

基于列车速度主动调节的高铁混合储能系统优化研究

曲 锴, 郭 昕

湖南第一师范学院智能制造学院电气工程及其自动化系, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年8月29日; 录用日期: 2025年9月19日; 发布日期: 2025年9月30日

摘 要

目前储能系统用于回收高铁列车的再生制动能量, 由于其价格昂贵, 不利于广泛使用。本文基于列车速度的主动调节, 在一定程度上降低了所需储能系统的容量, 并结合超级电容器与蓄电池构成的混合储能系统协同优化回收再生制动能量, 使铁路部门获得最大经济收益。通过典型算例分析, 该牵引变电所的每日总成本降低了6.68%。

关键词

再生制动能量, 混合储能系统, 速度调节

Optimizing Research on Hybrid Energy Storage System of High Speed Railway Based on Locomotive Speed Active Regulation

Kai Qu, Xin Guo

Department of Electrical Engineering and Automation, School of Intelligent Manufacturing, Hunan First Normal University, Changsha Hunan

Received: August 29, 2025; accepted: September 19, 2025; published: September 30, 2025

Abstract

Currently, energy storage systems are utilized to recover the regenerative braking energy of high-speed trains. However, their high cost hinders their widespread adoption. This paper proposes an approach based on active adjustment of train speed, which reduces the required capacity of the energy storage system to a certain extent. Additionally, it combines a hybrid energy storage system consisting of supercapacitors and batteries to synergistically optimize the recovery of re-generative

braking energy, maximizing economic benefits for railway departments. Through a typical case study, it is found that the total daily cost of the traction substation is reduced by 6.68%.

Keywords

Regenerative Braking Energy, Hybrid Energy Storage System, Speed Regulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国铁路交通迅速发展,高铁路网及班次逐年增加,高铁制动主要采用再生制动,产生巨大的再生制动能量[1]。同时,再生制动能量的瞬时功率也较大,占牵引功率大小的10%~30% [2]。再生制动能量可被其他正在牵引的高铁列车吸收,未吸收的部分将回馈到电网,目前电网公司对回馈的能量采用倒送不计费方式,造成了能量浪费,也给铁路部门带来了巨大损失[3]。如何有效利用再生制动能量对铁路部门来说具有重大的意义,同时也响应了节能减排的国家战略。

提高再生制动能量利用率的方法主要有:优化行车组织和增加储能系统[4]-[6]两大类。优化行车组织是通过合理安排列车的运行时刻表,使得再生制动能量尽可能被其他运行的列车所利用。该方法目前主要在城市地铁中应用[7] [8]。

增加储能系统的方法可以有效吸收再生制动能量,并在牵引负荷高峰释放能量,不仅提高了再生制动能量利用率,还降低了购电量,发挥出“削峰填谷”的作用。利用储能系统回收再生制动能量在城轨交通中研究较多[9]-[11],其主要采用超级电容器作为储能介质。然而,由于高铁再生制动能量的高功率和大能量特性,难以找到与其特性匹配的单一储能介质进行能量回收,采用高功率密度的超级电容器和高能量密度的蓄电池组成混合储能系统能满足高铁再生制动能量的负荷特性,然而满足需求的储能系统容量很大,成本很高。

我国新一代的高铁列车能根据线路实时状况自动调节列车运行状态(如牵引、制动、惰行)及列车速度[12]。本文结合列车速度控制及混合储能系统协同回收再生制动能量,对比单纯采用储能系统的方式,本文所提方法降低了储能系统的成本投入,同时节省了铁路部门的运行成本。

2. 高铁供电系统结构

图1所示为含储能系统的高铁供电系统结构,混合储能系统通过变流器连接到牵引网,根据车网状态调节混合储能系统的输入输出状态。

3. 列车速度调节与储能系统的数学模型

3.1. 高铁列车速度调节系统数学模型

高铁列车在运行过程中主要受到牵引电机提供的驱动力,以及多种阻碍运动的力。其中,基本阻力始终存在,包括轮轨摩擦阻力、空气阻力及机械部件间的摩擦损耗;附加阻力则随线路条件变化而产生,例如坡道上的重力分量(坡道阻力)、弯道上的轮轨横向作用力(曲线阻力)、隧道内的气动压差(隧道空气附加阻力)等。为简化平直轨道场景下的动力学分析,通常忽略附加阻力,此时列车所受阻力可统一表示为式(1)所描述的数学模型:

