

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180552

有轨电车混合动力系统能量交互型 管理策略与容量配置协同优化研究

王 琦 杨中平 李 峰 安星锴 林 飞

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 能量管理策略和容量配置是有轨电车混合储能动力系统设计的关键环节,其结果直接影响有轨电车的运行性能和经济效益。本文提出一种改进后带有能量交互状态的能量管理策略,根据实际车辆与线路要求,以重量最轻为优化目标进行容量配置优化,对比说明改进策略中电池与超级电容能量交互的优越性,并在实验平台上进行验证。仿真和实验表明,改进后的能量管理策略减轻了储能系统的重量,使储能系统在极端情况下能够正常运行。

关键词: 有轨电车 混合储能 能量管理 容量配置

中图分类号: TM921

Energy Management Strategy with Energy Interaction and Configuration Optimization for the Tram's Hybrid Storage System

Wang Yu Yang Zhongping Li Feng An Xingkun Lin Fei

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

Abstract Energy management strategy and sizing are the key steps of the design of tram's power system, and the results directly affect the operation characteristics and economic benefits. This paper proposes an improved energy management strategy with special state. Based on the fixed energy management strategy, a collaborative optimization of sizing with the requirement of tram and line data is carried out. The advantages are verified on the experimental platform. Simulation and experiment results indicate that the energy management strategy with special state reduces the sizing weight and guarantees the normal operation of tram in extreme cases.

Keywords: Tram, hybrid storage system, energy management strategy, sizing

0 引言

现代有轨电车作为一种新兴的交通工具,具有客运量大、环保节能、造价相对低廉等优点,适合在中等城市推广使用。近年来,随着清洁能源政策的推行以及对交通运输工具安全性、美观性的需求,储能式有轨电车开始出现并被广泛地研究。储能式

有轨电车在运行过程中需同时满足大功率和较高的能耗需求,储能元件中,虽然电池能量密度较大,但功率密度相对较小^[1];超级电容有较高的功率密度,但能量密度相对较小。为提升有轨电车的动力性能,以电池和超级电容混合储能作为有轨电车的动力系统,已成为热门研究方向。

能量管理策略决定了有轨电车混合储能系统的工作性能,合适的能量管理策略不仅能使有轨电车安全平稳地运行,而且能够减少电损耗,降低运营成本。能量管理策略根据实时性分为在线策略和离线策略两种。常用的在线能量管理策略有基于规则

中央高校基本科研业务费专项资金(2018YJS153),国家重点研发计划(“十三五”计划)(2017YFB1201105)资助项目。

收稿日期 2018-04-14 改稿日期 2018-05-14

的固定阈值管理策略^[2-5]、滤波功率分配策略^[6-10]和基于模糊控制规则的能量管理策略^[11-13]等，这些策略的特点是规则简单、易于实现，但动态性差，不能根据需求随时调整，且规则需要基于一定的经验来制定；离线策略如基于动态规划的能量管理策略^[14]，虽然可以得到全局最优解，但是使用时限制较多，难以在实际运行中应用。电池与超级电容的容量配置与能量管理策略相互影响又相互制约。容量配置方案决定了储能系统的能量配比和系统的总体质量，对有轨电车的经济性等有决定性影响。

本文在按固定比例分配功率的能量管理策略基础上进行了改进，加入了电池主动状态下储能系统间的能量交互，在改进策略的基础上对储能系统的容量配置进行协同优化，并通过实验对比证明了改进后能量管理策略的优越性。

本文首先介绍了混合储能系统的构成及改进的能量管理策略；然后描述了在该能量管理策略下与容量配置进行协同优化的详细过程；最后基于有轨电车线路进行实际功率分配与容量配置，在实验平台上进行了小功率验证。

1 能量管理策略

有轨电车储能系统由电池和超级电容两部分组成，它们通过接收控制信号进行相应充放电，为电车牵引和辅助系统供电，并吸收再生制动能量。为使电池和超级电容能够快速响应，该有轨电车中采用电池与超级电容分别通过 DC-DC 变流器并联直流母线的拓扑结构，如图 1 所示。

