

基于并行双环结构的城轨地面式混合储能装置控制策略研究

陶孝涛¹ 刘冲² 林飞¹ 杨中平¹ 徐萌³

(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. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062)

摘要 电池-超级电容混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)在城市轨道交通应用中可以有效回收列车再生制动能量,抑制直流网电压抬升。基于超级电容高功率密度特性和电池高能量密度特性,提出基于并行双环结构的城轨地面式混合储能装置控制策略,对电池和超级电容的电压给定曲线分别进行设计,以减少能量损耗为控制目标对电压给定曲线的参数进行选择,通过减少超级电容运行过程中的不必要充电,使其有剩余容量满足高功率需求,在有效抑制网压抬升的同时可减少空气制动的启动。最后结合所提控制策略以及仿真模型,利用实际线路数据进行仿真分析,验证了所提控制策略可有效减少能量损耗,提高装置的节能效果。

关键词: 混合储能 控制策略 节能效率 城轨交通

中图分类号: TK02

Control Strategy of Wayside Hybrid Energy Storage System for Urban Rail Transit Based on Parallel Dual-loop Control Structure

Tao Xiaotao¹ Liu Chong² Lin Fei¹ Yang Zhongping¹ Xu Meng³

(1. Beijing Jiaotong University School of Electrical Engineering Beijing 100044 China

2. Systems Engineering Research Institute Beijing 100094 China

3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co.,Ltd. Changchun 130062 China)

Abstract The battery-supercapacitor hybrid energy storage system (HESS) can effectively recover the regenerative braking energy of the train and suppress the rise of the DC network voltage in the application of urban rail transit. Based on the high power density characteristics of the supercapacitor and the high energy density characteristics of the battery, a control strategy of the urban rail wayside hybrid energy storage device based on the parallel dual-loop structure is proposed, and the voltage reference curves of the battery and the supercapacitor are designed separately. With the goal of reducing energy loss, the parameters of the voltage reference curve are selected. By reducing unnecessary charging during the operation of the supercapacitor, it has the remaining capacity to meet the high power demand, and can effectively reduce the start of the air brake while effectively suppressing the rise of the network voltage. Finally, combined with the proposed control strategy and simulation model, the actual line data is used for simulation analysis to verify that the proposed control strategy can effectively reduce energy loss and improve the energy saving effect of the device.

Keywords: Hybrid energy storage device, control strategy, energy saving effect, urban rail transit

0 引言

城市轨道交通以其相对较低的能耗与运力比^[1-3],已经成为满足世界各国交通需求的一种日益普遍的选择。据统计数据显示,列车制动能量约占牵引能量的 30-60%^[4],有效利用这部分再生制动能量可以大大降低列车运行的能耗,从而提高节能效果。为了回收再生制动能量,稳定网压,越来越多的储能装置被安装在牵引供电系统中。电池、飞轮和超级电容是城市轨道交通中常用的储能元件^[5-6]。

电池储能系统由于其高能量密度、低成本、高可靠性等优点,超级电容由于其高能量密度、长循环寿命等优点,在国内外均已具有较为广泛的成熟应用。单储能系统的控制大多采用传统双闭环结构,文献[7]中基于传统双闭环控制结构,提出基于牵引变电所运行状态的动态阈值能量管理策略,通过实时监测变电所输出电压的 5 次谐波,动态调整电池储能系统的充放电阈值,解决了牵引网空载电压波动带来的影响。文献[8]基于传统双闭环结构,以减少牵引变电站供电能耗为控制目标,提出了一种通过降低超级电容储能装置输出电流来减小线路损耗的充放电控制策略,减少了牵引供电系统能耗,同时改善了受电弓电压跌落情况,并削减了牵引变电站输出电流峰值。

但由于电池储能系统的特性,在应用中存在温度特性差,循环寿命短、功率密度低等问题,超级电容也由于其体积较大、能量密度较低,在应用中难以满足能量性需求。因此选用电池超级电容混合使用,使设备同时具有较高的能量密度和功率密度,可实现两种储能元件技术上的互补性,更适用于具有站间距短,启停频繁等特点的城市轨道交通中。

