

基于列车运行工况的城轨地面式混合储能系统控制策略研究

杨浩丰¹ 刘冲² 李彬³ 林飞¹ 杨中平¹

(1. 北京交通大学电气工程学院 北京 100044
2. 中国船舶工业系统工程研究院 北京 100094
3. 北京交通大学长三角研究院 镇江 212009)

摘要 电池/超级电容混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)兼具功率密度大和能量密度高的特点。根据城市轨道交通实际线路条件和运行状况,建立仿真模型。通过分析不同发车间隔下剩余再生制动能量的分布和混合储能系统功率分配策略对系统的影响,考虑到电池和超级电容两种储能元件的特性不同,提出基于列车运行工况的动态比例分配策略。该控制策略分为充电模式和放电模式。在充电模式下,通过判别列车运行工况调整功率分配比例,减少电池的使用,提高装置寿命与节能效果。在放电模式下,功率分配比随电池 SOC 动态调整,防止电池过充、过放。最后给出了北京地铁实际线路参数下 2MW 混合储能系统的仿真结果,验证了该策略的有效性。

关键词: 城轨交通 混合储能系统 控制策略 列车运行工况

中图分类号: TK02

Research on Control Strategy of Urban Rail Ground Hybrid Energy Storage Device Based on Train Operating Condition

Yang Haofeng¹ Liu Chong² Li Bin³ Lin Fei¹ Yang Zhongping¹

(1. Beijing Jiaotong University School of Electrical Engineering Beijing 100044 China
2. Systems Engineering Research Institute Beijing 100094 China
3. Beijing Jiaotong University Yangtze River Delta Research Institute Zhenjiang 212009 China)

Abstract The battery/supercapacitor hybrid energy storage system combines high power density with high energy density. According to the actual line conditions and running conditions of urban rail transit, a simulation model is established. By analyzing the distribution of the residual regenerative braking energy at different departure intervals and the influence of hybrid energy storage system power distribution strategy on the system, and considering the different characteristics of the battery and the supercapacitor, a dynamic proportional distribution strategy based on the train operating conditions was proposed. The control strategy is divided into charging mode and discharging mode. In the charging mode, the power distribution ratio is adjusted by discriminating the train operating conditions to reduce the use of the battery and improve the service life and energy saving effect of the device. In the discharge mode, the power distribution ratio is dynamically adjusted with the battery SOC to prevent overcharge and overdischarge of the battery. Finally, the simulation results of the 2MW hybrid energy storage system under the actual line parameters of Beijing subway are presented, and the effectiveness of the strategy is verified.

Keywords: Urban rail transit, hybrid energy storage system, control strategy, train operating condition

0 引言

城市轨道交通具有运量大、人均能耗低、污染少和安全可靠等特点,近年来得到了快速的发展,成为各国交通需求的普遍选择^[1-3]。随着我国城市轨道交通运营里程的快速增长,2019年城轨交通系统的用电量已占全国中用电量的2.1%^[4],国内地铁运营的用电成本约占地铁总运营成本的50%,其中列车制动产生的能量约占列车牵引能量的30%~60%^[5],可供回收的再生制动能量相当可观。诸多储能装置被安装到城轨牵引供电系统中,以达到回收列车再生制动能量和抑制牵引网压波动的目的^[6-7]。采用单一功率型或能量型储能元件来回收再生制动能量时,为满足功率和能量的双重需求,会导致容量或功率的冗余,成本过高,因此考虑列车牵引制动特性,统筹超级电容高功率密度和电池高能量密度特性的优势,弥补单一储能的不足,构成混合储能系统,在充分吸收列车再生制动能量的同时为供电故障列车提供紧急自牵引能量,在国内外城轨交通领域得到广泛关注^[8-9]。

混合储能系统能量管理策略的制定是一个热点问题。目前,混合储能系统广泛应用于电动汽车、微电网等领域^[10]。在对混合储能系统能量管理策略的研究中,文献[11]将混合储能系统的能量管理策略分为三类:基于规则的控制策略、基于优化的控制策略和基于智能的控制策略。文献[12]基于动态规划和神经网络优化方法,采用考虑储能系统和DC-DC变换器损耗最小化的混合储能系统能量管理策略。文献[13]提出了利用效用方程考虑电池和超级电容器电流波动的多目标优化问题,并利用KKT条件求解。该控制策略能够有效、快速地实时控制混合储能。

在城市轨道交通中,已有大量的文献对地面单储能系统的能量管理策略进行了深入的研究。在许多文献中,地面储能系统的控制策略主要根据牵引网电压的变化来设置储能系统的充放电电压阈值^[14-16]。文献[15]提出了一种基于动态阈值调节的城轨交通超级电容储能系统控制策略,根据牵引变电站空载电压波动实时调整充放电阈值,此方法有效地提高了储能系统节能和稳压效果。在国内,车载

混合储能系统应用广泛,地面式的混合储能系统还没有实际线路投入使用,但已有学者已经开始着手进行能量管理策略的研究。文献[17]提出基于电压分级的协调控制策略,根据客流量不同,在高低峰不同时期,电池、超级电容与制动电阻设置不同启动阈值。文献[18]提出一种基于混合储能系统城市轨道交通结构,提出了自适应系数控制的低通滤波器和用于电池荷电状态(State of Charge, SOC)恢复的电压漂移方法,提高混合储能系统的容量利用率。文献[19]基于不同发车间隔,根据列车剩余再生制动能量,选择电池与超级电容的功率分配模式。文献[20]提出一种变增益比例控制策略,抑制混合储能系统运行电压外环超调,并且为减小小时储能元件之间能量循环,提出选择性滤波分配控制策略。