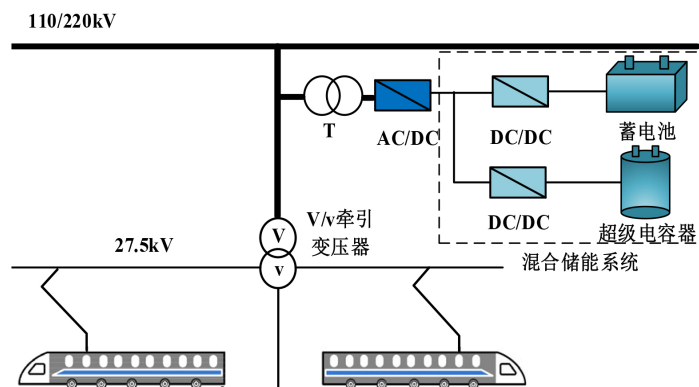


Figure 1. Structure of power system for high-speed railway containing HESS
图 1. 含混合储能系统的高铁供电系统结构

$$f_0 = \lambda_1 \cdot m \cdot g + \lambda_2 \cdot (v(t) + v_{wind}) + \lambda_3 \cdot (v(t) + v_{wind})^2 \quad (1)$$

式中, f_0 是列车所受基本阻力, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为常数, 其值与车型有关。 m 是列车质量, g 是重力加速度, $v(t)$ 是列车车速, v_{wind} 是逆风风速。

根据列车动力学原理, 其运行状态可依据受力关系划分为四类, 牵引加速驱动工况: 当机车轮周牵引力(由轮轨粘着作用产生)大于运行阻力(包括基本阻力与附加阻力)时, 列车受正向合力作用, 遵循牛顿第二定律持续加速。牵引匀速工况: 牵引力与运行阻力达到动态平衡, 列车保持稳态运行。此时加速度为零, 速度维持恒定, 常见于平直轨道巡航阶段。惰行工况: 牵引系统关闭, 仅受基本阻力(如空气阻力、机械摩擦)及附加阻力(坡道/弯道阻力)作用。列车因负向合力减速, 但制动装置未激活, 属于惯性滑行状态。制动工况: 制动系统施加制动力, 与运行阻力叠加形成减速合力。此时牵引力为零, 列车在合力作用下减速度显著提升, 直至停车。

根据列车编组技术规范及运营实践, 当前主流高铁车型可分为以下两类, **A 车型编组形式:** 8 节固定编组, 采用对称动力布局, 其中 4 节为自带牵引系统的动车, 4 节为无动力拖车, 形成均衡的动力分配结构。**B 车型编组形式:** 由两组 A 车型重联构成 16 节编组(8 动 8 拖), 通过车钩联挂实现物理连接, 但两组车厢间不贯通。

列车主动调速的场景如下所示:

场景 1: 如图 2 所示, 两列车运行时, 在牵引供电臂内, 当一列 B 车型列车实施再生制动(最大制动功率 8 MW)时, 其释放的能量可通过接触网实时转移至同供电臂内的其他列车。若此时另一列 B 车型处于牵引加速工况(最大牵引功率 18.4 MW), 因牵引功率存在 10.4 MW 冗余(18.4 MW~8 MW), 再生能量可被完全消纳; 同理, 若接收端为 A 车型列车(牵引功率 5.75 MW), 其牵引能力仍高于制动功率, 能量同样可内部转移。特殊工况: 当 B 车型制动(8 MW)与 A 车型匀速运行(牵引功率 ≈ 0)同时发生时, 再生能量无法被即时消纳, 此时供电系统需启动电阻耗能或逆变回馈装置, 此工况恰好满足列车主动调速的功率失衡条件。

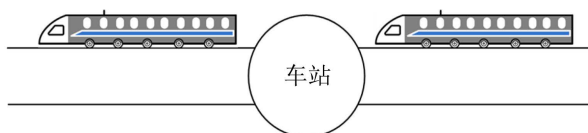


Figure 2. Running diagram of 2 locomotives in the same power supply section
图 2. 同供电段 2 列列车运行图