采用了 HESS 的城市轨道交通牵引网结构如图 1 所示,电池和超级电容分别通过双向 DC/DC 变换器并联在直流母线上。储能装置工作在分段控制模式下,当牵引网电压高于储能装置充电阈值时,进入充电模式,当牵引网电压低于储能装置放电阈值时,进入放电模式,当牵引网电压位于充放电阈值之间时,则静置。为避免空载情况下对储能装置充电或使储能装置放电,充电阈值应高于空载电压,放电阈值应低于空载电压。

目前大部分混合储能系统优化控制方法的研究主要集中在微电网系统^[9-12],在城轨交通领域对两种不同类型混合储能应用的研究还较少。文献[13]提出了一种考虑列车运行状态的控制策略,基于列

车的发车间隔分时段动态选择功率分配模式,低峰时采用电池优先响应,高峰时采用超级电容优先响应,提高了储能效果。

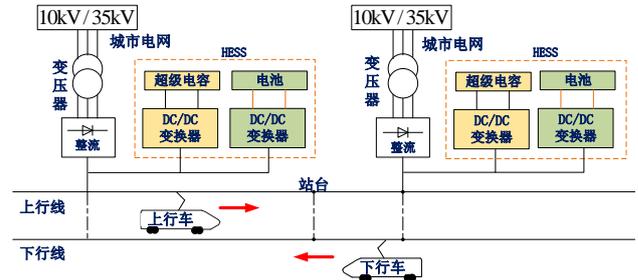


图 1 采用 HESS 的城市轨道交通牵引网结构

Fig.1 The structure of urban rail traction with HESS

然而上述文献所提的能量管理策略为了保证电池-电容储能设备同时并联工作,沿用了单储能装置的单电压环控制结构,并采用恒压控制,将电池和超级电容进行集中式控制,使电池和超级电容共用同一电压环,在各自的电流内环再进行功率分配。但对于实际的城轨线路,集中式稳压控制不利于电池和超级电容发挥各自的储能优势。为了更好的协调系统中各储能元件的运行,降低能量损耗,提高系统节能效果,本文基于并行双环控制结构提出了一种新型控制策略。所提出的策略通过对电压外环指令值进行设计,充电时随充电电流的增大电压指令值增大,放电时随放电电流的增大电压指令值减小,电池和超级电容根据各自的电压环外环控制进行工作。

本文首先分析了集中式稳压控制策略存在的局限性,以空气制动能量损耗最小为控制目标,提出了基于并行双环结构的新型控制策略,对电压指令值的给定曲线进行设计,并对曲线的参数设计原则进行分析。最后利用实际线路参数验证了所提新型控制策略的有效性。

1 基于功率分配的集中式稳压控制策略

1.1 基于功率分配的集中式稳压控制结构

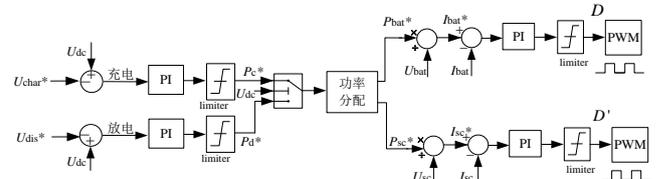


图 2 集中式稳压控制策略的单电压环控制框图

Fig.2 Single voltage loop control block diagram of centralized voltage regulation control strategy

集中式稳压控制策略采用单电压环、双电流环

的控制结构，电池和超级电容共用同一电压外环稳定直流网压，经 PI 调节器得到储能装置的充放电功率指令值，然后分配电池和超级电容承担充放电功率，并得到电池和超级电容的充放电电流指令值；电流内环控制器分别检测电池和超级电容的充放电电流作为反馈，将反馈与电流指令值的差值通过 PI 调节器得到储能系统双向 DC/DC 变换器上下管的控制脉冲，实现对储能系统的控制。具体结构如图 2 所示，其中 U_{char}^* 为充电阈值， U_{dis}^* 为放电阈值， U_{dc} 为直流网压， P^* 为储能元件充放电功率指令值， U 为储能元件电压， I^* 为储能元件充放电电流指令值， I 为实际电流值。