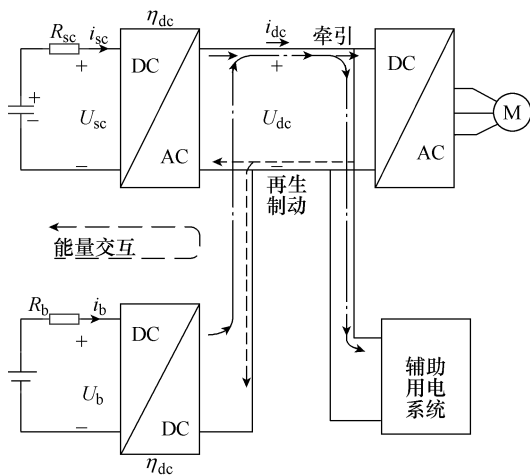


图 1 混合动力系统拓扑结构

Fig.1 Topology of hybrid power system

分析可得储能系统牵引时的功率损耗、效率和能量损耗为

$$P_{\text{loss}}(t) = \begin{cases} P_{\text{req}}(t) \left(\frac{1}{\eta_{\text{dc}}} - 1 \right) + P_{\text{rloss}}(t) & P_{\text{req}}(t) \geq 0 \\ P_{\text{req}}(t) (\eta_{\text{dc}} - 1) + P_{\text{rloss}}(t) & P_{\text{req}}(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{\text{rloss}}(t) = I_{\text{b}}^2(t)R_{\text{b}} + I_{\text{sc}}^2(t)R_{\text{sc}} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{HEV}}(t) = 1 - \frac{P_{\text{loss}}(t)}{P_{\text{req}}(t) + P_{\text{loss}}(t)} \quad (3)$$

$$E_{\text{loss}}(t) = \int P_{\text{loss}}(t)dt \quad (4)$$

式中， P_{loss} 为功率损耗； η_{dc} 为 DC-DC 变换器的效率； P_{rloss} 为储能器件内部损耗； R_{b} 为电池内阻； R_{sc} 为超级电容内阻； I_{b} 、 I_{sc} 分别电池端电流和超级电容端电流； P_{req} 为母线端需求功率； η_{HEV} 为储能系统效率； E_{loss} 为能量损耗。

为了发挥电池能量密度高与超级电容功率密度高的特点，在实际工况中使用超级电容提供峰值牵引功率并吸收峰值再生制动功率，使用电池提供相对较低的功率输出并吸收一部分再生制动能量。

固定功率比例分配的能量管理策略即负载功率在动态变化的同时，电池和超级电容分别提供的功率占总功率需求的比例不变。为了简单表示固定比例的分配策略，此处忽略充放电效率的不同，电池与超级电容功率的表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{b}}(t) = P_{\text{req}}(t)p_{\text{b}} \\ P_{\text{sc}}(t) = P_{\text{req}}(t)p_{\text{sc}} \\ p_{\text{b}} + p_{\text{sc}} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中， P_{b} 、 P_{sc} 分别为电池和超级电容的功率需求； p_{b} 为电池的功率分配比例； p_{sc} 为超级电容的功率分配比例，该能量管理策略下的功率分配如图 2 所示。图中任意一段的超级电容提供能量与电池提供能量之比固定。

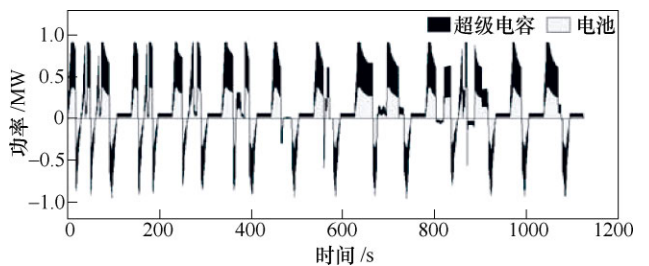


图 2 储能系统功率分配曲线

Fig.2 Power distribution curves of hybrid power system

在有轨电车实际运行过程中，如果采用上述固定功率比例分配策略，当有轨电车在线路运行中能

耗过多或充电站故障等情况造成超级电容荷电状态 (State Of Charge, SOC) 过低影响车辆的牵引时, 储能系统将无法正常工作, 并会造成有轨电车减速或停止运行。为防止这种情况发生, 本文对能量管理策略进行改进, 在列车牵引且超级电容 SOC 低于阈值下限时, 进入电池主动状态, 电池以最大功率放电, 为负载电机提供牵引功率, 若负载的功率需求小于电池能提供的功率, 则进入能量交互状态, 电池使用剩余功率为超级电容充电, 抑制超级电容电压的继续下跌。公式可表示为

$$P_b(t) = P_{bmax}(t) \quad (6)$$

$$P_{sc}(t) = \begin{cases} (P_{req}(t) - P_{bmax}(t)\eta_{dc})\eta_{dc} & P_{req}(t) \geq P_{bmax}(t) \\ \frac{P_{req}(t) - P_{bmax}(t)\eta_{dc}}{\eta_{dc}} & P_{req}(t) < P_{bmax}(t) \end{cases} \quad (7)$$

