

文章编号: 1674—8247(2024)02—0022—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 02. 004

# 铁路再生制动能量利用控制策略研究

李亚楠 谷禹涵

(中国铁路太原局集团有限公司科学技术研究所, 太原 030013)

**摘 要:**随着电气化铁路的不断发展,节能降耗关乎铁路运营效益。本文以铁路机车再生制动能量为研究对象,通过对大秦铁路再生能量现状及变电所负荷特性进行分析,研究由能量融通装置和混合储能装置组成的再生制动能量利用系统方案;对系统结构、工作原理、分部控制策略以及对既有供电设备的保护方案进行阐述,并提出基于 SOC 反馈的模糊控制策略,对储能系统功率进行二次修正,使其充分利用混合储能系统的物理特性。通过结合实测数据的仿真,验证所提策略的有效性和可行性。

**关键词:**电气化铁路;再生制动能量;能量融通装置;混合储能系统;SOC 反馈

中图分类号: U22

文献标志码: A

## Study on Control Strategy of Regenerative Braking Energy Utilization in Railway

LI Yanan GU Yuhan

(Science and Technology Research Institute of China Railway Taiyuan Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** With the continuous development of electrified railways, energy saving and consumption reduction are essential for railway operation benefits. The paper focuses on the study of regenerative braking energy in railway locomotives. By analyzing the current state of regenerative energy and substation load characteristics on the Datong-Qinhuangdao Railway, a scheme for utilizing regenerative braking energy consisting of an energy integration device and a hybrid energy storage device was proposed. The paper elaborated on the system structure, working principles, divisional control strategies, and protection schemes for existing power supply equipment. Additionally, a fuzzy control strategy based on State of Charge feedback was proposed to optimize the power output of the energy storage system and fully utilize the physical characteristics of the hybrid energy storage system. Simulation with measured data was conducted to verify the effectiveness and feasibility of the proposed strategy.

**Key words:** electrified railway; regenerative braking energy; energy integration device; hybrid energy storage system; State of Charge feedback

截至 2023 年末,全国铁路电气化里程达 15.9 万 km,总牵引用电量达 900 kW·h,占全国用电量的 1%,电费支出已经成为铁路最大支出之一。大秦铁路作为

重要的西煤东运通道,年均电费支出约 15.24 亿万元,且多采用大功率交流传动机车牵引。大秦铁路 12‰ 长坡道多达 90 km,机车制动产生大量可再生能量,这

收稿日期:2022-08-01

作者简介:李亚楠(1993-),女,工程师。

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2020G021)

引文格式:李亚楠,谷禹涵. 铁路再生制动能量利用控制策略研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2):22-26.

LI Yanan, GU Yuhan. Study on Control Strategy of Regenerative Braking Energy Utilization in Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2):22-26.

些电能一部分被同臂列车及供电设备吸收,大部分电能均返送到电网,以东城乡为例,返送制动能量高达 2 万 kW·h/d。一方面,电网的“返送正计”或“返送不计”政策给铁路部门造成了重大经济损失;另一方面,反馈回电网的电能可能导致牵引网压提升、机车制动失效,严重影响行车安全<sup>[1]</sup>。为此,通过研究重载铁路再生制动能量综合利用装置,实现供电臂之间能量调度,降低变电所峰值功率,达到降低电度电费和基本电费的双重目标。

本文以机车再生制动能量为研究对象,提出能量交换-储能联合系统,实现对分区所两侧牵引变电所的再生能量实时转移利用及将多余能量存储的功能;考虑到储能设备的物理特性,提出基于荷电状态反馈

控制策略,对储能系统功率进行二次修正,避免过充过放,保证在满足能量融通装置工作的同时延长超级电容器和锂电池的使用寿命,通过实验室和实测数据仿真验证了所提策略的有效性和可行性。