1.2 基于电池优先的集中式稳压控制局限性

为了研究基于功率分配的集中式稳压控制策略的局限性，对已有文献[13]中采用的基于电池优先的集中式稳压控制策略进行分析，仿真条件如表 1 所示，得到牵引网电压、超级电容 SOC 和储能装置功率的仿真结果分别如图 3 中的 (a)、(b)、(c) 所示。

表 1 仿真参数

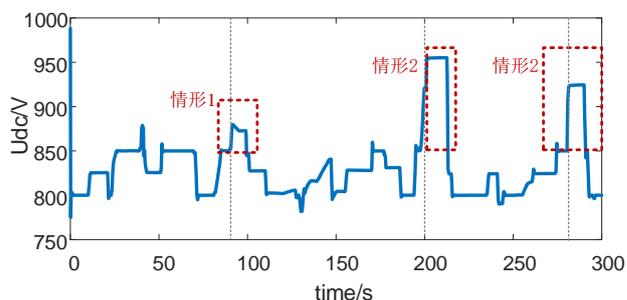
Tab.1 Simulation parameters

参 数	数 值
空载电压/V	836
充电阈值/V	850
放电阈值/V	800
SC 功率/MW	1.6
Bat 功率/MW	0.4

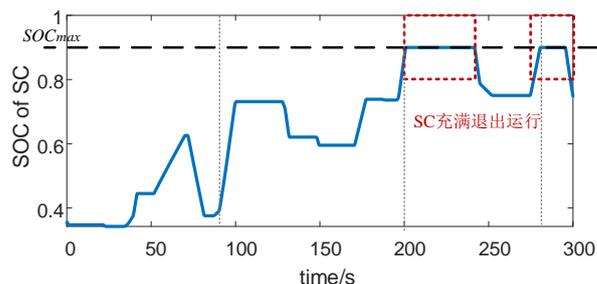
从图 3 中可以看出，牵引网电压存在两种形式的抬升。一种是图中标识为情形 1 的形式，这种情况下超级电容 SOC 未达到最大值，储能装置以能达到的最大功率充电；另一种是图中标识为情形 2 的形式，这种情况下超级电容的 SOC 已达到允许的最大值，储能装置功率减小为电池的充电功率。

结合城轨交通能量流动情况分别对情形 1 和情形 2 的形成原因进行分析。当列车制动时，城市轨道交通能量流动整体情况可表示为式 (1)，其中 P_b 为列车制动功率， P_c 为储能装置充电功率，由电池功率 P_{bat} 和超级电容功率 P_{sc} 相加而成， P_{cross} 为列车能量交互功率， P_{line} 为线路损耗， P_m 为空气制动功率。由于线路阻抗较小， P_{line} 数值的变化相较于其他数值较小，因此后续分析认为 P_{line} 为常值。

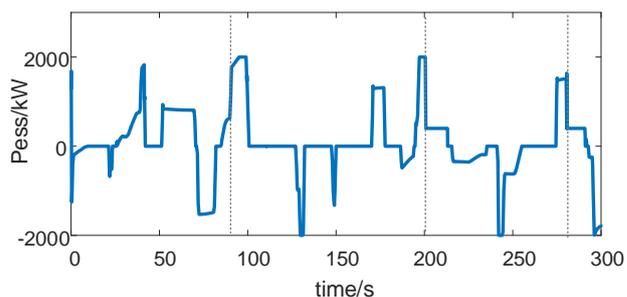
$$P_b = P_c + P_{cross} + P_{line} + P_m \quad (1)$$



(a) 牵引网电压



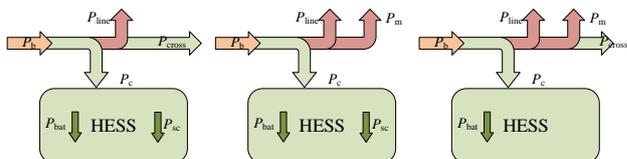
(b) 超级电容的 SOC



(c) 储能装置功率

图 3 基于电池优先的集中式稳压控制仿真结果

Fig.3 Simulation results of centralized voltage regulation control based on battery priority power distribution strategy