牵引时若超级电容的 SOC 低于阈值下限 SOC_{scslow} , 则启动电池主动状态; 当超级电容 SOC 上升至阈值上限 SOC_{schigh} 时, 退出该状态。混合储能系统工作状态的判断及控制策略选择流程如图 3 所示。

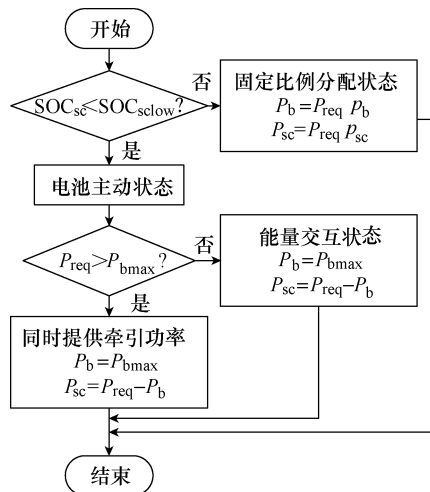


图 3 工作状态及控制策略选择流程

Fig.3 Flow chart of the choice for working condition and control strategy

电池主动状态的设置能够防止由于超级电容 SOC 过低造成的动力不足问题, 缩小超级电容的工作区间, 从而减少储能系统的容量配置。

2 容量配置方案

2.1 条件分析

容量配置方案是在基于确定的能量管理策略下进行的^[15]。在确定电池与超级电容系统的容量与配比时需要综合考虑储能系统性能与线路和车辆的实

际需求。电池与超级电容的等效模型如图 1 所示^[16]。电池的电流公式为

$$i_b(t) = \frac{U_b(t) - \sqrt{U_b(t)^2 - 4R_b P_b(t)}}{2R_b} \quad (8)$$

式中, U_b 为电池端电压。为使该式有意义, 需满足约束条件

$$U_b(t)^2 - 4R_b P_b(t) > 0 \quad (9)$$

同理可得超级电容电流所致相应约束条件为

$$U_{sc}(t)^2 - 4R_{sc} P_{sc}(t) > 0 \quad (10)$$

式中, U_{sc} 为超级电容端电压。

为了满足全程的运行工况, 电池与超级电容的实时功率需要满足动力需求, 即

$$P_b(t) + P_{sc}(t) \geq P_{req}(t) + P_{loss}(t) \quad (11)$$

式中, P_{loss} 为储能系统的损耗功率。在有轨电车运行过程中, 部分车站装有充电装置, 为储能系统补充能量。因此, 有轨电车在运行过程中的能量需求为储能系统在始发站所带的初始能量与充电站补给能量之和所提供。即需要满足

$$E_b + E_{sc} + E_{char} \geq E_{req} + E_{loss} \quad (12)$$

式中, E_b 、 E_{sc} 、 E_{char} 、 E_{req} 、 E_{loss} 分别为电池初始能量、超级电容初始能量、充电站充电总能量、总能量需求、能量损耗。

由于储能系统安装在有轨电车上, 其重量受到严格的限制。限制公式为

$$M_b + M_{sc} \leq M_{lim} \quad (13)$$

式中, M_b 、 M_{sc} 为电池、超级电容的重量; M_{lim} 为混合储能系统最大质量限值。

出于成本和维护的考虑, 电池更换次数不能过于频繁。这就要求电池的寿命要尽可能长, 满足有轨电车的运行需求, 降低维护成本。该限制条件直接影响了电池在整个储能系统中出力的比例。同时, 为了提升储能元件的使用寿命, 需要使其工作在合适的 SOC 范围内, 充放电深度不宜过大, 电池和超级电容的 SOC 限制公式为

$$\begin{cases} SOC_{bmin} \leq SOC_b(t) \leq SOC_{bmax} \\ SOC_{scmin} \leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{scmax} \end{cases} \quad (14)$$

式中, SOC_{bmax} 、 SOC_{bmin} 分别为电池的最大、最小 SOC 限值; SOC_{scmax} 、 SOC_{scmin} 分别为超级电容的最

大、最小 SOC 限值。

2.2 寻优过程

容量配置与能量管理策略相互影响。合适的能量管理策略能够提高储能系统的效率，并影响容量配置结果。为了验证改进策略比普通比例法更有优势，本次优化以储能系统的重量最轻为目标进行容量配置优化。

优化变量为电池的串并联数和超级电容的串并联数，通过变量的寻优得到质量最小的储能系统。确定一组优化变量参数后，该储能系统能量、功率等参数和工作状态都已经确定。

目标函数

$$\min F(N_{bs}, N_{bp}, N_{scs}, N_{scp}) = m_b N_{bs} g N_{bp} + m_{sc} N_{scs} g N_{scp} \quad (15)$$