1 大秦铁路再生制动能量分析

1.1 再生制动能量现状

大秦铁路普遍采用交直交型大功率电力机车,大秦铁路自西向东呈下坡走势,海拔落差达 1 000 m。随着海拔降低,重载列车在长大坡道(特别是在化稍营到涿鹿区段)制动功率大、时间长,产生的再生制动能量除了被同臂牵引机车吸收之外,返送电网电量仍十分可观,如图 1 所示。

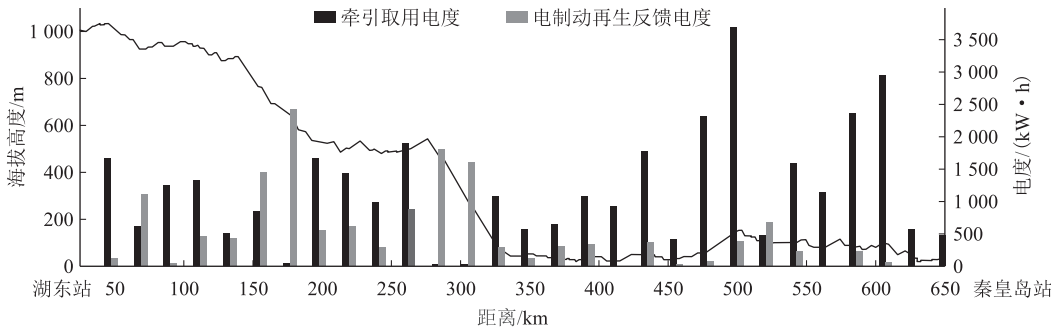


图 1 重载列车再生能量分布示意图

1.2 负荷分析

为进一步分析变电所实测能耗水平,选取永安堡和东城乡 2 座牵引变电所采集到的数据作为研究基础。两变电所用负荷曲线如图 2 所示。图中 0 刻度以上为电力机车从牵引网取流作为电动机运行消耗的正向有功功率,0 刻度以下为机车再生制动作为发电机产生的反向有功功率,返送给电网。

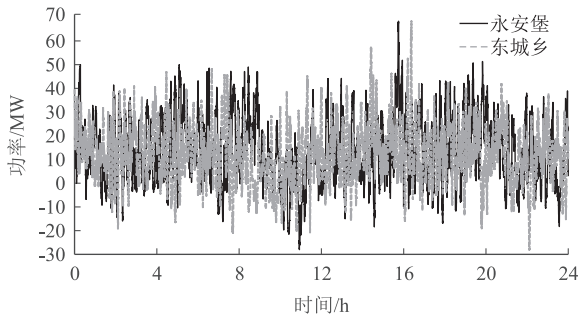


图 2 永安堡及东城乡功率图

由图 2 可知,两座牵引变电所存在一所牵引、一所制动,两所同时制动,两所同时牵引等情况。选取一段时间功率曲线,如图 3 所示,典型工况下永安堡

变电所再生制动持续时间为 10 min,最大制动功率为 21 MW,东城乡牵引功率最大为 28 MW,两变电所功率多数情况下为一所牵引一所制动的工况,存在很强的互补性。

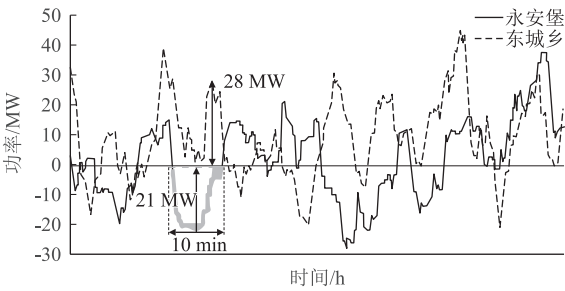


图 3 一所牵引、一所制动工况图

永安堡变电所所需牵引电量为 34.58 万 kW·h/d,再生制动返送电量为 1.57 万 kW·h,返送频次约为 50 次;东城乡变电所所需牵引电量为 31.14 万 kW·h/d,再生制动返送电量为 2.36 万 kW·h,返送频次为 63 次,如表 1 所示。重载铁路具有牵引功率较大、长大坡道制动产生的返送电量及频次较多等特点。