(a) 空气制动未启动时 (b) 无列车交互时 (c) SC 充满退出时

图 4 情形 1 和情形 2 形成原因的能量流动分析

Fig.4 Condition 1 and Condition 2 cause analysis

情形 1: 在情形 1 出现之前，根据列车制动限流特性^[14]，电压低于空气制动启动电压，空气制动未启动， $P_m=0$ 。充电阈值设置较低时，储能装置充电功率增大，将导致 P_{cross} 的减小，列车交互能量将减少。在较低牵引网电压时，储能装置充电功率已经达到最大值 P_{max} ，此时系统能量流动如图 4 (a) 所示，可表示为：

$$P_b = P_{\max} + P_{\text{cross}} + P_{\text{line}} \quad (2)$$

此后当线路中无列车交互情况，即如图 5 所示的列车功率曲线，在 t_0 时间后，列车牵引功率和制动功率无重叠部分时，随着列车制动功率的增大，无法被吸收的列车再生制动能量将导致牵引网电压的抬升，从而启动空气制动补足剩余制动功率，导致了情形 1 的形成，此时系统的能量流动如图 4(b) 所示，可表示为：

$$P_b = P_{\max} + P_{\text{line}} + P_m \quad (3)$$

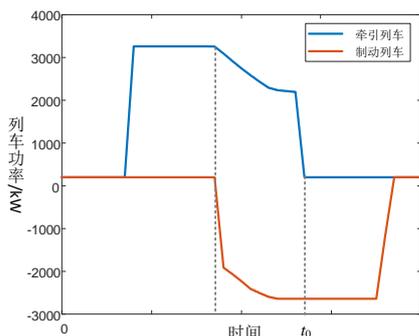


图 5 列车功率曲线示意图

Fig.5 Diagram of train power curve

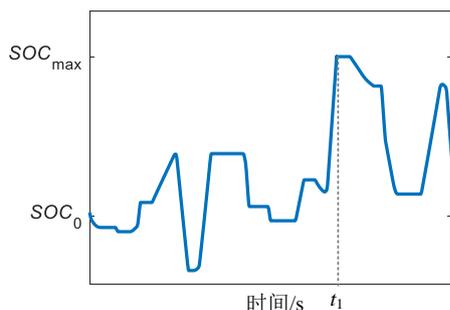


图 6 超级电容 SOC 变化示意图

Fig.6 Schematic diagram of SOC change of supercapacitor

情形 2: 根据文献[13]中所提电池优先的集中式稳压控制策略，当线路列车由牵引引起的网压降较小，储能装置的放电功率指令值可仅由电池提供时，超级电容不工作，导致超级电容的放电量减少。又由于超级电容能量密度低的特性，所以在短时间内超级电容将从初始容量 SOC_0 充电至允许的最大容量 SOC_{\max} ，如图 6 所示的超级电容 SOC 示意图，在 t_1 时间后，超级电容便退出运行。储能装置的最大充电功率变为电池的功率， P_c 减小，剩余无法被吸收的制动功率将导致牵引网电压的抬升，从而启

动空气制动补足，导致了情形 2 的形成，此时系统的能量流动如图 4(c) 所示，可表示为式 (4)，此后超级电容最大可充电容量为上一次运行时的放电量。

$$P_b = P_{\text{bat}} + P_{\text{cross}} + P_{\text{line}} + P_m \quad (4)$$

综上分析可得，基于电池优先的集中式稳压控制策略，由于电池和电容共用同一电压环，其局限性一方面是由于采用了较低的恒定充电阈值，在牵引网电压较低时达到最大功率，无列车交互时会引起空气制动的启动，另一方面是由于采用了电池优先响应的功率分配策略，导致超级电容容易提前充满而退出运行，引起空气制动的启动。