上述文献并没有考虑城轨列车在不同发车间隔内,列车运行工况的变化的影响。实际运行中,在固定发车间隔内,不同列车的运行状态不同,造成牵引网中列车剩余再生制动能量的变化,采用单一的功率分配方法,会导致节能效果不佳、电池过度使用,不能充分发挥混合储能装置的优势。本文根据列车发车间隔下剩余再生制动能量的分布,总结出两类列车运行工况。混合储能系统充电时,根据列车运行工况选择不同的功率分配比例,在充分吸收再生制动能量的同时,减少电池的充电能量,提高储能装置的整体寿命。混合储能系统放电时,根据电池SOC,动态调整功率分配比例,防止电池出现过充和过放。

1 城轨交通供电系统分析

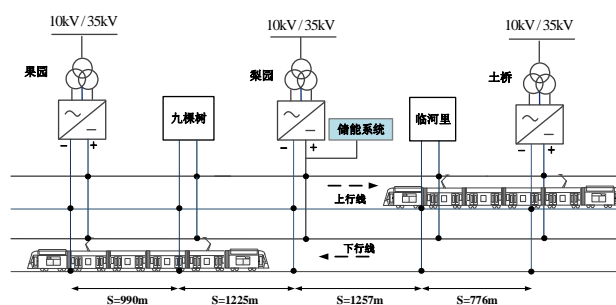


图1 含有储能系统的牵引供电系统结构

Fig.1 Structure of traction power supply system with energy storage system

目前，城市轨道交通直流牵引供电系统主要由牵引变电所、牵引网和列车组成。在本文中，加入地面式储能系统后，新构建的牵引供电系统结构如图 1 所示。牵引变电所将三相高压交流 10kV 整流为适合列车运行的直流 750V。地面式储能系统安装在牵引变电所内，与直流牵引网并联。为了分析城轨运行特点，本文搭建了含有储能系统的牵引供电系统模型，根据仿真模型通过对不同发车间隔下剩余再生制动能量和单次剩余再生制动能量的分析，对列车运行工况特点进行了分类与总结，并对储能形式进行对比。

1.1 含有储能系统的牵引供电系统建模

根据城轨交通供电系统的实际情况搭建仿真模型，模型结构如图 2 所示。整个模型包括列车运行模块、牵引网潮流解析模块、含有超级电容储能装置和电池储能装置的混合储能模块。其中列车运行模块根据输入的线路参数、车辆参数和列车时刻表输出上、下行列车的位置及功率等；混合储能模块设置储能系统的能量管理策略以及容量配置方案；牵引网潮流解析模块可设置牵引网参数，同时此模块根据列车运行模块、混合储能模块的状态与信息模拟线路上不同发车间隔下多的列车运行工况，并通过潮流解析得到每个时刻变电所的电压电流、储能系统的充放电功率等信息，为混合储能系统能量管理策略设计提供数据基础。

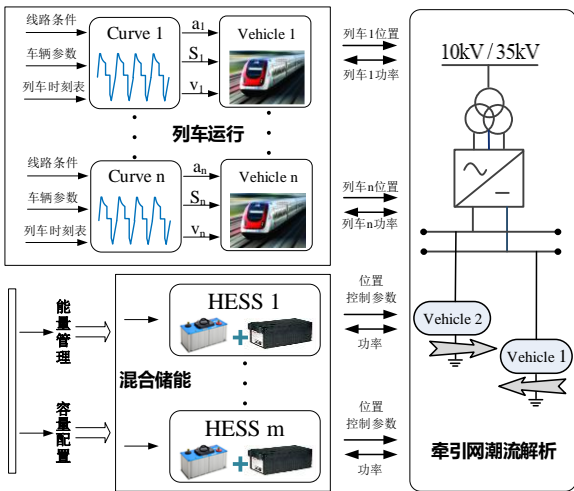


图 2 城轨列车供电系统仿真模型

Fig.2 Urban rail train power supply system simulation platform

1.2 列车运行工况分析

城轨交通线路在实际运行中，列车会根据全天乘客出行规律，在不同时间设定不同的发车间隔。以北京地铁某线路为例，其最大发车间隔为 600s，

最小发车间隔为 150s。列车的发车间隔 T_d 在一天内的变化曲线示意图如图 3 所示。在地铁上下行线运行中，在一个发车间隔下，当线路上列车分布满后，牵引网的能量流动也呈周期性变化^[21]。

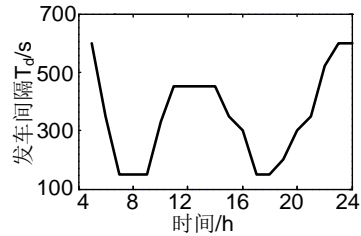


图 3 列车发车间隔分布情况

Fig.3 Train departure intervals distribution

当列车制动时，一部分再生制动能量可以被附近牵引列车吸收，其余的再生制动能量可以被储能装置吸收。当附近的列车牵引时，混合储能装置会释放能量，为回收下一次的剩余再生制动能量做准备。

图 4 为在不同发车间隔下列车运行相同时间储能装置需要回收的制动能量。总体来看，当列车发车间隔较小时，线路中同时运行的车辆数较多，多辆列车制动列车所需总的牵引能量以及多辆列车再生制动能量相对较多，对应的混合储能系统可以回收的剩余再生制动能量相对较多。当发车间隔较大时，线路中同时运行的车辆数较少，列车所需总的牵引能量较少，列车再生制动能量较少，对应混合储能系统回收的列车再生制动能量也就减小。

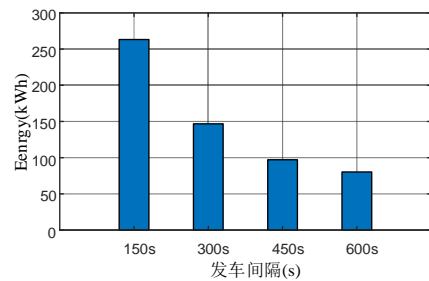


图 4 不同发车间隔下的剩余再生制动能量大小

Fig.4 The regenerative braking energy at different departure intervals

在相同发车间隔下，线路中同时运行的列车数量一定，考虑到列车运行时牵引或制动过程的不连续性，线路上列车运行工况也在发生变化，因此储能装置每次所要回收的剩余再生制动能量也不同。