式中， N_{bs} 、 N_{bp} 和 N_{scs} 、 N_{scp} 分别为电池和超级电容的串、并联数； m_b 、 m_{sc} 分别为电池和超级电容的单体重量。

本文选用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法进行串并联数的寻优。PSO 算法构建不同速度和位置量的粒子群，并通过粒子群的迭代更新来改变速度和位置，在不断的迭代过程中对比粒子搜寻到最优值以找到目标函数的最优值。粒子的速度和位置迭代公式为

$$\begin{cases} v_i(k+1) = v_i(k) + c_1 r_1 (p_i(k) - x_i(k)) + \\ \quad c_2 r_2 (p_g(k) - x_i(k)) \\ x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \end{cases} \quad (16)$$

式中， v_i 为串并联数所构成的四维空间中的第 i 个粒子的速度； p_i 为该粒子经历的历史最好位置； x_i 为该粒子的位置； p_g 为粒子群体经历的最好位置； c_1 、 r_1 、 c_2 、 r_2 为算法参数。

容量配置软件分为两部分，主程序是通过 PSO 算法在选定的取值范围内对变量进行筛选和寻优。主程序迭代所产生的每组变量均会进入子程序进行在该组动态功率分配比例的能量管理策略以及储能系统容量的条件下进行的实时运行仿真，满足限制条件的配置保留，并进行下一步迭代；不满足条件的配置赋最小适应度值并剔除^[17]。软件工作步骤如图 4 所示。

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真分析

本文选用某地有轨电车线为研究对象。该线路

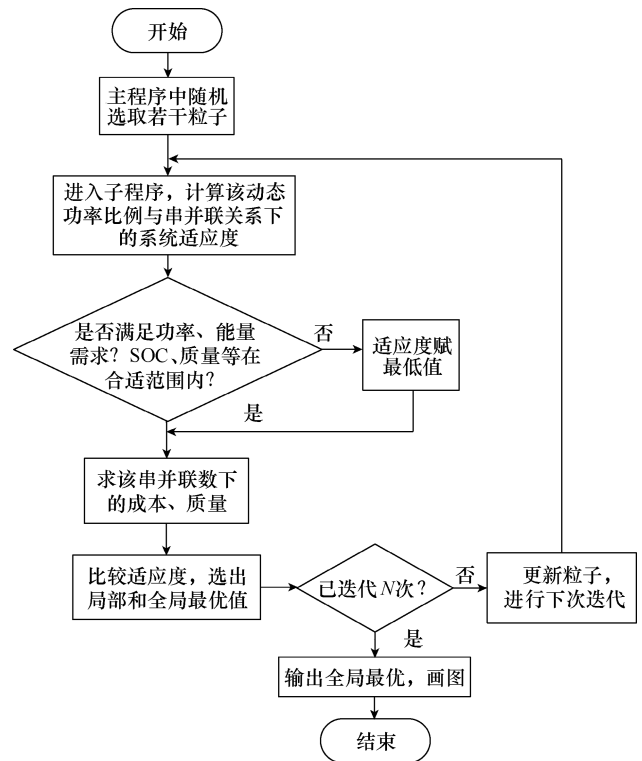


图 4 容量配置优化流程

Fig.4 Flow chart of sizing optimization

每天在线路上往返 20 次，主要的车辆与线路参数见表 1。中间站充电站充电时间为 20s，充电时母线端以 100A 恒流充电，电池、超级电容按照运行时的固定功率比例进行充电。

表 1 车辆与线路参数

Tab.1 Parameters of vehicle and line	
参 数	数值 (型号)
编组	2M3T
车重/t	75(AW3)
停车站数	11
充电站数	7
输入电压 (直流) /V	750
线路长度/km	9.44
最高速度/(km/h)	70
平均旅行速度/(km/h)	28