场景 2: 如图 3 所示, 当同一供电臂内存在三列协同运行的列车时, 若其中一列实施再生制动(如 B 车型最大制动功率 8 MW), 其释放的能量可被另外两列列车实时消纳——无论后者处于何种运行状态(牵引加速、匀速或惰行)或车型配置(A/B 车型), 均能避免能量回馈电网; 然而, 当两列列车同时制动时, 能量消纳机制呈现差异化特征: 若双制动列车均为 B 车型(总制动功率 16 MW), 第三列车为 B 车型且处于最大牵引加速工况(18.4 MW)时可完全消纳能量, 若其匀速运行则产生电网回馈; 若第三列车为 A 车型, 因牵引功率上限(9.2 MW)低于总制动需求, 必然出现能量回馈。若双制动列车为 A 车型(总制动功率 8 MW), 其能量消纳逻辑与单列车制动工况一致, 仅当第三列车匀速运行时存在回馈风险。若双制动含 A、B 车型各一列(总制动功率 12 MW), 第三列车为 A 车型时必然回馈能量; 若第三列车为 B 车型, 仅在其匀速运行状态下触发能量回馈。

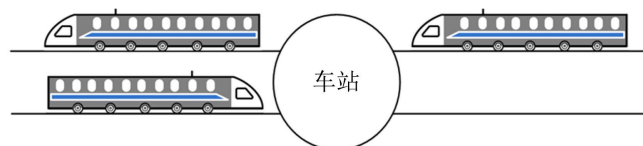


Figure 3. Running diagram of 3 locomotives in the same power supply section

图 3. 同供电段 3 列车运行图

场景 3: 如图 4 所示, 当同一供电段内存在两列列车同时再生制动、两列列车处于牵引或匀速运行的工况时, 能量消纳行为随车型组合与运行状态动态变化, 双 A 制动(总制动功率 8 MW), 无论另外两列车为何种车型或状态, 再生能量均可被完全消纳; A + B 混合制动(总制动功率 12 MW), 仅当另外两列车均为 A 车型且匀速运行时出现能量回馈, 其余场景无回馈; 双 B 制动(总制动功率 16 MW), 若另外两列为 A 车型, 且在匀速或“加速 + 匀速”状态下触发回馈; 若为混合编组(1A1B)或双 B 车型, 则无能量回馈。

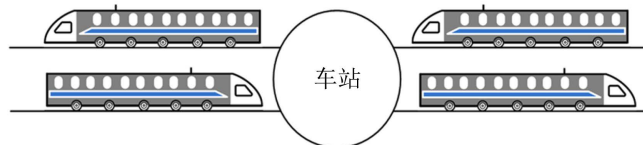


Figure 4. Running diagram of 4 locomotives in the same power supply section

图 4. 同供电段 4 列车运行图

在大型铁路枢纽站中, 多方向(南北向与东西向)线路的交叉运行可能导致多列车同时进站制动, 使再生能量的交互工况趋于复杂, 但仍可基于枚举法系统分析各类场景下的能量动态。上述各种场景见表 1 所示。

Table 1. Scenarios where active train speed regulation can be adopted

表 1. 可采用列车主动调速的场景

同供电段列车数	制动车型	匀速车型	加速车型
2 列	B	A	\
	2B	A	\
3 列	2B	B	\
	2A	A	\

续表

	1A1B	A	\
	1A1B	\	A
	1A1B	B	\
4 列	2B	2A	\
	2B	A	A
	1A1B	2A	\

列车速度调节的数学模型如下所示:

列车在速度调节过程后到达车站的时间必须在允许范围之内。列车改变速度运行的时间设为 t_s , 此过程运行的距离如式(2)所示:

$$S = \int_0^{t_s} v(t) dt \quad (2)$$

式(2)中, v_t 的变化如图 5 所示。

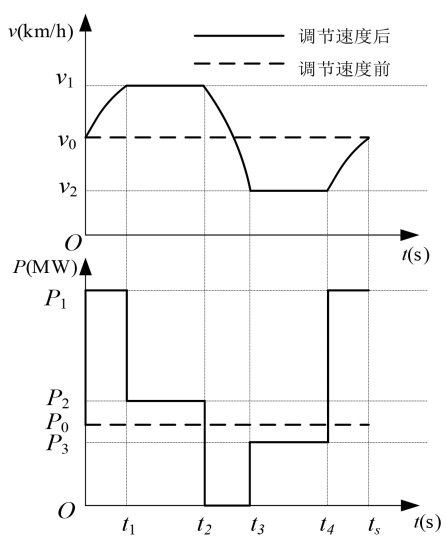


Figure 5. Process of locomotive speed regulation
图 5. 列车速度调节过程

若列车一直保持匀速运动, 则列车行驶与列车调节速度运行同样的距离的表达式如式(3)所示:

$$S = v_0 \cdot (t_s + \Delta t) \quad (3)$$

Δt 是到达车站时间偏差, v_0 是匀速运动的速度。高铁列车的加速和减速实际是变加速度运动, 然而在速度变化范围不大的时候可近似看作匀变速运动, 因此, 列车速度调节过程中车速可表示为式(4)。

$$v(t) = \begin{cases} a_1 \cdot t & 0 \leq t \leq t_1 \\ v_1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ a_2 \cdot t & t_2 \leq t \leq t_3 \\ v_2 & t_3 \leq t \leq t_4 \\ a_1 \cdot t & t_4 \leq t \leq t_s \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, a_1 是加速过程的加速度, a_2 是惰行过程的加速度。 v_1 是列车提速后匀速运动速度, 且 v_1 需不超过列车限制的最大速度, 如式(5)所示。

$$v_1 \leq v_{\max} \quad (5)$$

$v_{\max}$ 是列车限制的最大速度。

v_2 是列车惰行减速后匀速运动速度, 且与 v_1 的关系为式(6)所示。

$$v_1 - v_0 = v_0 - v_2 \quad (6)$$

当加速和减速运动过程近似成匀变速运动时, 在满足式(6)的条件下, 列车调节速度前后所行驶的路程一样, 即 $\Delta t = 0$, 也就是说列车调节速度过程中没有改变到达车站的时间。

力的方向和列车运动方向相同, 列车在速度调节过程中所受合力如式(7)所示:

$$F = \begin{cases} F_1 - f_{v(t)} & 0 \leq t \leq t_1 \\ F_2 - f_{v_1} = 0 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ -f_{v(t)} & t_2 \leq t \leq t_3 \\ F_3 - f_{v_2} = 0 & t_3 \leq t \leq t_4 \\ F_4 - f_{v(t)} & t_4 \leq t \leq t_s \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, F_1 是列车第一次加速状态的电机牵引力, F_2 是列车提速后匀速状态的电机牵引力, F_3 是列车惰行减速后匀速状态的电机牵引力, F_4 是列车第二次加速状态的电机牵引力。

根据牛顿第二定律可得:

$$\frac{P_1}{v(t)} - f_{v(t)} = ma_1 \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (8)$$

$$\frac{P_2}{v_1} = f_{v_1} \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (9)$$

$$-f_{v(t)} = ma_2 \quad t_2 \leq t \leq t_3 \quad (10)$$

$$\frac{P_3}{v_2} = f_{v_2} \quad t_3 \leq t \leq t_4 \quad (11)$$

$$\frac{P_4}{v(t)} - f_{v(t)} = ma_1 \quad t_4 \leq t \leq t_s \quad (12)$$

结合上述公式, 可求得 $t_1 \sim t_s$ 的值。列车的整个调速过程的牵引功率随时间的变化如图 5 所示。

3.2. 混合储能系统数学模型

由于列车运行时刻和速度限制, 仅靠调节运行速度难以完全消纳再生制动能量。针对高铁再生制动能量高功率、大能量的特点, 本文提出采用功率型超级电容器与能量型锂离子电池构建混合储能系统, 协同实现能量回收。

混合储能系统的数学模型如下所示:

荷电状态(SOC)是储能系统的重要参数, 它是指储能系统某时刻的储能量与总容量的比值。超级电容器的荷电状态如式(13)所示。

$$SOC_{SC}(t) = SOC_{SC}(0) + \frac{\sum_{t=0}^t P_{SC}(t) \cdot \eta_{SC}(t) \cdot t}{E_{SC}}, 0 \leq t \leq T \quad (13)$$

$$P_{SC}(t) = \begin{cases} P_{SC}^{cha}(t), P_{SC}(t) > 0 \\ P_{SC}^{dis}(t), P_{SC}(t) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\eta_{SC}(t) = \begin{cases} \eta_{SC}^{cha}, P_{SC}(t) > 0 \\ \eta_{SC}^{dis}, P_{SC}(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(13)中, $SOC_{SC}(0)$ 是超级电容器的初始 SOC 值, T 是调度周期。 $P_{SC}(t)$ 是超级电容器的功率, 超级电容器充电时, 其值大于 0, 放电时其值小于 0, 如式(14)所示, $P_{SC}^{cha}(t)$ 为充电功率, $P_{SC}^{dis}(t)$ 为放电功率。 $\eta_{SC}(t)$ 是超级电容器的效率, 超级电容器充电时为充电效率 η_{SC}^{cha} , 放电时为放电效率 η_{SC}^{dis} , 如式(15)所示。