图 5 是列车在不同发车间隔下储能装置所要回收的剩余再生制动能量的分布。可以看出。在不同发车间隔下储能装置每次需要回收的再生制动能量的分布情况也各不相同。

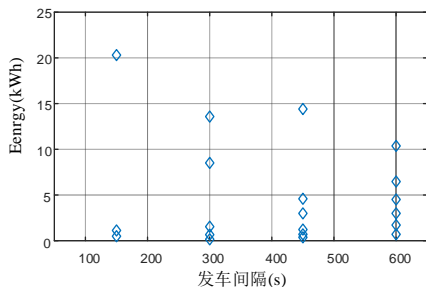


图5 剩余再生制动能量分布

Fig.5 Regenerative braking energy distribution

根据列车运行状态和剩余再生制动能量的分布情况，将列车运行工况分为两类，图6为列车工况示意图，横轴上方下方分别为列车典型的牵引、制动功率曲线。列车工况一为牵引制动交替工况，此时储能装置所需要回收的剩余再生制动能量即为列车制动能量，制动列车较多时，剩余再生制动能量较大，制动列车较少时，剩余再生制动能量较小。列车工况二为牵引制动重叠工况，列车牵引和制动重叠的时间较长时，剩余再生制动能量较大，列车牵引和制动重叠的时间越短时，剩余再生制动能量较小。

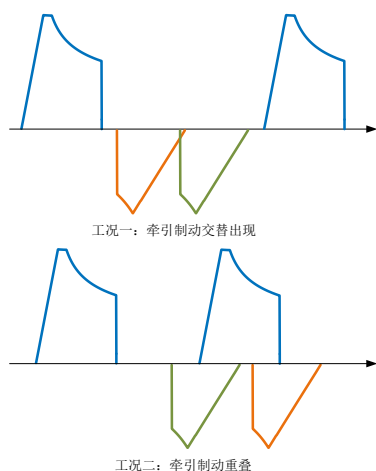


图6 列车运行工况示意图

Fig.6 Train operation diagram

1.3 城轨储能形式对比

目前城市轨道交通能量存储形式应用主要分为三类：超级电容储能、电池储能和飞轮储能。三类储能形式各有独特的优势，本文只针对城轨交通的需求对电池和超级电容进行讨论。

(1) 超级电容储能

超级电容充放电为物理过程，效率高、寿命长。城市轨道交通的牵引制动频繁、再生制动功率大，刚好与超级电容高功率密度、长循环寿命相契合，但是其功率密度低。

(2) 电池储能

锂离子电池近年来发展迅猛，大功率钛酸锂电池相较于其他类型电池能够满足城轨交通需求。电池能量密度较高，虽然功率密度、循环寿命有所提高，但相较于超级电容，循环寿命和功率密度仍然较低。

(3) 混合储能系统

采用单一功率型或能量型储能元件来回收再生制动能量时，为满足功率和能量的双重需求，会导致容量或功率的冗余，成本过高。将超级电容与电池结合，形成的混合储能系统将兼顾功率密度大能量密度高的特点，满足现阶段城轨交通回收再生制动能量和为供电故障列车提供紧急自牵引能量的需求。

2 混合储能系统控制策略分析

在城市轨道交通中，混合储能系统可以回收列车的剩余再生制动能量，稳定电网电压，降低变电站的峰值功率，对列车进行紧急牵引。针对不同的目标，混合储能系统的控制方法也有所不同。另外，牵引供电系统是一个较复杂的系统。列车牵引功率和制动功率的时变性以及列车时刻表的调整，都会影响混合储能系统控制方法的效果。同时，在使用混合储能系统时还应考虑储能装置的使用寿命和经济效益。因此，本节将以北京实际线路数据和 2MW 混合储能系统数据为基础，基于四个评价指标对功率分配策略进行分析。列车经过 5 个车站，如图 1 所示，其中土桥站、梨园站、果园站设有牵引变电所。混合储能系统的参数如表 1 所示。

表 1 混合储能系统的参数

Tab.1 Hybrid energy storage system parameters

储能元件	额定电压	i_{max}	容值	容量
电池	672V	640A	-	160Ah
超级电容	634.4V	3200A	188.6F	-

2.1 地面式混合储能系统控制策略

混合储能装置的充放电控制采用分段控制方式。根据空载电压的变化，将直流网络电压分为三段，并在不同的电压段采用不同的工作方式，如图 7 所示。该混合储能系统对直流网络电压单元进行实时监测。当高于充电阈值 U_{cha} 时，混合储能系统处于充电模式。当低于排放阈值 U_{dis} 时，混合储能系统处于排放状态。当处于充放电阈值之间时，混合储能系统处于待机状态，不充放电。

两个储能元件的双向 DC-DC 变换器控制采用双环控制，电压外环稳定直流牵引网电压，电流内环调节储能元件的充放电电流，电池超级电容混合储能系统的控制策略，相较于单储能系统增加了功率分配模块，具体结构如图 8 所示。