表 1 变电所正反向功率统计表		
变电所	永安堡	东城乡
正向电量/万 kW·h	34.58	31.14
反向电量/万 kW·h	1.57	2.36
再生制动能量占比/%	4.5	7.5
单次返送时间/min	1~10	1~10
单次最大反送电量/kW·h	1 576.7	1 324.6
返送频次/次	50	63

## 2 再生制动能量利用系统方案设计

### 2.1 再生制动能量利用系统结构

由于相邻变电所功率存在互补特性,本文采用安装于分区所的能量综合利用装置实现不同供电臂的能量调度,使再生制动产生的能量可以及时被转移到牵引侧消耗,储能系统也可以通过吸收多余再生能量,或释放到牵引侧吸收<sup>[2]</sup>。再生制动能量利用系统结构如图 4 所示,系统主要由能量融通装置、双向 DC-DC 变换器,超级电容器和锂电池组成。能量融通装置由两变流器形成背靠背结构,通过调整两侧变流器运行工况实现分区所左右两供电臂之间有功功率双向流动,超级电容器和锂电池组成的混合储能系统则通过双向 DC-DC 变换器实现充放电功率分配<sup>[3]</sup>。

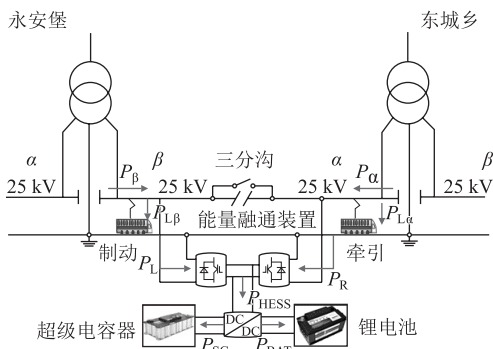


图 4 再生制动能量利用系统结构图

### 2.2 系统工作原理

按照图 4 规定的正方向,得出上述系统各功率之间关系如下:

$$\begin{cases} P_{\alpha} + P_{\beta} = P_{L\beta} + P_{L\alpha} + P_{HSS} \\ P_{HSS} = P_L + P_R = P_{SC} + P_{BAT} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{\alpha}$ 、 $P_{\beta}$ ——分区所  $\alpha$ 、 $\beta$  供电臂功率 (MW);  
 $P_{L\beta}$ 、 $P_{L\alpha}$ ——负荷功率 (MW);  
 $P_L$ 、 $P_R$ ——背靠背变流器输出功率 (MW);  
 $P_{SC}$ 、 $P_{BAT}$ ——超级电容器和锂电池输出功率 (MW);  
 $P_{HSS}$ ——混合储能系统输出功率 (MW)。

机车制动产生的能量优先通过同臂上下行机车及功率融通装置进行异臂转移利用<sup>[4]</sup>。剩余能量及峰值负荷削峰则由混合储能系统充放电来完成,令分区所两侧供电臂负荷功率之和作为混合储能系统输出功率  $P_{HSS}$ ,即  $P_{HSS} = -(P_{L\beta} + P_{L\alpha})$ ,设储能系统充放电阈值为  $P_{in} > 0$ ,  $P_{out} < 0$ ,当  $P_{HSS} > P_{in}$ ,混合储能系统吸收机车制动产生的剩余能量;当  $P_{HSS} < P_{out}$ ,混合储能系统释放能量来降低供电臂上消耗的负荷功率。

为使分区所  $\alpha$ 、 $\beta$  供电臂负荷平衡,令  $P_{\alpha} = P_{\beta}$ ,由式(1)可得,  $P_{\alpha} = P_{\beta} = \frac{P_{L\alpha} + P_{L\beta} + P_{HSS}}{2}$ ,由此可得,能量融通装置左右侧变流器输出功率为:

$$\begin{cases} P_L = P_{\beta} - P_{L\beta} = \frac{P_{L\alpha} - P_{L\beta} + P_{HSS}}{2} \\ P_R = P_{\alpha} - P_{L\alpha} = \frac{-P_{L\alpha} + P_{L\beta} + P_{HSS}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 能量融通装置控制策略