同上, 蓄电池的荷电状态如式(16)所示。

$$SOC_{Bat}(t) = SOC_{Bat}(0) + \frac{\sum_{t=0}^t P_{Bat}(t) \cdot \eta_{Bat}(t) \cdot t}{E_{Bat}}, 0 \leq t \leq T \quad (16)$$

$$P_{Bat}(t) = \begin{cases} P_{Bat}^{cha}(t), P_{Bat}(t) > 0 \\ P_{Bat}^{dis}(t), P_{Bat}(t) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\eta_{Bat}(t) = \begin{cases} \eta_{Bat}^{cha}, P_{Bat}(t) > 0 \\ \eta_{Bat}^{dis}, P_{Bat}(t) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式(16)中, $SOC_{Bat}(0)$ 是蓄电池的初始 SOC 值。 $P_{Bat}(t)$ 是蓄电池的功率, 蓄电池充电时, 其值大于 0, 放电时其值小于 0, 如式(17)所示, $P_{Bat}^{cha}(t)$ 为充电功率, $P_{Bat}^{dis}(t)$ 为放电功率。 $\eta_{Bat}(t)$ 是蓄电池的效率, 蓄电池充电时为充电效率 η_{Bat}^{cha} , 放电时为放电效率 η_{Bat}^{dis} , 如式(18)所示。

为了计算的方便, 引入超级电容器的充电状态参数 $X_{SC}^{cha}(t)$ 和放电状态参数 $X_{SC}^{dis}(t)$, 如式(19)~(21)所示。

$$X_{SC}^{cha}(t) \in (0, 1) \quad (19)$$

$$X_{SC}^{dis}(t) \in (0, 1) \quad (20)$$

$$0 \leq X_{SC}^{cha}(t) + X_{SC}^{dis}(t) \leq 1 \quad (21)$$

超级电容器的功率如式(22)所示。

$$P_{SC}(t) = P_{SC}^{cha}(t) \cdot X_{SC}^{cha}(t) + P_{SC}^{dis}(t) \cdot X_{SC}^{dis}(t) \quad (22)$$

同理, 引入蓄电池的充电状态参数 $X_{Bat}^{cha}(t)$ 和放电状态参数 $X_{Bat}^{dis}(t)$, 如式(23)~(26)所示。

$$X_{Bat}^{cha}(t) \in (0, 1) \quad (23)$$

$$X_{Bat}^{dis}(t) \in (0, 1) \quad (24)$$

$$0 \leq X_{Bat}^{cha}(t) + X_{Bat}^{dis}(t) \leq 1 \quad (25)$$

蓄电池的功率如式(26)所示。

$$P_{Bat}(t) = P_{Bat}^{cha}(t) \cdot X_{Bat}^{cha}(t) + P_{Bat}^{dis}(t) \cdot X_{Bat}^{dis}(t) \quad (26)$$

4. 储能系统能量管理策略及优化模型

4.1. 列车速度调节典型工况分析

国内某高铁站的负荷曲线如图 6 所示。本文对列车速度调节的几种典型工况进行分析。

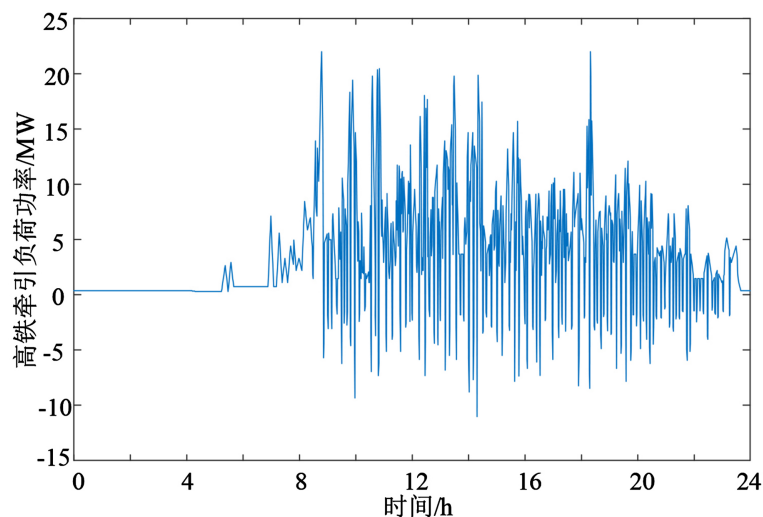


Figure 6. Train operation energy profile

图 6. 高铁牵引变电所负荷曲线

根据电网负荷最低谷时段的再生制动功率峰值分析, 可反推此时存在三列列车的协同运行工况: 一列 A 型与一列 B 型列车正处于协同制动状态(总制动功率 12 MW), 同时另一列 A 型列车保持匀速运行(牵引功率 ≈ 0)。该场景下, 匀速列车作为调速主体, 其动态响应过程如图 7 所示: 受控吸收再生能量时, 牵引功率从基准值 5.75 MW 阶梯式提升至消纳阈值, 同时运行速度经短暂下降后恢复稳态。