2 基于并行双环结构的新型控制策略

2.1 并行双环控制结构及电压给定

根据前述对文献[13]中所提方法分析得出的局限性，为了减少系统的能量损耗，本文提出了基于并行双环控制结构的新型控制策略。通过设计电压外环指令值的给定曲线，使电池和超级电容可根据各自的电压环指令进行工作。

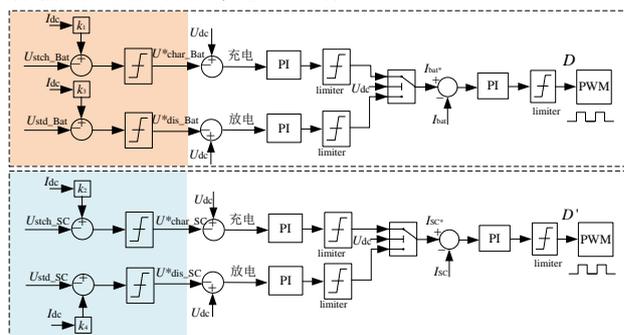


图 7 基于并行双环结构的新型控制策略控制框图

Fig.7 Proposed control strategy control block diagram based on parallel dual-loop structure

混合储能装置的并行双环控制结构如图 7 所示，图中 U_{stch} 为储能元件的充电启动电压， U_{std} 为储能元件的放电启动电压， I_{dc} 为储能装置高压侧电流， U_{char}^* 为储能元件电压外环充电电压给定值， U_{dis}^* 为储能元件电压外环放电电压给定值， k_1 、 k_2 分别为电池和超级电容充电时给定电压的变化斜率， k_3 、 k_4 分别为电池和超级电容放电时给定电压的变化斜率。相较于集中式稳压控制结构，将电池-超级电容共用电压环结构变为并行双环结构，同时将稳压控制变为使电压外环给定值随储能装置输出电流的变化而变化的控制，电池和超级电容电压外环的指令值可分别设置。

新型控制策略中充电电压外环指令值给定过程具体如图 8 所示, 图中 U_{ch_M} 为电压外环指令值的最大值, $U_{stch_1, 2}$ 为储能元件 1、2 的充电启动电压, I_{ch_M} 为充电电流最大值, I_1 为储能元件 2 启动时, 储能元件 1 的充电电流, P_1 为此时储能元件 1 的充电功率。

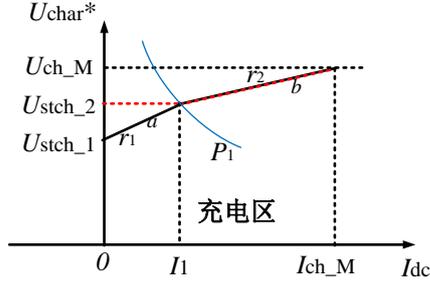


图 8 新型控制策略的电压指令值给定 (充电过程)

Fig.8 Instruction voltage value setting process of proposed control strategy (charging process)

根据牵引网电压和储能元件充电启动电压的比较, 决定该储能元件是否投入运行, 如式 (5) 所示。当列车制动时, 若网压抬升至储能元件 1 的启动电压 U_{stch_1} , 则储能元件 1 投入运行, 且电压外环指令值根据 a 段曲线变化, 储能装置工作电流越大, 电压外环给定值越高, 直至网压抬升至储能元件 2 的启动电压 U_{stch_2} , 则储能元件 2 也投入运行。由于两种储能元件并联于同一直流母线, 因此二者同时运行时, 电压外环指令值均根据 b 段曲线变化。

$$\begin{cases} U_0 < U_{dc} < U_{stch_1} & \text{静置} \\ U_{stch_1} \leq U_{dc} < U_{stch_2} & \text{仅储能元件1工作} \\ U_{stch_2} \leq U_{dc} \leq U_{ch_M} & \text{储能元件1、2同时工作} \end{cases} \quad (5)$$