根据车辆条件以及线路条件，经过牵引仿真计算^[18]可得全线的功率曲线如图 5 所示。

对该条件下的混合储能系统进行能量管理策略与容量配置协同优化，优化程序中重要输入参数见表 2。

为证明加入电池主动状态对电池和超级电容的容量造成的影响，分别在加入电池主动状态和固定功率比例的策略下进行容量配置。

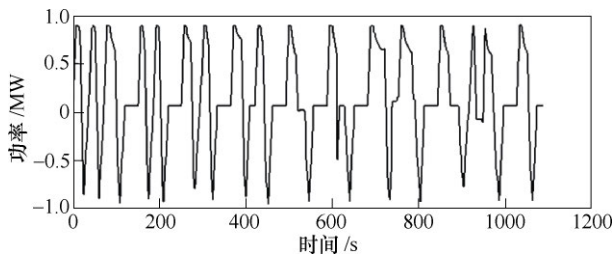


图5 需求功率曲线

Fig.5 Required power curves

表2 容量配置优化程序重要输入参数

Tab.2 Important input parameters of sizing optimization program

参数	数值
p_b	0.3
DC-DC 平均效率(%)	95
电池 SOC _{bmax}	0.8
电池 SOC _{bmin}	0.2
超级电容 SOC _{scmac}	1
超级电容 SOC _{scmin}	0.25
优化迭代次数	30
粒子群数目	500
SOC _{sclow}	0.4
SOC _{schigh}	0.7

本文中的容量配置选用微宏公司的 MV06203127NTP 电池单体和 Maxwell 公司的 BCAP3000 超级电容单体，参数见表3。

表3 电池、超级电容单体参数

Tab.3 Parameters of battery and super capacity cells

参数	数值	
电池	额定电压/V	2.3
	额定容量/(A·h)	10
	内阻/mΩ	1.4
	最大连续电流/A	30(3C)
	单体质量/kg	0.3
	循环寿命/次	10 000
超级电容	额定电压/V	2.7
	额定容量/F	3 000
	内阻/mΩ	0.29
	最大连续电流/A	200
	单体质量/kg	0.51
	循环寿命/次	2 000 000

通过容量配置优化得到的优化结果见表4。表中“普通策略”、“改进策略”两栏分别代表固定功率比例策略和有电池主动状态的改进策略下的容量

表4 容量配置结果

Tab.4 Sizing optimization results

参数名称	普通策略	改进策略
电池数量	202	390
超级电容数量	955	290
总电量/(kW·h)	76	80
总质量/t	5.62	2.33

配置结果。从总重量一栏可以看出，普通策略下的容量配置比改进策略下的重量增加了1.4倍，但是总储能变化不大，主要由于超级电容能量密度过低，导致超级电容多的配置重量变大。改进策略中电池能够为超级电容提供能量交互，缩小了超级电容的SOC工作范围，进而可以减少配置。同时，改进策略下的电池配置比普通策略下的多了接近一半，这是因为在改进策略下电池输出的总能量增加，既要提供牵引能量，又要为超级电容补充能量。但由于电池的能量密度比超级电容高，所以电池的重量增加不大。

经过容量配置优化后的混合储能系统在图5所示的负载功率需求下，电池和超级电容的功率分配曲线如图6所示。

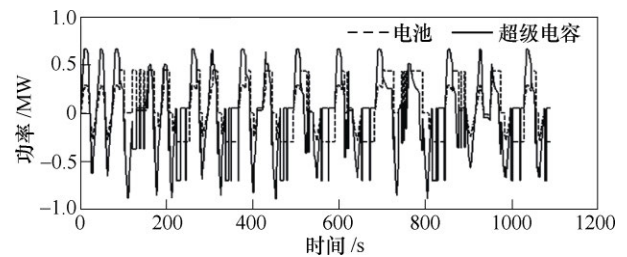


图6 功率分配曲线

Fig.6 Power distribution curves

由图6可得，混合储能系统在制动状态及大部分牵引状态下通过电池、超级电容功率比例为3:7的固定比例分配策略进行功率分配，而在超级电容SOC不足的牵引状态下，电池牵引功率升高，超级电容在总牵引需求低的情况下利用电池提供的功率进行充电。电池、超级电容在系统运行全过程中功率之和等于负载功率，证明储能系统能够完全提供牵引能量并吸收再生制动能量，满足有轨电车的运行需求，即改进的能量管理策略在优化的容量配置下能够正常工作。