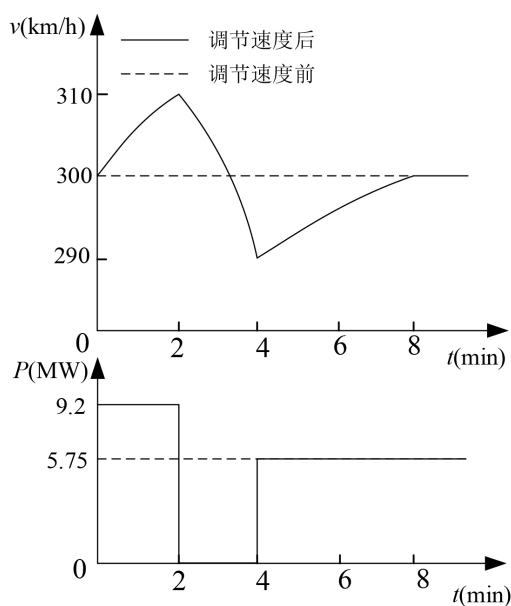


Figure 7. Speed regulation process of locomotive with load trough

图 7. 负荷波谷列车调速过程

根据实际负荷功率变化特征, 该调速过程省略匀速运动阶段, 且在第二次加速工况中, 由于负荷无再生制动能量产生, 列车未采用最大牵引功率加速, 而是以 300 km/h 对应功率水平缓速提升车速。负荷高峰时段分析表明, 两列 B 型列车正处于稳态巡航状态, 此时将牵引功率下调至额定值的 75%, 实现调速优化。该工况下列车功率与速度的动态响应特性如图 8 所示。