图中 I_{ch_M} 由储能装置最大充电功率 P_{max} 和电压外环指令值的最大值 U_{ch_M} 决定, 如式 (6) 所示。 I_1 的大小由 P_1 和 U_{stch_2} 决定, 如式 (7) 所示。

$$I_{ch_M} = \frac{P_{max}}{U_{ch_M}} \quad (6)$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_{stch_2}} \quad (7)$$

储能元件启动后, 储能元件 1 的电压给定过程由 a、b 段曲线构成, 储能元件 2 的电压给定过程为 b 段曲线, 分别可表达为式 (8)、(9)。

$$U_{char_1}^* = \begin{cases} U_{stch_1} + r_1 \times I_{dc} & U_{stch_1} \leq U_{dc} < U_{stch_2} \\ U_{stch_2} + r_2 \times (I_{dc} - I_1) & U_{stch_2} \leq U_{dc} < U_{ch_M} \end{cases} \quad (8)$$

$$U_{char_2}^* = U_{stch_2} + r_2 \times (I_{dc} - I_1) \quad (9)$$

其中:

$$r_1 = \frac{U_{stch_2} - U_{stch_1}}{I_1} \quad (10)$$

$$r_2 = \frac{U_{ch_M} - U_{stch_2}}{I_{ch_M} - I_1} \quad (11)$$

放电过程中的电压外环指令值的给定同理, 如图 9 所示, 图中 U_{min} 为电压外环指令值的最小值, $U_{std_1, 2}$ 分别为储能元件 1、2 的放电启动电压, I_{d_M} 为放电电流最大值, I_2 为储能元件 2 启动时, 储能元件 1 的放电电流, P_2 为此时储能元件 1 的充电功率。

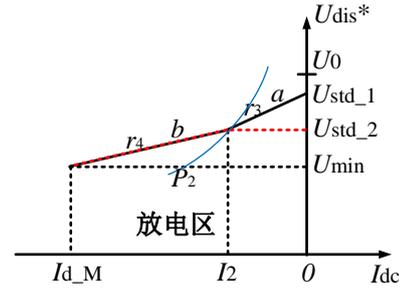


图 9 新型控制策略的电压指令值给定 (放电过程)

Fig.9 Instruction voltage value setting process of proposed control strategy (discharging process)

根据牵引网电压和储能元件放电启动电压的比较, 决定该储能元件是否投入运行, 如式 (12) 所示。与充电过程中不同的是, 放电过程中随放电电流的减小, 电压外环的给定值随之减小。

$$\begin{cases} U_{std_1} < U_{dc} < U_0 & \text{静置} \\ U_{std_2} < U_{dc} \leq U_{std_1} & \text{仅储能元件1工作} \\ U_{min} \leq U_{dc} \leq U_{std_2} & \text{储能元件1、2同时工作} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_t = P_{sub} + P_{cross} + P_d - P_{line2} \quad (13)$$

列车牵引时, 系统中的能量流动情况如式 (13) 所示, 不会引起空气制动的启动, 本文以减少能量损耗为控制目标, 从充电过程分析储能装置的节能

效果。考虑充电过程的新型控制策略工作流程图如图 10 所示, 此时 $U_{std_1}=U_{std_2}=U_{dis}$ 。图中 I_{c1} 和 I_{c2} 分别表示储能元件 1、2 的充电电流, I_{d1} 和 I_{d2} 分别表示储能元件 1、2 的放电电流, I_{req} 为电压环 PI 调节作用得到的电流需求值。

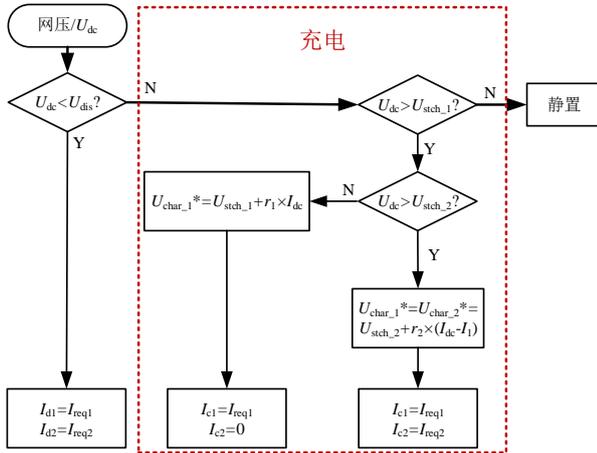


图 10 新型控制策略流程图(充电过程)