3.2 实验验证

为验证改进策略的优越性，在90kW电池-超级电容混合储能系统实验平台上进行了改进策略和普通策略的对比实验，实验平台如图7所示。储能系

统的参数见表 5。

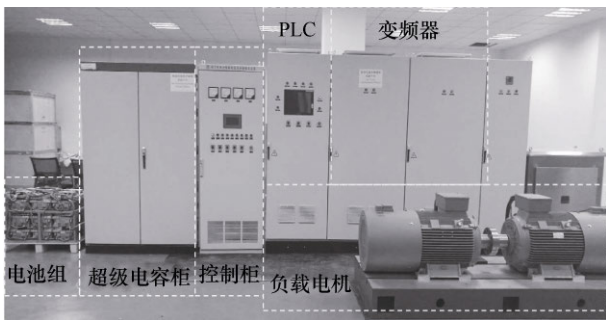


图 7 90kW 混合储能系统实验平台

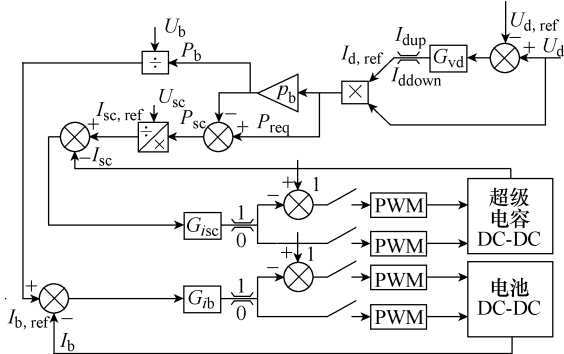
Fig.7 90kW hybrid power experiment platform

表 5 实验平台储能系统参数

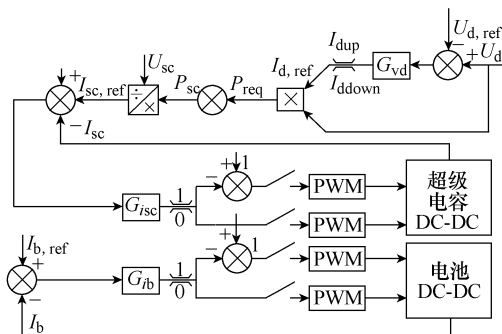
Tab.5 Parameters of experiment platform

参数名称	电池系统	超级电容系统
单体型号	MV06203127NTP	BCAP3000
串并联数	216S2P	184S1P
电量/(kW·h)	1.4	0.5
最大连续电流/A	60(3C)	200
端电压/V	496.5	500

实验平台上进行普通策略和改进策略的验证的控制框图如图 8a 和图 8b 所示。在普通策略下，控制策略采用母线电压外环，电池、超级电容电流内



(a) 普通策略下的控制框图



(b) 能量交互状态下的控制框图

图 8 系统控制框图

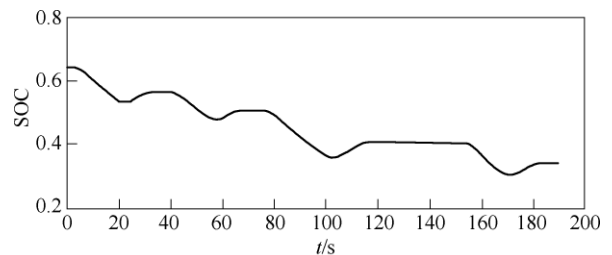
Fig.8 Control block diagrams of system

环的双环控制策略，电压外环输出的电流与母线电压的乘积为需求功率，经过比例分配后作为电流内环的给定，分别作用于电池、超级电容两个电流内环，使储能系统提供相应的电流值。

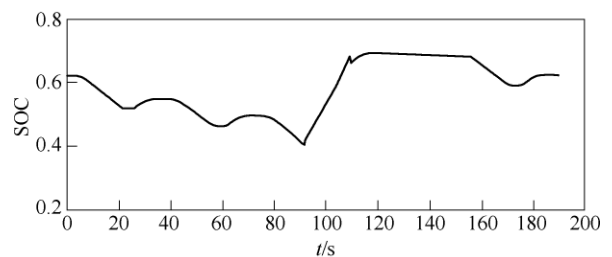
在改进策略中的能量交互状态下使用图 8b 所示的控制策略，此时电池的作用相当于一个恒定的功率源，提供恒流的功率输出，为单电流环控制，而超级电容相当于两个功率源的唯一负载，用于吸收功率源所提供的能量，则超级电容侧仍为电压外环、电流内环的双环控制策略，而在其他状态下仍使用图 8a 中所示的控制策略。

实验平台的实际配置与优化所得配置不成比例，且功率等级相差较大，本实验旨在通过对比实验验证改进策略的优越性。本实验中使用图 5 缩小 60 倍后的功率曲线作为负载电机的输入曲线，对比实验选取功率曲线的前 180s。两组实验的超级电容初始电压均为 395V 左右，且电池在电池主动状态下放电电流为 35A。实验结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 为超级电容的 SOC 曲线对比，其中图 9a、



