



城市轨道交通储能-能馈混合型再生制动 能量利用系统研究

耿晓彤, 钟志宏, 林飞, 杨中平
(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对城市轨道交通再生制动能量高效利用问题, 文章提出了一种“储能-能馈”混合型再生制动能量利用系统的容量配置方法及控制阈值设置策略。在分析集中式牵引供电系统结构的基础上, 阐述了牵引变电所、储能装置与能馈装置的协同工作机制; 进而提出“先全线能馈、后按需储能”的分层容量配置策略, 并结合电压分级控制逻辑, 实现再生能量的高效利用。以国内某地铁线路10个车站为例建立仿真模型, 结果表明, 所提方案在30年寿命周期内总成本显著降低, 且能馈优先策略相较于储能优先策略具有更明显的节能效果。

关键词: 城市轨道交通; 再生制动能量; 储能系统; 能馈系统; 容量配置; 控制策略

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0026-08

0 引言

随着城市化进程的加快和轨道交通的蓬勃发展, 地铁运行过程中的巨大能耗已成为亟待解决的关键问题。其中, 如何高效回收利用列车产生的再生制动能量, 正逐渐成为城轨交通领域的研究热点之一^[1]。

目前, 再生制动能量的利用途径主要包括列车运行图优化、能量回馈型和能量存储型等几种方法^[2]。其中, 列车运行图优化是通过增加列车牵引与制动过程的重叠面积, 提升能量的直接利用率, 从而达到节能目的^[3]。然而, 受限于运行图编制的多重约束, 该方法对能量利用率的提升幅度较为有限。能量回馈型是通过安装能馈装置, 将车辆的再生制动能量回馈至交流电网, 根据接入电压等级的不同可分为低压能馈和中压能馈两种方式^[4], 这种方法可实现能量的实时利用。然而, 由于电网通常采用单向计费模式, 即地铁系统仅能从电网购电而无法获得电能回馈的经济补偿, 使得能馈装置虽能减小能耗, 却难以直接降低运营成本

, 导致投资回报率低。能量存储型是通过在变电站或列车上安装储能装置, 在制动阶段吸收多余再生能量并储存, 在牵引阶段释放能量供列车使用。该方法能够实现再生能量的高效利用, 并有效抑制母线电压波动, 但其不足之处在于储能装置占地面积大且初始投资成本较高。

为了规避上述弊端, 越来越多的研究开始聚焦储能与能馈的混合利用, 从而将二者优势互补, 相关方案已逐步应用于工程实践。例如, 苏州轨道交通2号线在徐图港站安装了额定功率为2 MW的中压逆变回馈系统, 在桐泾公园站则配置了1 MW的超级电容储能系统^[5]。虽然储能-能馈混合型再生制动能量利用系统已在工程中得到初步应用, 但相关研究仍处于探索阶段。

针对能量回馈系统与储能系统间的相互影响、混合系统的容量配置方法及其协同控制策略等问题, 尚缺乏完整的理论分析。本文以该混合系统为研究对象, 综合考虑储能与能馈的协同运行, 提出相应的容量配置及控制策略, 并通过仿真验证其可行性与有效性。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFE0104400)

通信作者: 耿晓彤, 女, 主要从事城轨再生制动能量利用方面的研究; E-mail: 24121279@bjtu.edu.cn

引用格式: 耿晓彤, 钟志宏, 林飞, 等. 城市轨道交通储能-能馈混合型再生制动能量利用系统研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 26-33.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.302.

Citation: GENG Xiaotong, ZHONG Zhihong, LIN Fei, et al. Research on an energy storage-energy feedback hybrid system for regenerative braking energy utilization in urban rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 26-33.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.302.

1 混合型再生能量利用系统拓扑结构分析

目前, 我国城市轨道交通系统通常采用的供电方式分为集中式供电和分散式供电两种^[6]。其中, 集中式供电可在同一供电分区内实现多列车牵引与制动能量的直接交互, 减少再生能量向电网的回馈需求, 从而有效规避电网单向计费问题, 有利于提升再生能量的整体利用效率。本文研究的混合型再生能量利用系统包含储能装置和中压能馈装置, 其拓扑结构如图1所示。

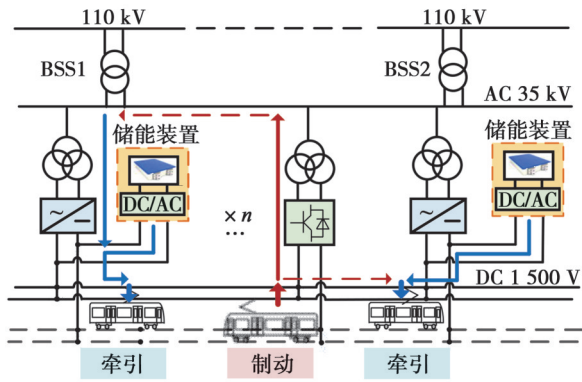


图1 储能-能馈混合型再生能量利用系统拓扑图
Fig. 1 Topology of energy storage-energy feedback hybrid regenerative energy utilization system