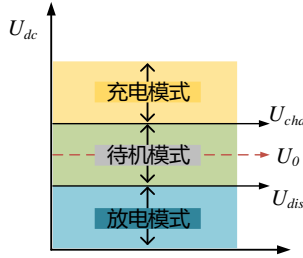


图 7 储能系统分段控制方式

Fig.7 Segmented control mode in charging and discharging process

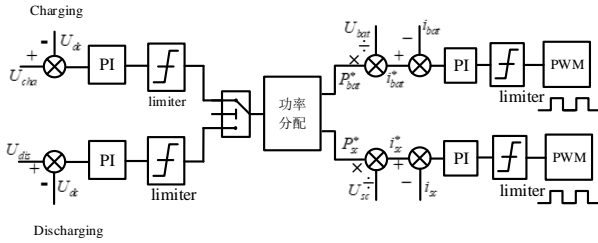


图 8 双环能量管理策略

Fig.8 Double-loop energy management strategy

2.2 两种功率分配策略

在这种控制策略下，两个储能元件的功率分配是一个关键环节。文献[19]中采用两种功率分配模式，即电池优先响应模式和超级电容优先响应模式，如图 9 所示。

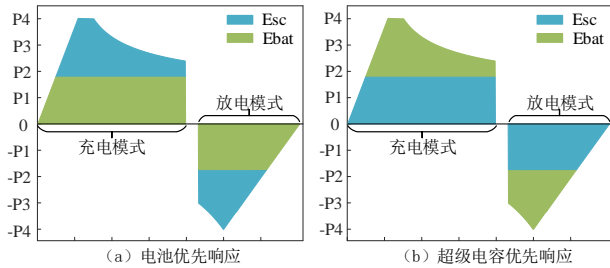


图 9 两种功率分配模式

Fig.9 Two power distribution modes

两种功率分配方法的表达式如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{bat} = P_{load}, P_{sc} = 0 & P_{load} < P_{bat}^{rate} \\ P_{bat} = P_{bat}^{rate}, P_{sc} = P_{load} - P_{bat}^{rate} & P_{bat}^{rate} \leq P_{load} \leq P_{hess}^{rate} \\ P_{bat} = P_{bat}^{rate}, P_{sc} = P_{sc}^{rate} & P_{load} > P_{hess}^{rate} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{bat} = 0, P_{sc} = P_{load} & P_{load} < P_{sc}^{rate} \\ P_{bat} = P_{load} - P_{sc}^{rate}, P_{sc} = P_{sc}^{rate} & P_{sc}^{rate} \leq P_{load} \leq P_{hess}^{rate} \\ P_{bat} = P_{bat}^{rate}, P_{sc} = P_{sc}^{rate} & P_{load} > P_{hess}^{rate} \end{cases} \quad (2)$$

为了分析两种功率分配方式对牵引供电系统和储能装置的影响，引入以下评价指标。

牵引变电所的输出能量 E_{sub}

$$E_{sub} = \sum_{i=1}^3 \int P_{sub,i} dt \quad (3)$$

混合储能系统的充电量 E_{HESS} 和系统节能率 η_{rate} 作为混合储能系统节能效果的评价指标。 E_{HESS} 表示为

$$E_{HESS} = \int P_{HESS} dt, P_{HESS} > 0 \quad (4)$$

η_{rate} 的表达式如式 (5) 所示。

$$\eta_{rate} = \left(1 - \frac{E_{sub} - (E_{hess} - E_{hess_0})}{E_{sub}^{nohess}} \right) \quad (5)$$

其中， E_{sub}^{nohess} 是未安装混合储能装置的牵引变电所输出能量。

另外，超级电容的循环寿命远高于电池，电池的使用寿命决定了混合储能系统的生命周期。功率分配策略会影响电池与超级电容之间的功率分配，从而影响电池寿命。使用电池有效吞吐周期数来评估电池寿命^[22]，如公式 (6) 所示。电荷有效吞吐周期数 N_{eff} 越大，意味着电池 SOC 的变化率越高，会导致电池容量快速退化。

$$N_{eff} = \int |i(t)| dt \cdot \frac{1}{2Q} \quad (6)$$

基于本文的上述内容，在不同的发车间隔对这两种功率分配策略进行仿真。图 10 为两种配电策略下不同发车间隔下对应的四个评价指标的对比图。策略 1 为电池优先响应模式，策略 2 为超级电容优先响应模式。

从图中可以看出，总体上，在不同的出发间隔下，两种功率分配方法的效果有一定的规律性。对比变电站输出能量 E_{sub} 、混合储能系统的充电量 E_{HESS} 和系统节能率 η_{rate} ，从节能效果的角度，可以得出电池优先响应模式优于超级电容优先响应模式的结论。造成这一现象的主要原因是超级电容较于电池能量密度低，在部分制动能量较大的列车工况

下的采用超级电容优先响应模式，导致超级电容在列车制动未结束时提前充满，无法响应制动功率，而电池的能量密度高，采用电池优先响应模式，可以吸收更多的再生制动能量。

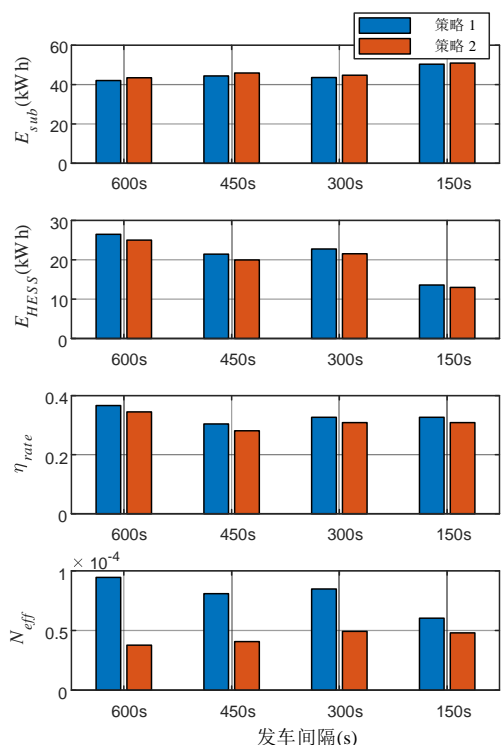


图 10 两种功率分配策略下四个评价指标对比图
Fig.10 Comparison diagram of four evaluation indexes under two power distribution strategies.