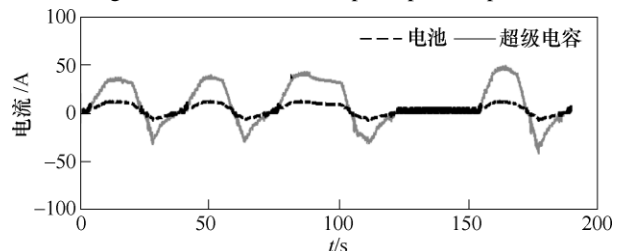
(a) 普通策略下的超级电容 SOC 曲线



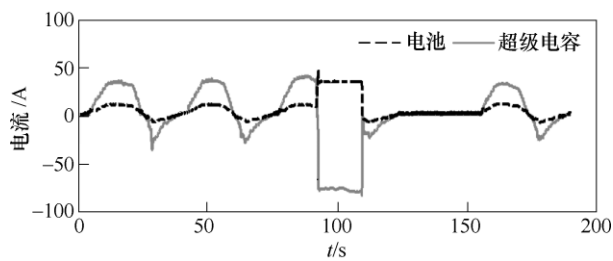
(b) 改进策略下的超级电容 SOC 曲线

图 9 超级电容 SOC 曲线

Fig.9 SOC curves of supercapacitor pack



(a) 普通策略下的电流曲线



(b) 改进策略下的电流曲线

图 10 储能系统电流曲线

Fig.10 Current curves of the storage system

图 9b 分别为普通策略和改进策略下的实验曲线。由于储能系统中的电池储能高而能耗少，故电池电压波动不大，此处只比较超级电容的状态。图 10 为两种不同能量管理策略下的电池、超级电容输出电流曲线对比，图 10a、图 10b 对应的能量管理策略与图 9 相同。

从图 9b 中可以看出，当超级电容的 SOC 低于 SOC_{sclow} 即 0.4 时，电池主动状态启动。由图 10b 可得，此时电池使用 35A 恒流放电，由于功率需求小于电池放出的功率，所以剩余功率全部为超级电容充电，此时超级电容的电流为负。电池持续为超级电容充电，超级电容 SOC 不断上升。当其 SOC 上升至 SOC_{schigh} 即 0.7 时，储能系统退出电池主动状态，按固定功率比例进行分配，电池的电流值下降。经过能量交互过程后，超级电容的 SOC 得以保持在较高的水平。而对比普通策略下的 SOC 曲线，从图 10a 中可以看出，电池与超级电容在任何时刻均保持 3:7 的功率输出，在超级电容 SOC 过低时无能量交互现象。经过了 4 个牵引状态以后，超级电容的 SOC 跌至 0.3 左右，此时若再进入牵引状态，超级电容无法继续提供所需功率，会造成储能系统运行故障。

从实验数据中可以得出，能量交互状态及时补充了超级电容的电量，而普通策略会使超级电容的 SOC 持续下降，若在充电站得不到及时的能量补充，超级电容的 SOC 下降会产生累积，无法继续提供相应比例的功率，为了维持运行，超级电容的容量配置会增大。

为了进一步验证改进策略的合理性，进行了全线路实验，即使用图 5 中全线路功率曲线缩小 60 倍作为负载功率输入。实验所得电池、超级电容的电压、电流曲线如图 11、图 12 所示。