1.1 牵引供电系统

在城轨牵引供电系统中, 牵引变电所通常由整流器和降压变压器组成, 考虑到其整流机组输出特性^[7], 将牵引变电所等效为电压源、二极管与等效电阻串联的形式, 如图2所示。

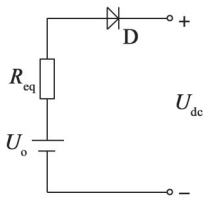


图2 牵引变电所等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of traction substation

牵引网电压与空载电压的相对关系决定了系统的工作状态。当牵引网电压低于其空载电压时, 系统处于牵引工况, 此时整流装置启动运行, 将交流电能转换为直流电供给列车牵引。反之, 当牵引网电压高于空载电压时, 系统则进入制动工况, 整流装置退出运行。这一能量单向流动特性由二极管D的单向导通性体现^[8], 其外特性可由式(1)表示。

$$U_{dc} = U_0 - I_{dc} \cdot R_{eq} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为牵引变电所输出电压; U_0 为空载电压; I_{dc} 为牵引变电所输出工作电流; R_{eq} 为等效串联内阻^[9]。

列车作为牵引供电系统的主要负载, 等效为受控功率源模型。在计算过程中, 某一时刻列车的功率固定, 列车的电流由其功率与牵引网压计算得到。为有效防止再生制动能量无法被吸收而导致的再生失效问题, 现有城轨列车通常配置了制动电阻装置, 其具体由制动斩波器和制动电阻构成^[10]。斩波器占空比 d_{br} 取决于列车直流母线电压 u_t , 二者关系如图3所示。

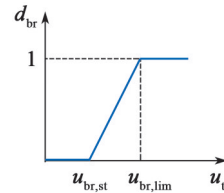


图3 车载制动电阻控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of on-board braking resistor control

由图3可知, 当 u_t 大于制动电阻启动电压 $u_{br,st}$ 时, 制动电阻启动, 且 d_{br} 随 u_t 升高呈线性增加; 当 u_t 上升至限制电压 $u_{br,lim}$, 占空比达到1。 d_{br} 与 u_t 的关系如式(2)所示, 制动电阻上的电流如式(3)所示。

$$d_{br} = \begin{cases} 0, & u_t < u_{br,st} \\ \frac{u_t - u_{br,st}}{u_{br,lim} - u_{br,st}}, & u_{br,st} \leq u_t \leq u_{br,lim} \\ 1, & u_{br,lim} < u_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_{br} 为斩波器占空比; $u_{br,st}$ 和 $u_{br,lim}$ 分别为制动电阻启动电压和限制电压; u_t 为列车直流母线电压。

$$i_{br} = d_{br} \cdot \frac{u_{br}}{R_{br}} \quad (3)$$

式中: i_{br} 为流过制动电阻的平均电流; R_{br} 为车载制动电阻值; u_{br} 为制动电阻两端电压。

由此, 列车模型可等效为由受控功率源与可变电抗源并联构成, 其等效电路如图4所示。

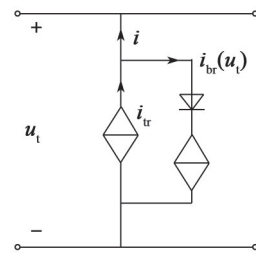


图4 列车模型

Fig. 4 Train model

在建立接触网(或第三轨)模型时, 首先根据列车运行图确定其在各个时间点的具体位置。基于这些信息, 可将运行图进一步细化为包含 N 个节点的电路网络^[11]。通过该等效方式, 可精确计算接触网各段导线的电阻值。为简化建模过程, 将每一段线路等效为可变电阻, 其阻值仅取决于对应区段的导线长度, 如图5所示。