当接收到来自控制系统的功率融通装置参考功率后,背靠背变流器采用电压、电流闭环控制,通过采集到的左右供电臂电压、电流,并将其应用二阶广义积分器变换到两相正交分量,再经 Park 坐标变换得到 dqo 坐标系分量,参考变流器输出功率与直流电压稳定,经控制器调节、Park 反变换送入 PWM 模块产生脉冲控制两变流器转移功率<sup>[5]</sup>。能量融通装置控制原理如图 5 所示。

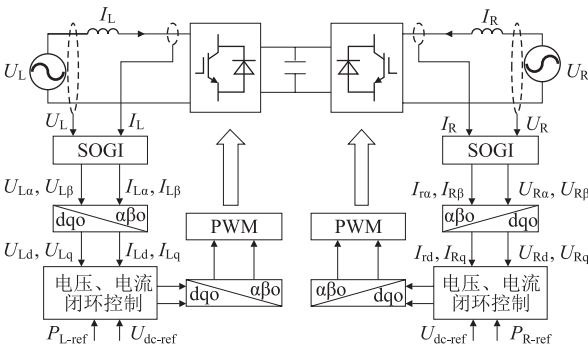


图 5 能量融通装置控制原理图

### 2.4 混合储能系统功率分配策略

锂电池能量密度高、功率密度低,适合缓充缓放,而超级电容器能量密度低、功率密度高、使用寿命长,适合频繁、大功率充放电,也有助于延长锂电池使用寿命。本文采用滑动平均滤波算法,将异臂转移利用过后的剩余可吸收能量分为高频分量和低频分量,将低频分量分配给锂电池  $P_{bo}$ ,将高频分量分配给超级电容  $P_{sc}$ 。考虑到电池剩余容量状况对寿命的影响,即

储能介质荷电状态(State of Charge, SOC),本文加入了 SOC 反馈模糊控制策略<sup>[6]</sup>。将超级电容器和锂电池当前荷电状态与参考值做差,送入模糊控制器将得到各分量的修正功率  $\Delta P_{sc}(t)$ ,通过限幅控制器,得到锂电池输出功率  $P_{bat}(t)$ ,超级电容器输出功率  $P_{sc}(t)$ 。所得电流参考值  $I_{ref-bat}(t)$ 、 $I_{ref-sc}(t)$  与反馈值  $I_{bat}(t)$ 、 $I_{sc}(t)$  比较后经过 PI 调节器得到 PWM 占空比  $d_{bat}$ 、 $d_{sc}$ ,用来控制 DC/DC 变流器,实现锂电池和超级电容器合理充放电。混合储能功率分配控制框如图 6 所示。

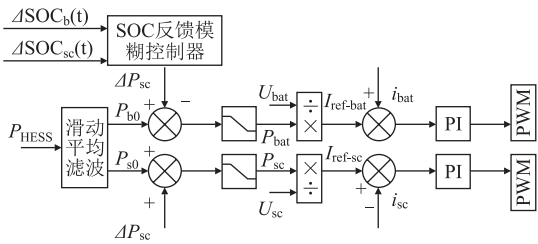


图 6 混合储能功率分配控制框图

3 系统保护方案

为了设备故障不影响变电所供电和变电所故障设备自保护,并且遵守铁路系统的故障导向安全原则,再生制动能量利用系统按照设备故障严重程度,将故障分为系统级(Ⅰ)、设备级(Ⅱ)、预警级(Ⅲ),分别采取整体退出、故障子系统切除、预警等动作,以确保系统安全。采用本地分布式保护与集中总体保护结合,构建多层保护体系,做到故障不漏报、不误报<sup>[7-8]</sup>。