从电池寿命角度，由于超级电容优先响应模式优先使用超级电容，电池使用频率相对较低，虽然节能效果较差，但从电荷有效吞吐量 N_{eff} 这一评价指标来看，超级电容优先响应模式优于电池优先响应模式。并且在电池优先响应模式的作用下，虽然再生制动能量吸收良好，但在部分列车工况结束后，超级电容的处于未充满的状态，过度使用电池，超级电容未得到充分利用。

从储能元件的角度看，在两种策略下，超级电容都可以在较短的时间内将回收的再生制动能量全部释放到牵引网上。而由于电池能量密度高，其在短时间内 SOC 变化并不明显。图 11 是不同发车间隔结束后，两种控制策略作用下，电池 SOC 变化量 ΔSOC 。总体上，在一个发车间隔结束后，在策略 1 的作用下，使电池的 SOC 增加，而在策略 2 的作用下，使电池的 SOC 减少。如果使用某一固定的功率分配策略，在多次发车间隔循环的作用下，就会导致电池过充或过放。这不仅会损害电池的使用寿命，而且电池充满后会使得电池退出运行，无法响应

再生制动功率，使得系统节能率降低。

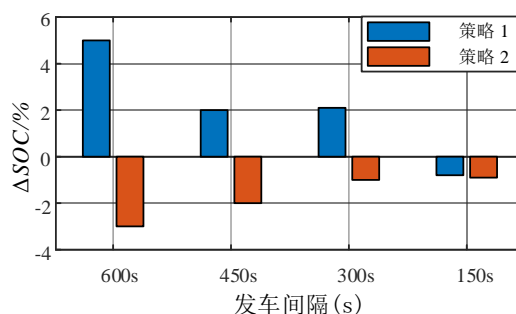


图 11 两种功率分配策略电池 SOC 变化量
Fig.11 The variation of SOC under two power distribution strategies

3 基于列车运行工况的动态比例分配策略

在牵引变电站增设混合储能装置的目的是有效吸收列车剩余再生制动能量，抑制网压波动，防止再生失效。目前研发的地面混合储能装置已经实现车地通信，储能装置能够实时获得列车运行信息。针对获取的列车运行信息，基于前两节对列车运行工况和功率分配策略的分析，本文提出基于列车运行工况的动态比例分配策略，根据线上列车的运行状态判断列车运行工况，针对不同列车运行工况下剩余再生再生制动能量的情况，调整电池/超级电容充电时的功率分配比例，实现剩余再生制动能量吸收的同时，尽可能降低电池的使用，延长混合储能装置寿命，并且根据电池 SOC 动态调整电池/超级电容放电时的功率分配比例，防止电池过充、过放，提高混合储能装置的整体经济效益。整体程序控制框图如图 12 所示。

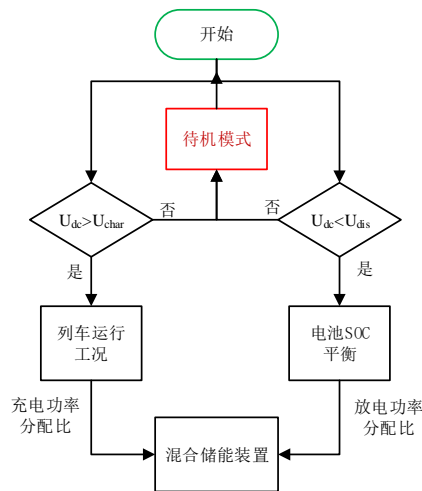


图 12 动态功率比例分配策略控制框图
Fig.12 Control block diagram of dynamic power proportional distribution strategy

在提出控制策略之前,首先定义功率分配比 p , 如式 7 所示, 在某一充电或放电过程中功率分配比保持不变, 功率分配方式如表 2 所示。图 13 为不同功率分配比例下, 混合储能系统功率分配示意图。

$$p = P_{bat} / P_{load} \quad (7)$$

表 2 功率分配方式

Tab.2 Power distribution method

判定条件	控制方式
$P_{load} \geq P_{bat}^{rate} + P_{sc}^{rate}$	$P_{bat} = P_{bat}^{rate}$ $P_{sc} = P_{sc}^{rate}$
$P_{load} < P_{bat}^{rate} + P_{sc}^{rate} \wedge P_{bat}^{rate} < P_{load} \cdot p$	$P_{bat} = P_{bat}^{rate}$ $P_{sc} = P_{load} - P_{bat}^{rate}$
$P_{hess} < P_{bat}^{rate} + P_{sc}^{rate} \vee P_{bat}^{rate} > P_{hess} \cdot p$	$P_{bat} = P_{hess} \cdot p$ $P_{sc} = P_{hess} \cdot (1 - p)$

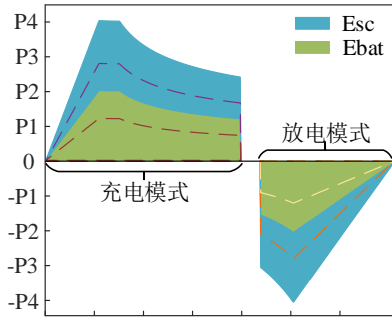


图 13 动态功率比例分配策略示意图

Fig.13 Schematic diagram of dynamic power proportional distribution strategy

混合储能系统的整体控制分为两部分: 基于列车运行工况的充电功率比例控制、基于电池 SOC 平衡的放电功率比例控制。接下来将重点针对这两部分进行详细介绍。

3.1 基于列车运行工况的充电功率比例控制

根据第一节对剩余再生制动能量和列车运行工况的分析可知两类列车运行工况下剩余再生制动能量的规律, 针对两类列车运行工况采用不同的功率分配方式。

1) 牵引制动交替工况

在此工况下储能装置所需要回收的剩余再生制动能量即为列车制动能量, 制动列车较多时, 剩余再生制动能量较大, 制动列车较少时, 剩余再生制动能量较小。

特性互补的超级电容与电池两者在混合储能系统工作中, 电池能量密度高, 在单次充电过程中 SOC 变化较小, 超级电容能量密度低, 单次充电过程中 SOC 变化较大。因此, 在计算功率分配比时以混合储能装置中超级电容可吸收能量值 E_{sc} 为准, 在保证列车再生制动能量完全被吸收的情况下, 尽可能利用超级电容的容量, 避免出现制动能量小而超级电容利用不充分, 过度使用电池的情况。功率分配比的计算如式 8 所示。

$$\begin{cases} p = 0 & E_{reg} < E_{sc} \\ p = 1 - \frac{E_{sc}}{E_{reg}} & E_{HESS} < E_{reg} < E_{sc} \\ p = 1 & E_{reg} > E_{HESS} \end{cases} \quad (8)$$