Fig.10 Flow chart of the proposed control strategy (charging process is considered)

当列车制动时, 储能装置启动后, 电压外环指令值随储能装置充电电流的增大而增大, 储能装置充电功率 P_c 在相同工况下, 相较于集中式恒压控制中减小, 因此当存在列车交互时, 列车交互功率 P_{cross} 增大, 用于列车交互的能量增多。此后在无列车交互情况时, P_c 逐渐增大直至达到最大值, 可减少情形 1 的形成。该过程可表示如图 11 (a) 所示, 图中区域 A 表示空气制动未启动时的能量流动, 区域 B 表示无列车交互空气制动启动时的能量流动, t_0 为图 5 中所示无列车交互的时刻。通过采用新型控制策略, 减小存在列车交互时储能装置的充电功率, 使储能装置在 t_0 时刻后逐渐增大充电功率, 延缓至 t_0' 时刻再进入区域 B 所示的能量流动, 减少了空气制动能量损耗。

同时, 由于减少了储能装置在有列车交互时的使用, 减少了该段时间内超级电容的充电量, 并且由于采用并行双环控制结构, 相较于文献[13]中电池优先的集中式稳压控制策略, 在相同放电阈值下增加了超级电容的放电量, 因此减少了情形 2 的形成。该过程可表示为图 11 (b) 所示, 图中区域 C 表示超级电容退出运行后的能量流动, t_1 为图 6 中所示超级电容充满退出运行的时刻。通过采用新型控制策略, 减少了列车运行前期超级电容的充电量, 使超级电容延缓至 t_1' 时刻充满再进入区域 C 所示的能量流动, 减少了空气制动能量损耗。

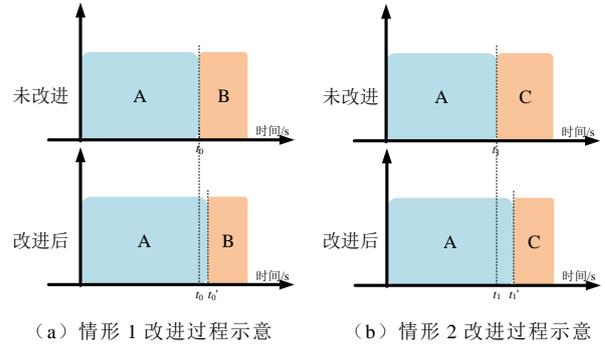


图 11 新型控制策略改进过程示意图

Fig.11 Schematic diagram of proposed control strategy improvement process

2.2 参数设计原则

通过控制所提控制策略充电过程中 U_{ch_M} 、 U_{stch_1} 、 U_{stch_2} 、 P_1 四个变量, 即可确定充电电压外环指令值的给定。

首先需要确定电池和超级电容与储能元件 1、2 的对应关系。若 $U_{stch_1}=U_{stch_SC}$, $U_{stch_2}=U_{stch_Bat}$, 表明充电时超级电容在较低电压处启动, 随电压给定值升高至电池启动电压后, 电池再投入工作。此时超级电容充电量较多, 而超级电容能量密度低, 在短时间内便会充满而退出运行, 增大了空气制动的启动。因此应使 $U_{stch_1}=U_{stch_Bat}$, $U_{stch_2}=U_{stch_SC}$, 即储能元件 1 对应电池, 储能元件 2 对应超级电容。