再生制动能量利用系统属于并联接入,本系统故障对既有保护系统无影响。当再生制动能量储存系统出现故障时联跳本系统的交流开关柜,铁路供电系统保护不动作。通过将本系统的交流开关柜与供电系统开关柜联锁,实现当铁路供电系统出现故障时,联跳本系统内的交流开关柜。如图 7 所示,系统通过高压断路器 QF1、QF2 与牵引供电系统进行联接;出现重故障时,QF1、QF2 联跳,系统整体与牵引供电及电力配电系统分离。

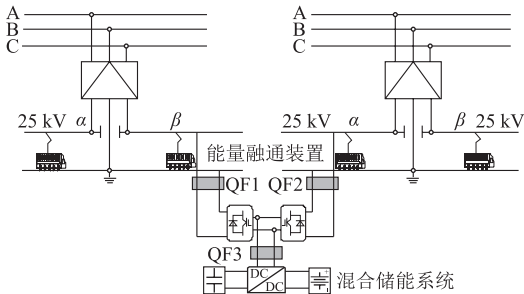


图 7 再生制动能量利用系统接入示意图

4 系统仿真

为验证本文所提控制策略的有效性,建立图 4 的仿真模型,牵引供电系统与储能系统电气参数如表 2 所示,设定锂电池的 SOC 上下限为 0.2~0.8,超级电容器的 SOC 为 0.1~0.9,在 Matlab/Simulink 中进行仿真分析。

表 2 系统仿真参数表

变电所	参数	数值
牵引供电系统	电网三相电压/kV	220
	频率/Hz	50
	牵引变压器电压比/kV	220 : 55
	牵引变压器容量/MVA	50
超级电容器	额定功率/MW	2.15
	额定容量/kW·h	21.5
锂电池	额定功率/MW	4.18
	额定容量/kW·h	2 250

仿真选取实测数据中某时间段,对比分析采用单一滑动平均滤波与加入 SOC 反馈模糊控制的混合储能系统中锂电池及超级电容器充放电功率,如图 8、图 9 所示。

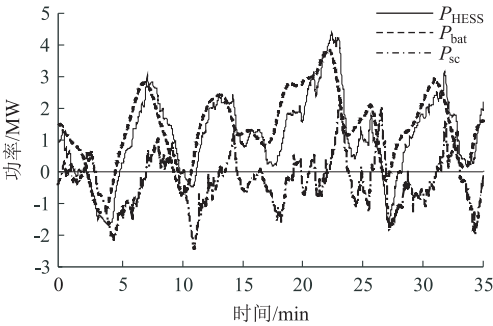


图 8 采用单一滑动平均滤波仿真结果图

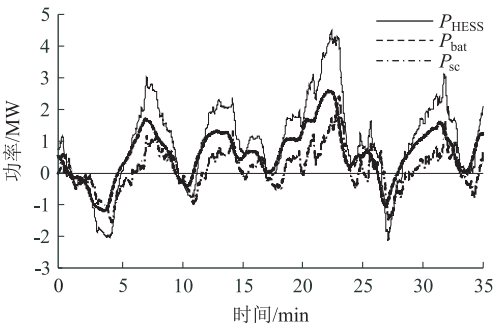


图 9 加入 SOC 反馈模糊控制后仿真结果图

由图 8、图 9 可知：

(1)采用单一滑动平均滤波,锂电池和超级电容器存在大量能量流动情况,即锂电池处于充电状态时而超级电容器处于放电状态,且两种储能装置所需容量配置较高,容易发生过充过放,从而降低锂电池的



使用寿命。

(2) 采用 SOC 反馈模糊控制策略后,锂电池与超级电容器能量交换的情况明显降低,两种储能装置的容量配置也可进一步优化,防止过充过放,具备良好的寿命及经济效应。

两变电所同时处于制动工况时的仿真结果如图 10 所示。系统投入运行后,再生制动产生的有功功率给储能系统充电,变电所三相侧功率下降 2 MW,说明再生制动能量利用系统可通过储能系统吸收功率来实现变电所的返送有功功率削减。