其中, E_{reg} 为列车再生制动能量, E_{HESS} 为混合储能系统以额定功率充电超级电容充满时混合储能装置吸收的能量, E_{sc} 为充电开始时超级电容可吸收能量值。

2) 牵引制动重叠工况

此工况下, 线上列车的再生制动能量, 一部分被牵引列车吸收, 剩余的再生制动能量被储能装置吸收。剩余再生制动能量的大小与列车牵引和制动重叠的时间、牵引列车的数量和制动列车数量有关, 因此无法直接获取该工况下的再生制动能量的大小。该工况下, 会在最初通过离线方式获取相应的剩余再生制动能量。为延长储能装置使用寿命的同时, 减小选取功率分配比的复杂性, 功率分配比的计算如式 9 所示。

$$\begin{cases} p = 0 & E_{reg} < E_{sc} \\ p = 1 & E_{reg} > E_{sc} \end{cases} \quad (9)$$

当此时工况下的剩余再生制动能量 E_{reg} 小于超级电容可吸收能量值 E_{sc} , 功率分配比 $p=0$ 。当此时工况下的剩余再生制动能量 E_{reg} 大于超级电容可吸收能量值 E_{sc} , 功率分配比 $p=1$ 。

3.2 基于电池 SOC 平衡的放电功率比例控制

由于超级电容和电池两种储能元件的特性不同, 在城轨交通系统的应用中, 混合储能系统采用某一固定的功率分配模式, 在长时间的作用下, 会使得电池过充或者过放, 影响节能效果和装置寿命。因此, 在此基础上, 提出了一种电池 SOC 平衡的放电功率分配比的动态调整方法, 如图 14 所示。通过设置电池 SOC 的参考值 SOC_{ref} 、电池 SOC 的调整区间 SOC_0 和 SOC_1 , 在混合储能装置放电时, 根据电池此时的 SOC, 限制功率分配比, 达到约束电池 SOC 的目的。具体公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} p = 1 & soc > soc_1 \\ p = \frac{soc - soc_0}{soc_0 - soc_1} & soc_0 < soc < soc_1 \\ p = 0 & soc < soc_0 \end{cases} \quad (10)$$

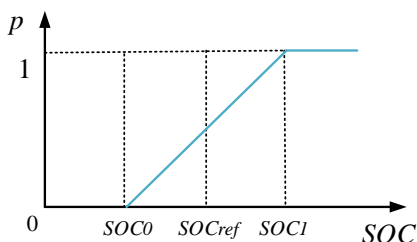


图 14 放电功率比动态调整示意图

Fig.14 Dynamic adjustment diagram of discharge power distribution ratio

3.3 控制策略效果对比

基于北京地铁实际线路数据，建立了包含 3 个牵引变电所和 1 个混合储能装置的仿真模型，如图 15 所示。混合储能装置参数设置如表 1 所示。模型仿真参数如表 3 所示，3 个牵引变电所的空载网压为 836V，混合储能装置的充电阈值为 850V，放电阈值为 810V，选择 600s、300s 这两个典型发车间隔，进行控制策略的分析验证。在充放电过程中，电池 SOC 的调整区间设置为 0.55-0.65，超级电容的使用范围时 0.3-0.9^[23]。

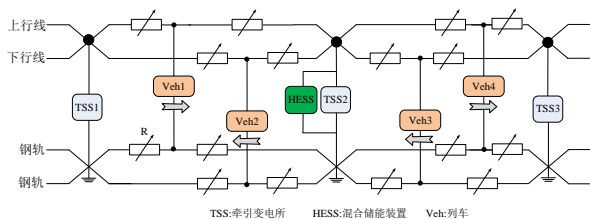


图 15 仿真模型示意图

Fig.15 Simulation model diagram

表 3 仿真参数

Tab.3 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
空载电压/V	836	SOC_{ref}	0.6
充电阈值/V	850	SOC_0	0.55
放电阈值/V	810	SOC_1	0.65

在两种典型的发车间隔下对本文提出的控制策略以及电池优先响应、超级电容优先响应分别仿真。发车间隔为 600s 和 300s 下，不同控制策略的牵引网网压 U_{dc} 、电池 SOC SOC_{bat} 和超级电容 SOC SOC_{sc}

仿真结果如图 16、图 17 所示。表 4 和图 18 为三种控制策略下四个评价指标的对比结果。

由图 16 可以看出，在 600s 发车间隔下，采用超级电容优先响应策略，混合储能装置在 520s-600s 期间，由于超级电容在列车制动前提前充满，无法响应再生制动功率，导致牵引网网压攀升，车载制动电阻启动。采用电池优先响应策略，虽然有效的回收了再生制动能量，但是在列车制动结束后，超级电的 SOC 为 0.78，显然没有充分利用超级电容的容量。在动态比例策略下，在充分吸收再生制动能量的同时，充分利用超级电容的容量，列车制动结束后，超级电容的 SOC 在 0.9 附近，而且牵引网网压稳定在 900V 以下。从表 4 的仿真结果对比可以看出，在整个发车间隔时间内，动态比例控制策略相较于超级电容优先响应策略，变电所输出能量 E_{sub} 减少 1.64kWh，混合储能装置充电量 E_{HESS} 多吸收 1.54kWh，节能率 η_{rate} 提高 2.3%；相较于电池优先响应策略，变电所输出能量 E_{sub} 、混合储能装置充电量 E_{HESS} 、节能率 η_{rate} 几乎相同，且在电池寿命指标 N_{eff} 上提高了 56.5%。