由图 11 可以看出，电池的电压稳定，并且超级电容有了电池的能量补充，电压波动较小。除了模

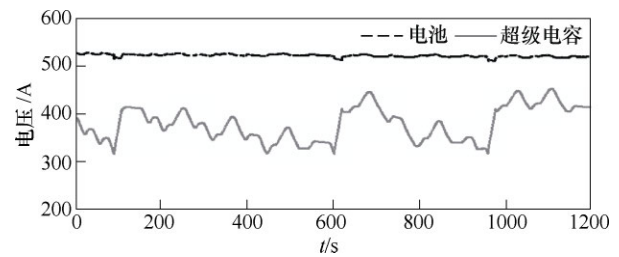


图 11 储能系统电压曲线

Fig.11 Voltage curves of the system

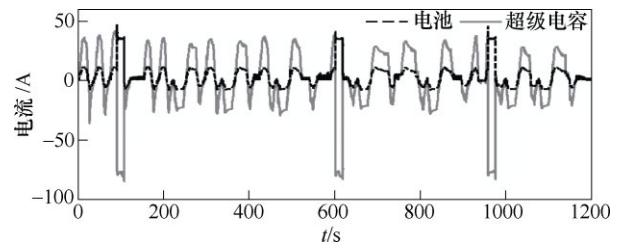


图 12 储能系统电流曲线

Fig.12 Current curves of the system

拟有轨电车充电桩的 7 次充电状态以外，进入电池主动状态 3 次，即电池为超级电容充电 3 次。电池主动状态开始时由于超级电容电压较低，当电池对其充电时，超级电容的电流较大，如图 11 所示，且此时电池仍在为电机运转提供能量，加上超级电容的电压不断上升，所以此时超级电容的电流是变化的。经过能量交互状态后，超级电容的电压值升高，并能够为下一次牵引提供能量。而普通策略下的超级电容在 180s 时 SOC 已经降到 0.3，如图 9a 所示，无法提供下一次牵引的能量，超级电容由于电量过低启动保护，全线实验无法继续进行。由此可以得出，改进策略能够保证实验平台中储能系统满足负载电机运行全程的功率需求，而普通策略下储能系统无法满足电机运行全程的功率需求，欲使用普通策略运行，则需要增大容量配置。

4 结论

本文针对有轨电车的电池-超级电容混合储能系统提出了改进后的能量管理策略，进行了容量配置协同优化，并实验验证了该能量管理策略的优越性。对有轨电车混合储能系统的在线能量管理策略进行了分析并加以改进，加入电池主动状态中电池与超级电容的能量交互，并根据实际线路要求，基于改进后的能量管理策略完成了容量的优化配置，验证了该能量管理策略在容量配置上的优势，即减轻系统重量，降低初始成本。随后在容量配置不变的实验平台上对普通策略和改进策略进行对比实验，进一步验证改进后能量管理策略的优越性。

参考文献

- [1] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
Zhang Chunjiang, Dong Jie, Liu Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [2] Fu Zhumu, Wang Bin, Wang Xiaohong, et al. Power-split hybrid electric vehicle energy management based on improved logic threshold approach[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 1-9.
- [3] Zhao Guangyao, Cheng Zeyu, Du Zhiyuan, et al. Energy management strategy for series hybrid electric vehicle[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(4): 583-587.
- [4] Huang Y J, Yin C L, Zhang J W. Design of an energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles using a logic threshold and instantaneous optimization method[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(4): 513-521.
- [5] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 84-94.
Cai Guowei, Chen Chong, Kong Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 84-94.
- [6] 丁若星, 董戈, 吴和平, 等. 混合储能系统功率分配效果的表征参数研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 184-189.
Ding Ruoxing, Dong Ge, Wu Heping, et al. Research on power sharing results parameterization of hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 184-189.
- [7] Motapon S N, Dessaint L A, Al-Haddad K. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(3): 1320-1334.
- [8] He Hongwen, Xiong Rui, Zhao Kai, et al. Energy management strategy research on a hybrid power system by hardware-in-loop experiments[J]. Applied Energy, 2013(112): 1311-1317.
- [9] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.
Sang Bingyu, Tao Yibin, Zheng Gao, et al. Research on topology and control strategy of the supercapacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [10] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
Zhang Yunxin, Sun Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control 2015, 43(21): 93-98.
- [11] 柴炜, 李征, 蔡旭, 等. 基于使用寿命模型的大容量电池储能系统变步长优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 58-66.
Chai Wei, Li Zheng, Cai Xu, et al. Variable step-size control method of large capacity battery energy storage system based on the life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 58-66.
- [12] Lin Xiaofeng, Hu Meipin, Song Shaojian, et al. Battery-supercapacitor electric vehicles energy management using DP based predictive control algorithm[C]//2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems, Orlando, FL, USA, 2014, DOI: 10.1109/CIVTS.2014.7009474.
- [13] Herrera V I, Gaztañaga H, Milo A, et al. Optimal energy management and sizing of a battery--supercapacitor-based light rail vehicle with a multi-objective approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3367-3377.
- [14] Jain M, Desai C, Williamson S S. Genetic algorithm based optimal powertrain component sizing and control strategy design for a fuel cell hybrid electric bus[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, USA, 2009: 980-985.
- [15] 张晴, 李欣然, 杨明, 等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 40-48.
Zhang Qing, Li Xinran, Yang Ming, et al. Capacity

- determination of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations with maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 40-48.
- [16] Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization[M]. New York: Springer, 2007.
- [17] 马益平. 考虑电动汽车调度的微电网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 98-107.
Ma Yiping. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for micro-grid considering EV scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 98-107.
- [18] 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 acceleration-time-prediction-based energy management and optimal sizing of onboard energy management system for modern trams[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 158-166.
-
- 作者简介
王 琦 女, 1992 年生, 博士, 研究方向为城市轨道交通车载储能技术。
E-mail: ywangelec@bjtu.edu.cn
杨中平 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动和节能技术。
E-mail: zhpyang@bjtu.edu.cn (通信作者)
- (编辑 郭丽军)