根据列车实时位置及线路单位电阻参数, 列车与

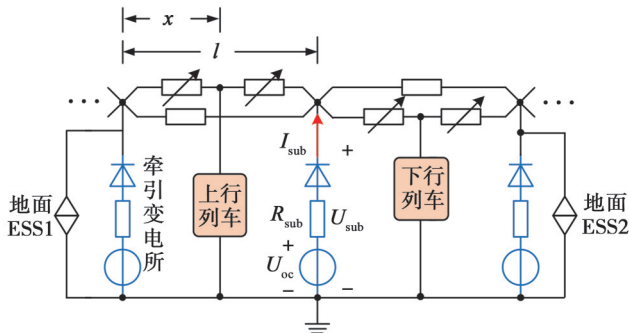


图5 牵引变电所与牵引网等效模型

Fig. 5 Equivalent model of traction substations and traction network

当前牵引变电所之间的线路电阻可由式(4)计算得出。

$$R(x) = (r_g + r_h) \cdot x, 0 \leq x \leq l \quad (4)$$

式中： $R(x)$ 为变电所之间的线路电阻； r_g 和 r_h 分别为接触轨和回流轨的单位长度内阻； x 为列车与一侧变电所之间的距离； l 为相邻两座变电所之间的距离。

1.2 能馈装置

目前，能馈装置多采用IGBT逆变器与二极管整流器并联的拓扑结构^[12]。配置能馈装置的牵引变电所通常包含4种工作模式，如图6所示。其中， AB 段对应整流工况， BC 段为装置关断状态， CD 段表示逆变下垂运行； DE 段则为最大功率逆变状态。

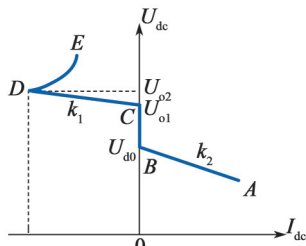


图6 含逆变的牵引变电所工作特性曲线

Fig. 6 Operating characteristic curve of traction substation with inverter

能馈装置主要由逆变器、交流电感和直流支撑电容组成^[13]，其单相等效电路如图7所示。根据等效电路，可建立如式(5)所示的电压平衡方程。

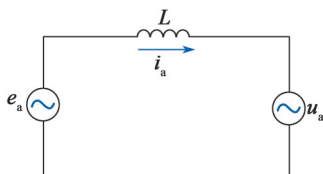


图7 能馈单相等效电路模型

Fig. 7 Single-phase equivalent circuit model for energy feedback

$$e_a - u_a = L \frac{di_a}{dt} \quad (5)$$

式中： e_a 为逆变器交流侧a相等效输出电压； u_a 为系统侧a相电压； i_a 为流经交流电感的相电流； L 为交流侧串联电感的电感值。

1.3 储能装置

储能装置的建模主要包括内部电路建模与外特性建模两种方式，后者更适用于直流牵引供电系统计算^[14]。根据不同的控制目标，储能装置的工作状态可分为恒压充电、恒压放电、最大电流充电、最大电流放电与关断5种，其在直流牵引网侧的简化电路模型如图8所示。

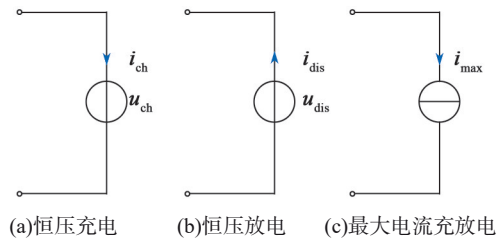


图8 储能系统等效电路模型

Fig. 8 Equivalent circuit model of energy storage system

当牵引网母线电压 u_E 高于储能充电阈值 u_{ch} 且充电电流 i_{ch} 未超过最大限制值 i_{max} 时，储能系统工作在恒压充电状态，其等效电路模型如图8(a)；当 u_E 低于储能放电阈值电压 u_{dis} ，且放电电流在限制值以内，此时储能系统工作在恒压放电状态，等效电路模型如图8(b)；当储能充放电电流超出限制值，此时储能等效为电流源，以最大电流进行充放电，其等效电路模型如图8(c)。

2 容量配置与控制策略研究

2.1 容量配置

在储能-能馈混合型系统再生能量利用的优化设计中，本文提出“先全线能馈，后按需储能”的分层配置策略。该策略先在全线牵引变电所统一部署能馈装置，进而通过对比各变电所返送主所的再生能量，筛选出关键站点增设储能装置，具体流程如图9所示。此策略的提出基于对系统经济性与技术效能的综合考量：由于能馈系统位于交流侧且电压等级较高，相较于储能系统，再生能量回馈至能馈系统所产生的线路损耗更低，因而优先配置能馈装置有利于提升整体能量利用效率。