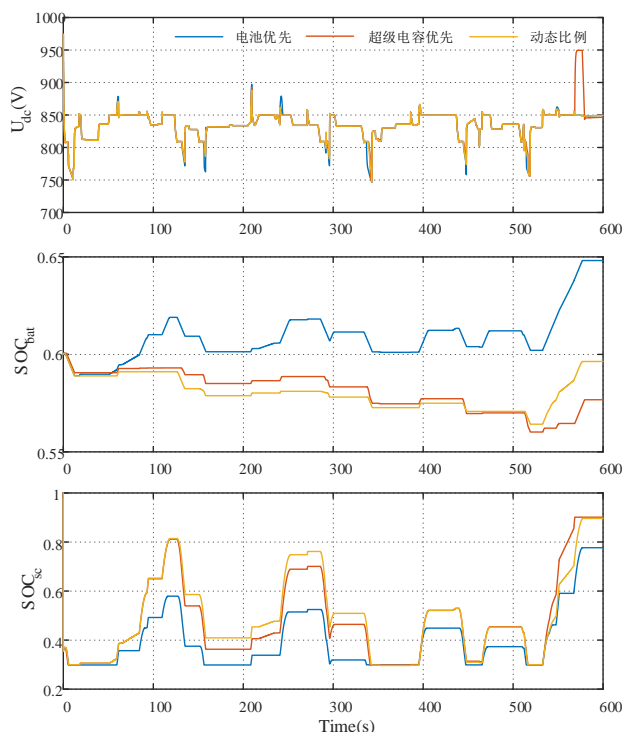


图 16 600s 下控制策略仿真结果

Fig.16 Simulation results of control strategy under 600s

图 17 为发车间隔 300s 下三种控制方式，可以得到与 600s 发车间隔下类似的结论，只是在 225s-270s 之间，由于处于多列车制动的工况，列车的再生制动能量 E_{reg} 大于 E_{HESS} ，在动态比例控制策

略下，此期间功率比例 $p=1$ ，当超级电容充满无法响应制动功率时，导致了牵引网网压攀升。从表 4 的仿真结果对比可以看出，在整个 300s 发车间隔时间内，动态比例控制策略相较于超级电容优先响应策略，变电所输出能量 E_{sub} 减少 1.16kWh，混合储能装置充电量 E_{HESS} 多吸收 1.21kWh，节能率 η_{rate} 提高 1.8%；相较于电池优先响应策略，变电所输出能量 E_{sub} 、混合储能装置充电量 E_{HESS} 、节能率 η_{rate} 几乎相同，并在电池寿命指标 N_{eff} 上提高了 29.2%。

从图 16、图 17 中的电池 SOC SOC_{bat} 的变化中可以看出，在仿真结束后，动态比例控制策略相较于其他两种控制策略，可以有效的约束电池 SOC 的变化，使得电池在长期运行中不会出现过充过放的情况。

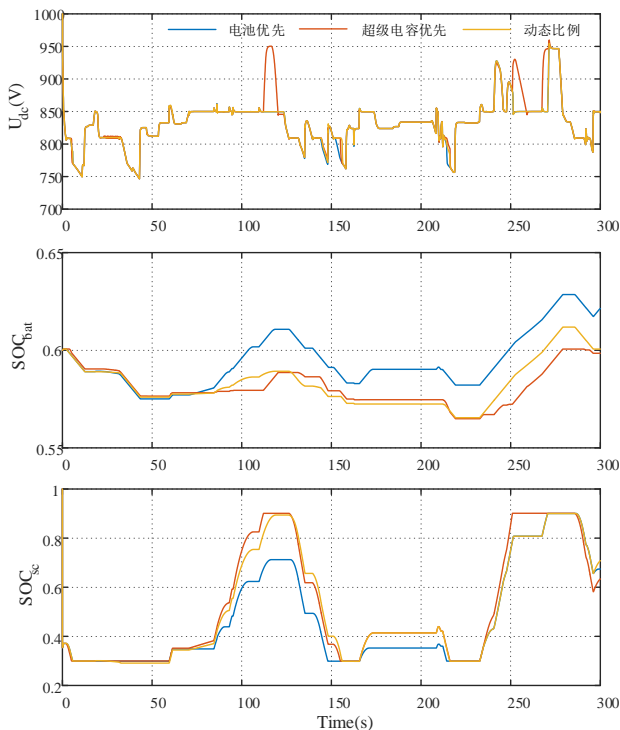


图 17 300s 下控制策略仿真结果

Fig.17 Simulation results of control strategy under 300s

表 4 仿真结果对比

Tab.4 Comparison of simulation results

发车间隔	策略	E_{sub}	E_{HESS}	η_{rate}	N_{eff}
600s	动态比例	41.98	26.54	36.8%	4.11E-05
	电池优先	42.07	26.49	36.7%	9.45E-05
	电容优先	43.49	25.0	34.5%	3.77E-05
300s	动态比例	43.62	22.75	32.7%	6.00E-05
	电池优先	43.62	22.75	32.7%	8.48E-05
	电容优先	44.78	21.54	30.9%	4.93E-05

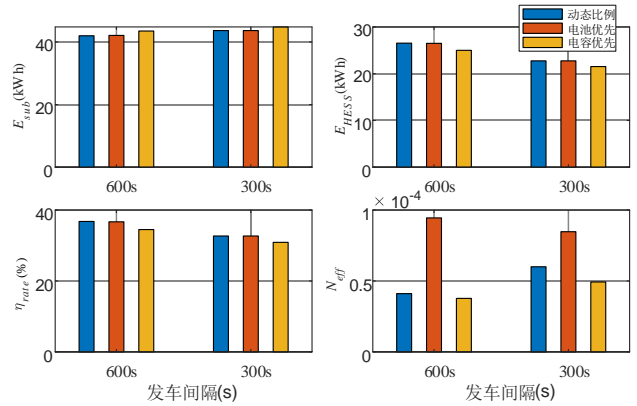


图 18 四种指标下仿真结果对比

Fig.18 Comparison of simulation results under four indexes

4 结论

本文考虑电池和超级电容两种储能元素的特性，结合剩余再生制能量与列车运行工况的特点，并针对单一控制策略的缺点，提出基于列车运行工况的动态比例分配策略。通过建模并仿真分析，动态调整电池和超级电容的功率分配比例，节能效果上，相较于超级电容优先响应策略，在两种典型发车间隔下，节能率分别提升 2.3% 和 1.8%，装置使用寿命上，相较于电池优先响应策略，在两种典型发车间隔下，电池寿命指标分别提高 56.5% 和 29.2%，并且能够很好的约束电池的 SOC，整体提高了混合储能系统的工作性能和经济效益。后续，将根据本文所提控制策略，结合混合储能系统的容量配置，对两者进行协同优化，进一步提高混合储能系统的效益。

