报,2012(3):188.

参考文献

[1] 刘馨,穆颖,张斌. 基于计算机视觉的钢轨扣件检测算法研究[J]. 华东交通大学学报,2017(2):72.
[2] 刘甲甲,李柏林,罗建桥,等. 融合 PHOG 和 MSLBP 特征的铁路扣件检测算法[J]. 西南交通大学学报,2015(2):256.
[3] 赵珊珊,何宁,曹珊. 基于 SIFT 特征的铁路扣件状态检测算法[J]. 传感器与微系统,2018(11):148.
[4] 王强,李柏林,侯云,等. 一种改进的 LBP 特征实现铁路扣件识别[J]. 西南交通大学学报,2018(5):893.
[5] 范宏,侯云,李柏林,等. 高铁扣件的自适应视觉检测算法[J]. 西南交通大学学报,2020(4):896.
[6] 何彪,李柏林,罗建桥,等. 基于高斯混合部件模型的铁路扣件检测[J]. 西南交通大学学报,2019(3):640.
[7] 丁锐,刘甲甲,李柏林,等. 改进的 Otsu 图像多阈值分割方法[J]. 计算机应用,2013(增刊1):214.
[8] 路正佳. 基于改进分水岭算法的彩色图像分割方法[J]. 科技通报,2018(9):172.
[9] 薛晨杰. 基于异常检测的改进 k-means 算法研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.
[10] 张雨,王志晖,李柏林. 基于截线法的铁路扣件骨架提取算法[J]. 铁道标准设计,2019(4):69.
[11] LIU X, WANG H B, ZHOU B. Research on detection algorithm for rail fastener based on computer vision [C]// Proceedings of 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018). 2018:622-667.
[12] 李爽,李柏林,罗建桥,等. 基于上下文语义信息的铁路扣件状态检测[J]. 传感器与微系统,2018(8):130.
[13] 韩金岳. 图像处理中的铁路扣件定位方法[J]. 机械研究与应用,2018(3):182.
[14] 吴禄慎,万超,张丛. 轨道扣件检测特征提取算法研究[J]. 机械设计与制造,2018(8):5.

(收稿日期:2019-05-14)

[2] 马丽洁,廖文江,高宗余. 城轨列车车载超级电容储能控制策略研究[J]. 电工技术学报,2015(1):63.
[3] 林仕立,宋文吉,胡婧娴,等. 轨道交通车辆再生制动能量及利用率的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2014(5):59.
[4] 赵亚杰. 基于动态阈值调节的地面式超级电容储能系统控制策略优化[D]. 北京:北京交通大学,2015.
[5] 陈怀鑫. 基于混合粒子群算法的城轨交通超级电容储能系统能量管理和容量配置优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
[6] 诸斐琴,杨中平,林飞,等. 城轨交通牵引供电系统参数与储能系统容量配置综合优化[J]. 电工技术学报,2019(3):579.

(收稿日期:2019-05-14)