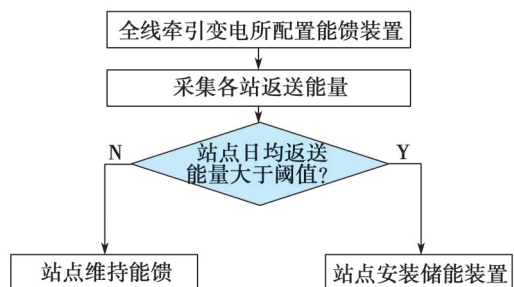


图9 分层配置策略

Fig. 9 Hierarchical allocation strategy

为确定需增设储能的关键站点, 本文基于第1节所建立的系统仿真模型, 首先对全线配置能馈装置后的能量流动进行仿真分析, 重点考察各牵引变电所返送至主变电所的净返送能量。通过对比各站返送量对系统总再生能量消纳的贡献程度, 筛选出返送量最大的 n 个站点作为储能候选站点。在此基础上, 以系统整体经济性与节能率为优化目标, 对候选站点开展储能容量的组合优化。例如, 取 $n=3$, 每个候选站点的储能配置容量可在2 MW、3 MW或4 MW中进行选择, 对各配置组合进行仿真对比, 以评估不同储能容量方案下的系统性能, 最终确定综合效益最优的储能布局与容量配置方案。该方法通过精细化仿真与组合优化, 既充分发挥了能馈技术的成熟性与可靠性, 又实现了储能的精准配置与容量控制, 有效避免了资源浪费, 在全生命周期成本上显著优于单一储能方案。

为合理评估储能-能馈混合再生能量利用系统容量配置的经济效益, 需综合考量装置安装成本与系统全生命周期内的电费支出。本研究引入30年总成本作为核心评估指标, 该成本模型涵盖两部分: 一是能馈装置与储能装置的设备费用; 二是系统运行周期内列车牵引所产生的购电费用。其中, 设备总成本不仅包括设备采购费, 而是包括贯穿系统运行周期内的设备相关综合支出, 具体包括设备投资、配套开关成本、安装工程费和运维成本, 符合城轨项目长期运营的实际特征。

30年总成本 C_{total} 的计算公式如式(6)所示。其中, 单位电费取0.75元/度。

$$C_{total} = C_{eq} + C_{switch} + C_{install} + C_{om} + C_{traction} \quad (6)$$

式中: C_{total} 为30年总成本; C_{eq} 为设备投资; C_{switch} 为配套开关成本; $C_{install}$ 为安装工程费; C_{om} 为运维成本, $C_{traction}$ 为30年的总牵引电费。

2.2 协同控制策略

除容量配置外, 储能-能馈混合再生能量利用系统的高效运行也依赖于合理的控制策略设计。若控制阈值设置不当, 可能导致储能装置频繁充放电缩短寿命, 或引发能馈装置过早启动增加电网谐波污染的风险。

能馈装置通常采用恒压控制和下垂控制两种方式。其中, 恒压控制以维持直流母线电压稳定为目标, 下垂控制则通过调节输出电压与反馈电流之间的函数关系, 实现不同装置间的功率自动分配。储能系统一般基于电压阈值制定充放电控制策略, 即根据牵引网母线电压与储能充放电阈值之间的相对关系, 判断储能装置的工作模式及功率大小^[15]。

本文提出的控制策略通过设定储能与能馈装置的差异化动作阈值, 实现再生能量的分级协同利用。在阈值切换点引入缓冲区间, 减少装置频繁启停, 提升系统稳定性。列车制动产生的再生能量优先被邻近牵引列车吸收, 剩余能量则依次由储能装置储存或经能

馈装置回馈至交流侧, 尽量减少由制动电阻消耗的能量。具体流程如图10所示。其中, U_{fb} 为能馈装置启动阈值, U_{ch} 为储能装置充电阈值。当 $U_{fb} > U_{ch}$ 时, 储能装置优先吸收能量; 当 $U_{fb} = U_{ch}$ 时, 储能装置与能馈装置同时启动; 当 $U_{fb} < U_{ch}$ 时, 能馈装置优先吸收能量。