致谢

论文中电池相关参数来自日本东芝的钛酸锂电池，感谢日本东芝基础设施系统株式会社在电池方面的技术支持。

参考文献

- [1] 胡鹏. 城市轨道交通列车运行能耗优化及仿真[D]. 西南交通大学, 2013.
- [2] 朱宇婷. 考虑乘客出行效率的城市轨道交通列车开行方案优化研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [3] 耿连松. 城市轨道交通多交路设置方法研究[D]. 北京交通大学, 2015.
- [4] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计和分析报告.

- [5] 杨中平.新干线纵横谈[M].中国铁道出版社, 2012.
- [6] David R, Alvaro J. L, Ramon R. P, et al. Analysis of the demand charge in DC railway systems and reduction of its economic impact with energy storage systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2017,93(1):459-467.
- [7] Buchroithner A, Andrašec I, Bader M. Optimal system design and ideal application of flywheel energy storage systems for vehicles[C]. Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International, 2012: 991-996.
- [8] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems characteristics and comparisons[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1221-1250.
- [9] 诸斐琴, 杨中平, 林飞, 等. 基于加速时间预测的现代有轨电车储能系统能量管理与容量配置优化研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 158-166.
Zhu Feiqin, Yang Zhongping, Lin Fei, et al. Research on energy management and capacity allocation optimization of modern tram energy storage system based on acceleration time prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(23): 158-166.
- [10] 郭伟, 赵洪山.基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J].电工技术学报,2020,35(05):1140-1151.
Guo Wei, Zhao Hongshan. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(05):1140-1151.
- [11] Rui Xiong, Huan Chen, Chun Wang, et al. Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - a critical review on topology and energy management[J]. Journal of Cleaner Production,2018,202(20):1228-1240.
- [12] Shen Junyi, Khaligh A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3):223-231.
- [13] Yin He, Zhao Chen, Li Mian, et al. Utility function-based real-time control of a battery ultracapacitor hybrid energy system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1):220-231.
- [14] 夏欢, 杨中平, 李旭阳, 等. 基于动态阈值控制策略的城轨超级电容储能系统寿命优化研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(9):23-30.
Xia Huan, Yang Zhongping, Li Xuyang, et al. Research on life optimization of supercapacitor energy storage system in urban rail based on dynamic[J]. Journal of the China Railway Society, 2016,38(9):23-30.
- [15] 赵亚杰, 夏欢, 王俊兴, 等. 基于动态阈值调节的城轨交通超级电容储能系统控制策略研[J]. 电工技术学报, 2015,30(14):427-433.
Zhao Yajie, Xia Huan, Wang Junxing, et al. Research on control strategy of urban rail transit supercapacitor energy storage system based on dynamic threshold adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(14):427-433.
- [16] 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(03):579-588.
Zhu Feiqin, Yang Zhongping, Lin Fei, et al. Synthetic optimization of traction power parameters and energy storage systems in urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(03): 579-588.
- [17] 林仕立, 宋文吉, 冯自平, 等. 地铁混合储能系统及其功率动态分配控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 19-24.
Lin Shili, Song Wenji, Feng Ziping, et al. Metro hybrid energy storage system and its power dynamic distribution control method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 19-24.
- [18] Liu Ran, Xu Lie, Liu Feipeng, et al. A novel architecture of urban rail transit based on hybrid energy storage systems using droop control[C]//2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference(ESARS-ITEC), Nottingham, 2018, DOI:10. 1109/ESARS-ITEC.2018. 8607728.
- [19] 秦强强, 张骄, 李宇杰, 等. 基于列车运行状态的城轨地面混合储能装置分时段控制策略[J]. 电工技

- 术学报,2019,34(S2):760-769.
- Qin Qiangqiang, Zhang Jiao, Li Yujie, et al. Research on time-phased control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(S2):760-769.
- [20] 陈亚爱,林演康,王赛,等.基于滤波分配法的混合储能优化控制策略[J].电工技术学报,2020,35(19):4009-4018.
- Chen Yaai, Lin Yankang, Wang Sai, et al. Optimal control strategy of hybrid energy storage based on filter allocation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(19):4009-4018.
- [21] 秦强强,郭婷婷,林飞,等.基于能量转移的城轨交通电池储能系统能量管理和容量配置优化[J].电工技术学报,2019,34(S1):414-423.
- Qin Qiangqiang, Guo Tingting, Lin Fei, et al. Optimal research for energy management and configuration of battery ESS in urban rail transit based on energy transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(S1):414-423.
- [22] Kim Y, Raghunathan V, Raghunathan A. Design and management of battery-supercapacitor hybrid electrical energy storage systems for regulation services[J]. IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems. 2017,3(1):12-24.
- [23] Rufer A, Hotellier D, Barrade P. A supercapacitor based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 19(2): 629-636.

作者简介

杨浩丰 男, 1995 年生, 硕士, 研究方向为城市轨道交通储能技术。

E-mail: 18121521@bjtu.edu.cn

林飞 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动、节能、高速列车系统优化设计等。

E-mail: flin@bjtu.edu.cn (通信作者)