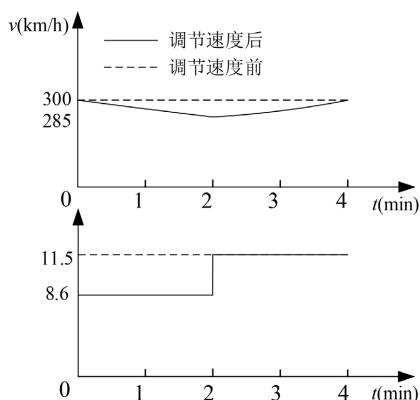


Figure 8. Speed regulation process of locomotive with load peak
图 8. 负荷波峰列车调速过程

4.2. 融合列车速度调节和混合储能系统的能量管理策略

融合列车速度调节和混合储能系统的能量管理策略如图 9 所示。

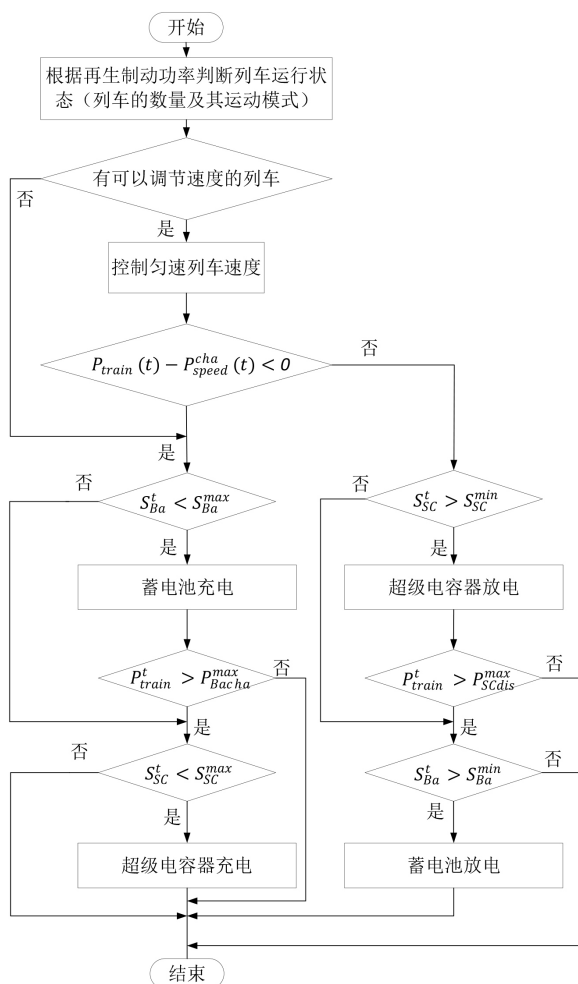


Figure 9. Flow chart of energy management strategy
图 9. 能量管理策略流程图

图 9 中, $P_{train}(t)$ 是牵引负荷, $P_{speed}^{cha}(t)$ 是列车调速过程对比匀速时增加的功率。基于铁路系统对供电臂内列车运行状态的实时监测能力, 本文构建再生制动能量协同回收机制: 当监测到再生制动功率时, 优先调节可调速列车的运行速度以消纳能量; 若无可用调速列车, 则启动由超级电容器和锂电池组成的混合储能系统。系统负荷功率作为模式切换的核心判据: 能量富余时, 按先锂电池后超级电容顺序充电, 锂电池优先利用其高能量密度储备能量, 当锂电池充电功率不足时, 超级电容接入补充充电功率; 功率短缺时, 按先超级电容后锂电池顺序放电, 超级电容凭借高功率密度优先响应瞬时负荷需求, 其后由锂电池提供持续能量支撑。此策略通过列车调速与混合储能的动态协同, 实现再生制动能量的最大化回收与高效利用。

4.3. 优化模型

储能系统将再生制动能量回收利用, 从而减少铁路供电系统的购电量, 以高铁供电系统日总运行成本最低为优化目标, 目标函数如式(27)所示:

$$\min C_{total} = C_{buy} + C_{Bat}^{invest} + C_{Bat}^{op} + C_{SC}^{invest} + C_{SC}^{op} + C_{converter}^{invest} \quad (27)$$

式(27)中, C_{buy} 是牵引供电系统日购电成本; C_{Bat}^{invest} 是蓄电池折算到每日的投资成本; C_{Bat}^{op} 是蓄电池的日运行与维护成本; C_{SC}^{invest} 为超级电容器折算到每日的投资成本; C_{SC}^{op} 为超级电容器的日运行与维护成本; $C_{converter}^{invest}$ 是连接储能系统和牵引网的变流器折算到每日的投资成本。

约束条件如下:

1) 电功率平衡约束。

$$P_{buy}(t) + P_{Bat}^{dis}(t) + P_{SC}^{dis}(t) + P_{speed}^{dis}(t) = P_{train}(t) + P_{Bat}^{cha}(t) + P_{SC}^{cha}(t) + P_{speed}^{cha}(t) \quad (28)$$

式(28)中: $P_{train}(t)$ 是系统的牵引负荷功率, 正值代表牵引用电, 负值代表再生制动功率, $P_{speed}^{dis}(t)$ 是列车调速过程对比匀速时减少的功率, $P_{speed}^{cha}(t)$ 是列车调速过程对比匀速时增加的功率。

2) 超级电容器的约束。

$$SOC_{SC}^{min} \leq SOC_{SC}(t) \leq SOC_{SC}^{max} \quad (29)$$

$$SOC_{SC}(0) = SOC_{SC}(T) \quad (30)$$

$$0 \leq P_{SC}^{cha}(t) \leq P_{SC}^{cha,max} \quad (31)$$

$$0 \leq P_{SC}^{dis}(t) \leq P_{SC}^{dis,max} \quad (32)$$

过充电和过放电会影响储能装置的运行寿命, 式(29)约束了超级电容器的 SOC 大小。式(30)使超级电容器的始末荷电状态保持一致, 式(31)和(32)是对其充电和放电功率大小的限制。