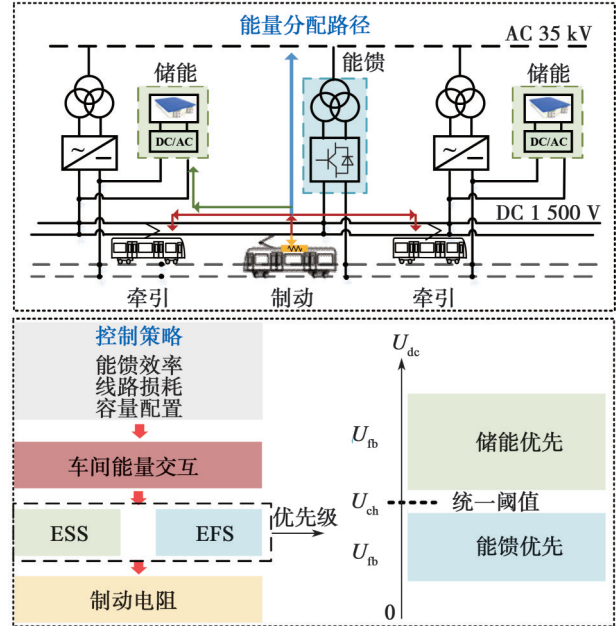


图10 阶梯式能量分配

Fig. 10 Stepwise energy distribution

3 仿真分析

由于储能-能馈混合系统是一个复杂的时变系统, 控制策略的设定受能馈效率、线路损耗及容量配置等多因素的综合影响, 难以直观地确定储能与能馈之间的相互作用机理及各自阈值设置规律。为此, 本文基于实测数据, 结合仿真模型对上述问题开展进一步研究。

以某地铁线路为例进行仿真验证, 该线路包括7个牵引变电站和3个非牵引变电站, 各牵引变电站与主变电所的位置示意图如图11所示。

供电系统的主要参数如表1所示。

表1 供电系统的参数

Table 1 Parameters of power supply system

参数项目	参数值
电压等级/V	1 500
空载电压/V	1 650
接触网电阻/ Ω	0.014 3
线路电阻/ Ω	0.02
制动电阻启动电压/V	1 850
制动电阻最大电压/V	1 940

采用30年总成本作为评估指标, 在调研基础上确定了储能装置与能馈装置的相关成本参数。储能装置和能馈装置的具体设备成本如表2所示。

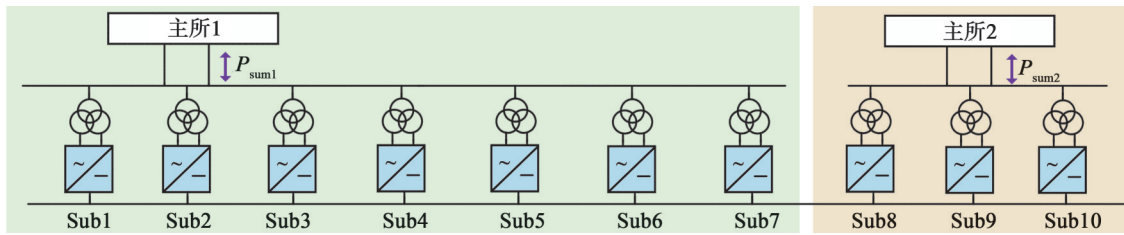


图 11 牵引变电站与主所位置示意图

Fig. 11 Location illustration of traction substation and main substation

表 2 设备成本
Table 2 Equipment costs

装置类型	配置/MW	$C_{eq}/$ ($\times 10^4$ 元)	$C_{switch}/$ ($\times 10^4$ 元)	$C_{install}/$ ($\times 10^4$ 元)	$C_{om}/$ ($\times 10^4$ 元)
储能装置	2	360	20	28	72
	3	540	20	37	108
	4	720	20	40	144
能馈装置	4	110	40	44	55

根据所提出的分层配置策略,在全线 10 个牵引变电站统一配置容量为 4 MW 的能馈装置并进行仿真计算,得出连接至主变电站 1 的 1~7 号变电站的日回馈电量为 1 651~2 299 kWh,如图 12 所示,而连接至主变电站 2 的 8~10 号变电站因站间能量交互较少,返回主所的能量明显更高,日回馈电量为 5 623~6 486 kWh。具体数据如图 13 所示。