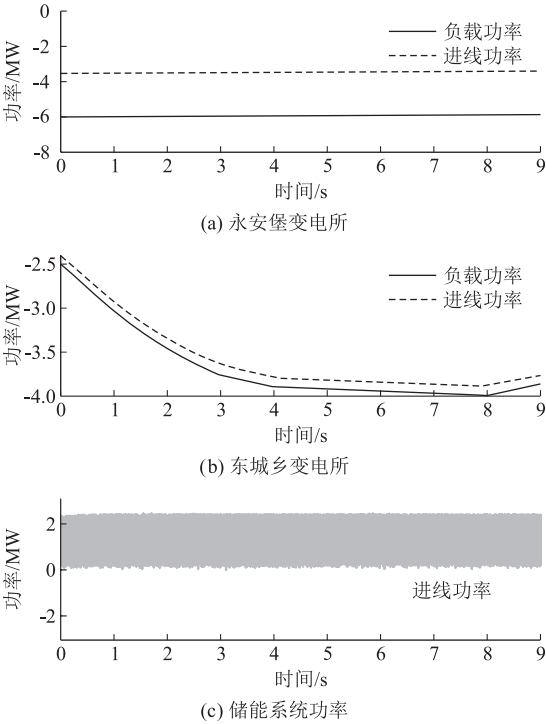


图 10 两所同时制动工况图

一所牵引一所制动工况时的仿真结果如图 11 所示。系统投入运行后,东城乡变电所返送电网的有功功率 6 MW,通过功率融通装置转移到永安堡变电所用于牵引消耗。由于达到背靠背变流器功率阈值,储能系统不工作,输出功率为 0,说明再生制动能量利用系统可以通过转移功率实现相邻变电所功率削减。

两变电所同时处于牵引工况时的仿真结果如图 12 所示。系统投入运行后,储能系统释放 5 MW 用于重载牵引侧,即东城乡变电所消耗,说明再生制动能量利用系统可通过储能系统释放功率来实现变电所有功功率的削减。