3) 蓄电池的约束。

$$SOC_{Bat}^{min} \leq SOC_{Bat}(t) \leq SOC_{Bat}^{max} \quad (33)$$

$$SOC_{Bat}(0) = SOC_{Bat}(T) \quad (34)$$

$$0 \leq P_{Bat}^{cha}(t) \leq P_{Bat}^{cha,max} \quad (35)$$

$$0 \leq P_{Bat}^{dis}(t) \leq P_{Bat}^{dis,max} \quad (36)$$

蓄电池的约束条件类似于超级电容器, 如式(33)~(36)所示。

5. 算例分析

本文以图 6 所示高铁牵引变电所负荷为例, 对高铁供电系统的储能配置进行分析。首先只采用列车

速度调节回收再生制动能量, 然后同时采用列车速度调节和混合储能系统配合回收再生制动能量。作为对比, 本文分别对六种场景进行了仿真分析, 场景分别为: 不采用列车速度调节和混合储能系统; 只采用列车速度调节回收再生能量; 只采用混合储能系统完全回收再生制动能量; 同时采用列车速度调节和混合储能系统相配合完全回收再生能量; 只采用混合储能系统部分回收再生制动能量; 同时采用列车速度调节和混合储能系统相配合回收部分再生制动能量。这是一个混合整数线性规划问题, 本文使用 CPLEX 和 YALMIP 工具箱在 MATLAB 环境中求解优化问题。六种场景的仿真结果如表 2 所示。表 2 中给出了六种场景中需投入的超级电容器和蓄电池的数量以及牵引供电系统日总成本, 表 3 对六种场景的节能进行了对比分析。

Table 2. Results of simulation
表 2. 仿真结果

回收方式	有无混合储能系统	有无列车调速	储能系统日均 投资成本(元)	变流器日均 投资成本(元)	日基本电费 (元)	日总成本 (元)
不回收	无	无	0	0	15,000	70,164
不回收	无	有	0	0	13,320	66,241
完全回收	有	无	5876	1034	12,960	70,841
完全回收	有	有	2982	894	12,000	66,847
部分回收	有	无	1850	804	13,680	68,384
部分回收	有	有	905	756	12,000	65,478

Table 3. Energy saving comparison of six scenarios
表 3. 六种场景节能比较

场景	储能回收能量/kWh	列车调速节能/kWh	总节能/kWh
无储能 + 无列车调速	0	0	0
无储能 + 有列车调速	0	3738	3738
储能完全回收 + 无列车调速	6988	0	6988
储能完全回收 + 有列车调速	3250	3738	6988
储能部分回收 + 无列车调速	5190	0	5190
储能部分回收 + 有列车调速	1840	3738	5578

从表 2、表 3 中可知, 在采用储能系统结合列车调速对再生制动能量部分回收策略下, 日节省能量 5578 kWh, 同样部分回收再生制动能量场景下, 有列车调速时储能系统的投资成本较无列车调速时节省了 51.1%。日总运行成本较无储能回收且无列车调速时降低了 6.68%。列车调速通过负荷管理显著降低储能系统规模需求, 而混合储能则高效处理剩余再生能量, 二者协同突破完全回收模式的经济性瓶颈, 实现投资与运行成本的双重优化。

6. 结论

基于高铁再生制动能量高功率、大能量的特性, 本文提出融合列车调速与混合储能系统的协同回收策略, 结论如下:

在保障运行安全与到站时间的前提下, 通过实时调节供电臂内协同运行列车的速度, 可动态吸收再生制动能量, 同时实现牵引负荷的功率峰值管理, 减少基本电费支出; 结合超级电容器与锂电池的混合储能系统, 针对未被调速消纳的剩余能量实施部分回收, 将铁路牵引供电所日总成本降低了 6.68%。

基金项目

湖南省教育厅资助科研项目(23C0429); 湖南省教育厅资助科研项目(23C0424)。

参考文献

- [1] 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): 587-598.
- [2] 孙帮成. CRH380BL 型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [3] 胡海涛, 陈俊宇, 葛银波, 等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 246-256.
- [4] 张欣. 电气化铁路动车组独立站点型再生制动能量回馈装置研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [5] 吴昊. 电气化铁路再生制动能量回馈系统控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [6] 范琪琦. 基于 MMC 电气化铁路再生制动能量回收装置研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] 魏润斌, 杜鹏, 杨雍彬, 等. 地铁列车再生制动能量利用分析与时刻表优化方法研究[J]. 铁道学报, 2020, 48(8): 1-9.
- [8] 冯瑜, 陈绍宽, 冉昕晨, 等. 考虑再生制动能利用的城市轨道交通列车节能运行优化方法研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(2): 15-22.
- [9] 夏欢, 杨中平, 杨志鸿, 等. 基于机车运行状态的城轨超级电容储能系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 16-23.
- [10] 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, 34(3): 135-144.
- [11] 信月, 杨中平, 林飞, 等. 基于参数反馈的城轨交通超级电容健康状态估算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 396-404.
- [12] 田雷, 孙玉明, 孙伟, 等. 京张高铁自动驾驶列车技术规章适应分析与制修订建议研究[J]. 综合运输, 43(2): 133-137.