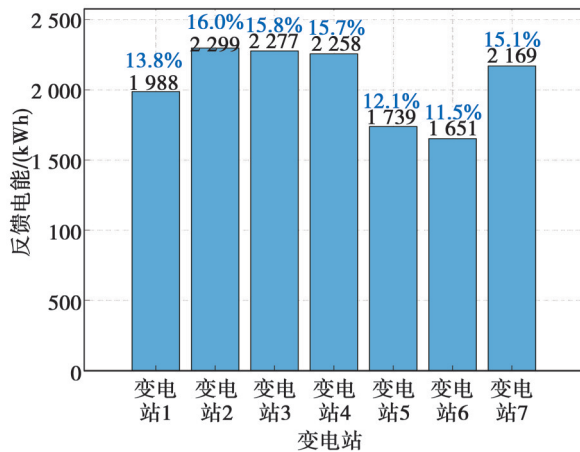


图 12 返回主所 1 的能量

Fig. 12 Feedback energy to main substation 1

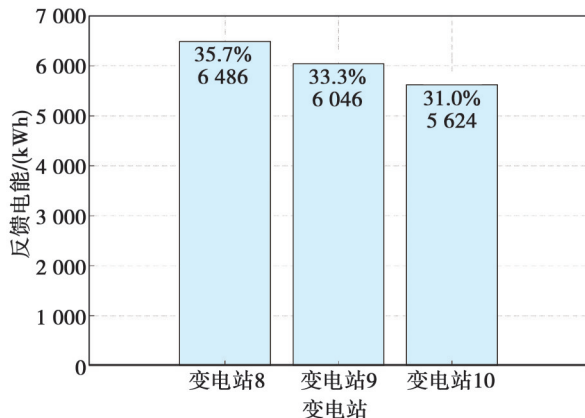


图 13 返回主所 2 的能量

Fig. 13 Feedback energy to main substation 2

通过对比各站返送能量筛选出储能安装站点后,需进一步考虑储能容量与能馈容量的匹配问题。实测数据表明,该线路上下行列车牵引最大功率为 5 MW,制动最大功率为 8 MW。若某站点返送能量中,单次制动功率超 4 MW 的时段占比高(如高峰时段多列车同时制动),则可为该站点配置 4 MW 储能装置,与 4 MW 能馈装置共同构成 8 MW 的总消纳能力,可完全覆盖单列车制动峰值功率,有效避免制动电阻启动。此外,考虑到部分制动能量可被邻近的牵引列车吸收,实际所需的储能容量可适当降低。因此,将 2 MW 和 3 MW 作为备选容量方案,对比不同配置下的能耗与经济效益。

选取返送主所能量较大的 2 号、8 号及 9 号变电站作为储能候选站点,分别配置 2 MW、3 MW 和 4 MW 的储能装置进行仿真。针对不同发车间隔分别计算线路直流侧能耗,并根据各发车间隔在全天运行中的出现频次将能耗结果折算到全日值,统计结果如表 3 所示。

表 3 不同储能容量结果对比

Table 3 Comparison of results for different energy storage capacity options

储能配置容量/MW	$E_{dc}/$ (kWh)
2	70 772.95
3	69 392.00
4	67 922.32

系统在一个发车间隔内的直流侧能耗 E_{dc} 定义如式(7)所示。

$$E_{dc} = E_{sub} - E_{fb} \quad (7)$$

式中: E_{dc} 为直流侧能耗; E_{sub} 为牵引变电站的输出总能量; E_{fb} 为变电站返送回主变电所的再生能量。

在评估系统性能时,除直流侧能耗外,还需综合考虑经济性指标。根据上文定义的 30 年总成本计算方法,对不同储能配置方案进行经济性对比。在上述容量配置下,储能容量为 2 MW、3 MW 和 4 MW 时对应的设备总费用及 30 年总成本变化如图 14 所示。结果表明,配置 4 MW 储能时系统的 30 年总成本最低。

选取变电站 4、变电站 6、变电站 9 配置 4 MW 储能作为对照组,与本文提出的分层配置方案进行对比,如表 4 所示。结果表明,采用分层策略的原方案在综合经济效益方面优于对照组,验证了所提容量配置方法

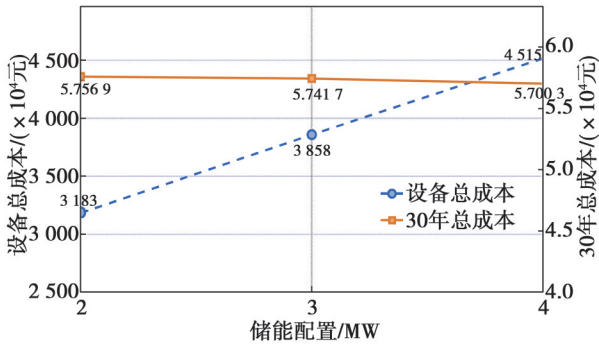


图14 储能不同配置结果对比

Fig. 14 Comparison of results for different energy storage capacity allocation options

的有效性。

表4 原方案与对照组对比

Table 2 Comparison of original and control schemes 10^4 元

参数项目	分层配置方案	对照组
$C_{eq, total}$	4 515	4 515
C_{total}	57 003	57 864

在确定容量配置方案的基础上, 进一步研究混合系统的控制策略。分别设定3种不同的储能-能馈阈值方案: 统一阈值、储能优先和能馈优先。以400 s发车间隔为例进行仿真对比分析, 结果如图15所示。

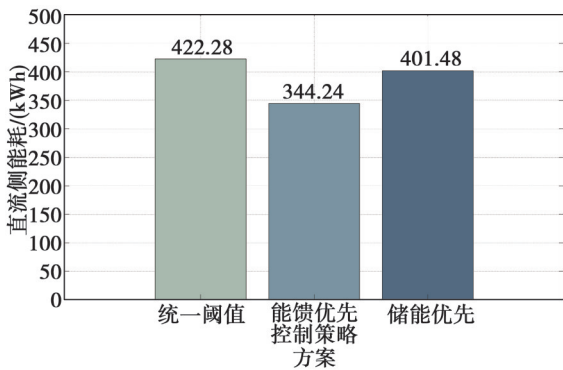


图15 3种储能-能馈阈值方法结果对比

Fig. 15 Comparison of results for three energy storage-energy feedback threshold options