5 结论

本文针对重载铁路牵引供电系统再生制动能量

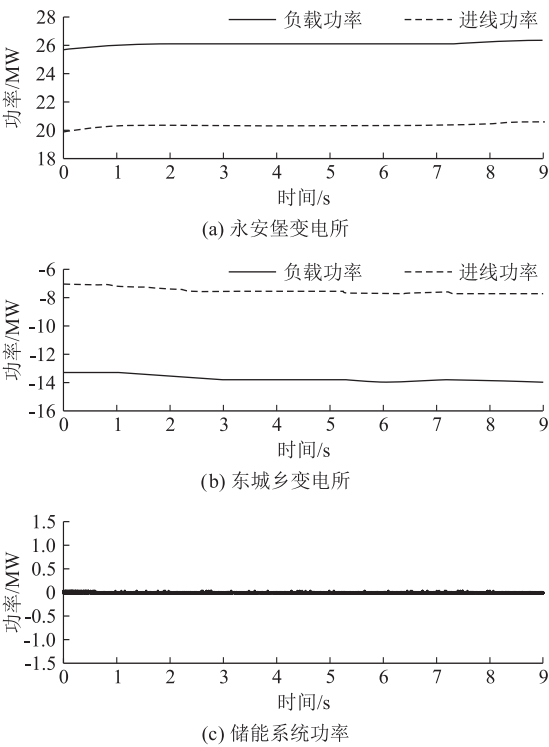


图 11 一所牵引一所制动工况图

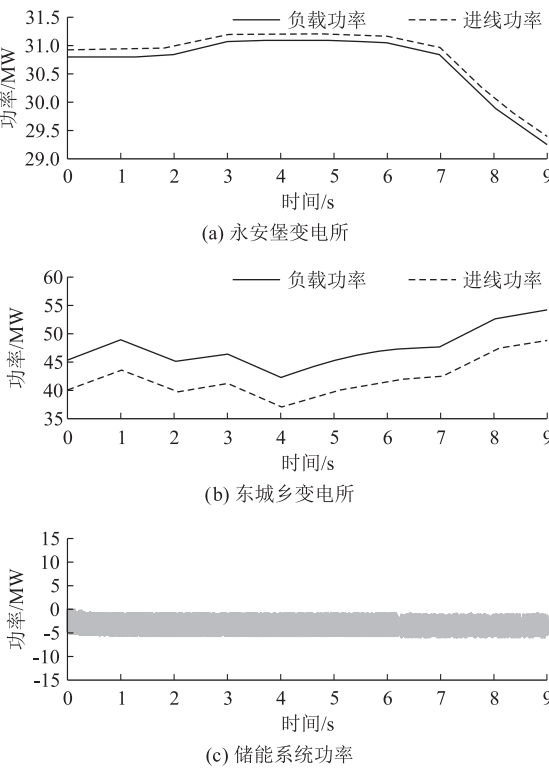


图 12 两所同时牵引工况图

利用问题,基于现场实测负荷数据分析了牵引供电系统再生制动能量特性。在此基础上,研究了适用于重  
(下转第 38 页)

Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3310 – 3319.

[15] 杨长卫, 张良, 张凯文, 等. 山岭隧道跨断裂带段及洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 993 – 1002.

YANG Changwei, ZHANG Liang, ZHANG Kaiwen, et al. Large Scale Shaking Table Model Test on Seismic Response of Mountain Tunnel Portal Section Passing through Fault Zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 993 – 1002.

[16] 蒋梦新, 邱枫博, 刘久明, 等. 强震区隧道洞口段刚柔并济抗震技术研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 16 – 20.

JIANG Mengxin, QIU Fengbo, LIU Jiuming, et al. Study on Rigid and Flexible Anti-seismic Technology for Tunnel Portal Sections in Meizoseismic Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 16 – 20.

(上接第26页)

载铁路长大坡道区段相邻两牵引变电所的分区所再生制动能量利用系统。进一步的, 计及再生制动能量利用系统的潮流控制原理, 分析了再生制动能量利用系统对牵引供电系统既有保护的影响。最后, 搭建了相应的仿真模型对上述理论研究成果进行了验证, 证明系统运行在两所同时制动、两所同时牵引、一所牵引一所制动的典型工况下, 可以实现削减返送电网有功功率和牵引侧有功功率的目的。

参考文献:

[1] 智慧, 林宗良, 李剑, 等. 高速度铁路牵引供电系统适应性关键技术研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 79 – 83.

ZHI Hui, LIN Zongliang, LI Jian, et al. On the Key Technologies of Adaptability of Traction Power Supply System of Higher-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 79 – 83.

[2] CHOI M E, KIM S W, SEO S W. Energy Management Optimization in a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 463 – 472.

[3] WANG Ke, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. System-level Dynamic Energy Consumption Evaluation for High-speed Railway [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(3): 745 – 757.

[4] 耿安琪, 胡海涛, 张育维, 等. 基于阶梯能量管理的电气化铁路混合储能系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4916 – 4925.

GENG Anqi, HU Haitao, ZHANG Yuwei, et al. Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Electrified Railway Based on Increment Energy Management [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4916 – 4925.

[5] 黄文龙, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 枢纽型牵引变电所再生制动能量利用系统能量管理及控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 588 – 598.

HUANG Wenlong, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Energy Management and Control Strategy of Regenerative Braking Energy Utilization System in Hub Traction Substation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 588 – 598.

[6] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模式分解—模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58 – 65.

LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational Mode Decomposition and Fuzzy Control Strategy of Hybrid Energy Storage for Smoothing Wind Power Outputs [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58 – 65.

[7] 王继来. 双边贯通供电方式下牵引变电所保护配置研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(2): 90 – 95.

WANG Jilai. Research on the Protection Configuration of Traction Substation in Bilateral Interconnected Power Supply Mode [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(2): 90 – 95.

[8] 李含聪. 混合式牵引供电系统保护方案设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

LI Hancong. Protection Scheme Design of Hybrid Traction Power Supply System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.