由图15可知, 相较于统一阈值方案, 储能优先策略可使系统能耗降低4.93%, 而能馈优先策略则可降低能耗18.48%。可见从节能效果角度评估, 能馈优先策略具有明显优势。因此, 在阈值设置上, 能馈装置的启动阈值应低于储能装置的充电阈值, 以保证系统中出现剩余再生制动能量时, 能馈装置优先启动响应。此外, 储能装置的放电阈值设定需综合考虑可用容量与能量供需之间的平衡关系。在混合系统中, 能馈装置将多余再生能量直接回馈交流电网或供给其他负载使用, 仅需一次能量转换, 损耗相对较低。储能装置则需经历充电存储与放电释放两个过程, 存在二次转换损耗, 整体效率受限于充放电效率; 同时, 集中式供电模式可通过电网统一调度, 将多余电能分配至实

时需求较高的区域, 而储能优先策略仅能在局部范围内利用再生能量, 可能造成能量冗余或利用不充分。

对全储能、全能馈和储能-能馈混合3种系统的直流侧能耗和经济效益进行研究。不同配置下的能耗对比如图16所示, 储能-能馈混合型的日能耗较全能馈系统减少了1 805 kWh, 较全储能系统减少了5 502 kWh, 且该配置下制动电阻损耗为零, 体现出最优的节能效果。在经济性方面, 全能馈系统的初始设备投资成本最低, 但从30年长期运行总成本来看, 储能-能馈混合系统为57 873万元, 较全能馈系统的79 641万元节省21 768万元, 较全储能系统的60 828万元节省2 955万元。由此可见, 储能-能馈混合系统在全生命周期内具有更优的经济性。

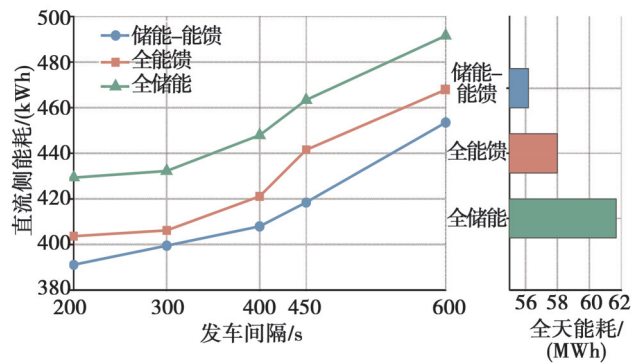


图16 不同配置下直流侧能耗和日能耗对比

Fig. 16 Comparison of DC-side energy consumption and daily energy consumption under different allocation options

4 结束语

本文提出了一种应用于城市轨道交通的储能-能馈混合型再生制动能量利用系统, 并对其容量配置与控制策略展开系统研究。通过构建包含牵引变电站、储能装置和能馈装置的拓扑模型, 引入“先全线能馈, 后重点储能”的分层配置策略, 并结合电压分级控制逻辑, 实现了再生能量的阶梯式协同管理, 解决了传统单一储能或单一能馈系统在能量利用率、经济性及电网影响等方面的局限性。

仿真结果表明, 采用分层配置策略的储能-能馈混合系统在30年寿命周期内的总成本约为5.7亿元, 其综合经济效益显著优于对照组方案。在固定容量配置下, 能馈优先控制策略相较于储能优先策略表现出更优的节能效果, 二者相较于统一阈值方案分别降低能耗18.48%和4.93%。经济性对比分析进一步显示, 全能馈方案设备投资成本最低, 但储能-能馈混合方案在30年总成本方面最具优势, 比全能馈方案节省21 768万元, 比全储能方案节省2 955万元。综上, 储能-能馈混合系统在技术性能与经济性方面均表现出较高可行性, 为城市轨道交通牵引供电系统的节能优化提供了

理论依据与工程参考。

参考文献:

- [1] 刘继宗, 张祖涛, 王浩, 等. 城轨交通制动能量利用技术研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(6): 1322-1345.
LIU Jizong, ZHANG Zutao, WANG Hao, et al. Braking energy utilization in urban rail transit: status and prospects[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2024, 59(6): 1322-1345.
- [2] 刘宇嫣. 城市轨道交通地面式混合储能系统自适应能量管理策略与容量配置研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
LIU Yuyan. Adaptive energy management and capacity configuration of stationary hybrid energy storage system in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [3] 钱舒杨, 李泓羿, 石瑞文, 等. 计及牵引供电能耗的地铁列车运行图节能优化[J/OL]. 控制工程. (2024-12-30) [2025-10-10]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240639>.
QIAN Shuyang, LI Hongyi, SHI Ruiwen, et al. Energy-saving optimization of metro train operation diagram considering traction power supply energy consumption[J/OL]. Control Engineering. (2024-12-30) [2025-10-10]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240639>.
- [4] 李志强, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 城轨交通混合型再生制动能量利用系统及其控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 203-210.
LI Zhiqiang, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Hybrid regenerative braking energy utilization system and its control strategy in urban rail transit[J]. Electric power automation equipment, 2023, 43(11): 203-210.
- [5] 邹文骏. 苏州轨道交通列车再生制动能量吸收装置应用情况分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 21-26.
ZOU Wenjun. Application condition analysis of Suzhou rail transit train regenerative braking energy absorption device [J]. Urban mass transit, 2022, 25(5): 21-26.
- [6] 任家兴. 含储能装置的城轨交通能馈系统再生制动能量回收利用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
REN Jiaying. Research on regenerative braking energy recovery and utilization of urban rail transit energy feedback system with energy storage device[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [7] POZZOBON P. Transient and steady-state short-circuit currents in rectifiers for DC traction supply[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 1998, 47(4): 1390-1404.
- [8] PEREZ F, IOVINE A, DAMM G, et al. Stability analysis of a DC microgrid for a smart railway station integrating renewable sources[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2020, 28(5): 1802-1816.
- [9] 赵紫薇. 城轨交通车-地储能系统容量优化配置与能量管理策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHAO Ziwei. Research on capacity optimization and energy management strategy of urban rail transit on-board and wayside energy storage system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [10] 诸斐琴. 城市轨道交通地面式超级电容储能系统自适应协调控制与容量配置综合优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHU Feiqin. Adaptive cooperative control and capacity configuration optimization of supercapacitor energy storage systems in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [11] GAO M, WANG X H, MOU X C, et al. Research on converter topology and control of co-phase traction power supply system based on MMC topology[C]//Springer. Proceedings of Purple Mountain Forum 2019-International Forum on Smart Grid Protection and Control. Singapore: Springer, 2020: 485-495.
- [12] 陈德胜. 城轨新型能馈式牵引供电集成技术研究及实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
CHEN Desheng. Research and realization of integration technology for the new energy feedback traction power supply in the urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [13] 刘炜, 许伶俐, 廖钧, 等. 含逆变回馈装置的城市轨道交直流混合潮流计算[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 65-71.
LIU Wei, XU Lingli, LIAO Jun, et al. Calculation of AC-DC hybrid power flow in urban rail traction power supply system with regenerated energy feedback device[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(11): 65-71.
- [14] 刘炜, 吴拓剑, 禹皓元, 等. 直流牵引供电系统地面储能装置建模与仿真分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4207-4215.
LIU Wei, WU Tuojian, YU Haoyuan, et al. Modeling and simulation of way-side energy storage devices in DC traction power supply system[J]. Transactions of China electro-technical society, 2020, 35(19): 4207-4215.
- [15] KONG D S, MIYATAKE M S F. Energy management of superconducting magnetic energy storage applied to urban rail transit for regenerative energy recovery[C]//IEEE. 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Hamamatsu: IEEE, 2020: 2073-2077.

Research on an energy storage-energy feedback hybrid system for regenerative braking energy utilization in urban rail transit

GENG Xiaotong, ZHONG Zhihong, LIN Fei, YANG Zhongping

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To promote efficient utilization of regenerative braking energy in urban rail transit, this paper proposes a capacity allocation method for a hybrid regenerative braking energy utilization system that combines energy storage and energy feedback, and discusses the strategy for setting control thresholds. Based on the system architecture of centralized traction power supply, the collaborative operating mechanisms among traction substations, energy storage systems, and energy feedback devices are first analyzed. Then, a hierarchical capacity allocation strategy is proposed, which "prioritizes full-line energy feedback and implements on-demand energy storage", and efficient regenerative energy utilization is achieved by combining this strategy with a hierarchical voltage control logic. A system simulation model was established, incorporating 10 stations of a metro line in China. Simulation results show that the proposed allocation approach significantly reduces total cost over a 30-year life cycle, and that the energy feedback priority strategy delivers greater energy savings than the energy storage priority strategy.

Keywords: urban rail transit; regenerative braking energy; energy storage system; energy feedback system; capacity allocation; control strategy