接下来需要确定 U_{ch_M} 、 U_{stch_SC} 、 U_{stch_Bat} 、 P_1 四个变量的取值, 随取值的增大, 影响过程分别如图 12 中的 (a) ~ (d) 所示。从图 12 (a) 中可以看出, 随 U_{ch_M} 的增大, b 段曲线将沿 P_{max} 上升, 电池和超级电容电压外环的给定值增大, 列车交互能量随之增大。从图 12 (b) 中可以看出, 在仅电池工作的 $0 \sim I_1$ 区间, 在相同的工作电流下, 随着 U_{stch_Bat} 的增大, 电压外环的指令值增大, 电池的充电功率减小。从图 12 (c) 中可以看出, 当 U_{stch_Bat} 和 U_{ch_M} 确定后, U_{stch_SC} 通过影响电池和超级电容的能量分配, 来影响系统的能量流动。随超级电容启动电压的升高, 仅电池工作的电压范围变宽, 电池充电量增加, 超级电容前期充电量减少, 可减少 SC 退出运行的情形。从图 12 (d) 中可以看出, 随 P_1 的增大, I_1 也随之增大, 从而增大了电池的充电量, 减少了超级电容前期的充电量。

但由于线路压降的存在, 当提升电压外环指令值时, 会导致列车受电弓处的电压升高, 使列车制动能量无法被及时吸收, 从而增加了空气制动能耗。因此本文定义随参数的变化, 列车交互能量的增加

量为 v ，情形 1 中空气制动能耗减少量为 w_1 ，情形 2 中空气制动能耗减少量为 w_2 ，由于线路压降增加的空气制动为 w_3 ，则系统运行时的总能耗减少量可表示为式 (14)，由于线路损耗的变化较小可认为是一个常值，则储能装置的充电能量增加量可表示为式 (15)。仅当 $w>0$ 时，系统的空气制动能耗减少，当 $w=0$ 时，系统的空气制动能耗不变，当 $w<0$ 时，系统的空气制动能耗增大。储能装置的充电能量变化取决于空气制动能耗减少量 w 和列车交互能量的增加量为 v ，当 $w>v$ 时，储能装置充电量增加，当 $w=v$ 时，储能装置充电量不变，当 $w<v$ 时，储能装置充电量减少。因此为了使空气制动能量损耗最小，应选择各参数变化时 w 由正变为负前的最后一个取值。

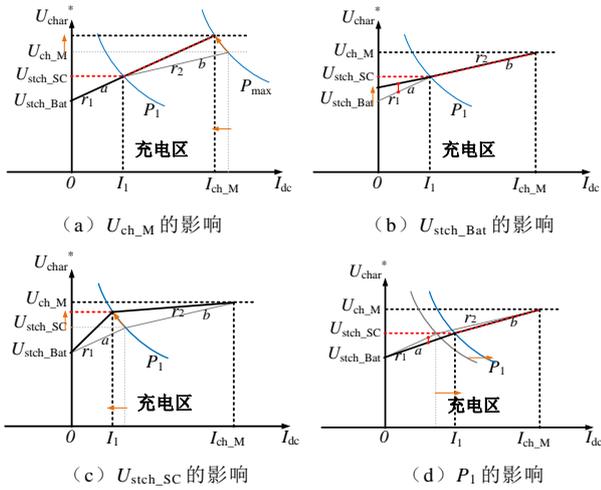


图 12 控制变量的影响过程

Fig.12 Flow chart of the proposed control strategy (charging process is considered)

$$w = w_1 + w_2 - w_3 \quad (14)$$

$$s = w - v \quad (15)$$

以 U_{ch_M} 为例具体过程为，使 U_{ch_M} 按照式 (16) 逐渐变化，可以根据式 (17) 同步得到 w_1 、 w_2 和 w_3 的数值，再根据 w 的正负变化对最大允许电压值进行选择。其余参数的选取过程类似。

$$\begin{aligned} U_{ch_M(1)} &= U_{ch_M(0)} + \Delta U \\ U_{ch_M(2)} &= U_{ch_M(1)} + \Delta U \\ U_{ch_M(3)} &= U_{ch_M(2)} + \Delta U \\ &\vdots \\ U_{ch_M(n)} &= U_{ch_M(n-1)} + \Delta U \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} w_{1(k)} &= w_{1(U_{ch_M(k)})} - w_{1(U_{ch_M(k-1)})} \\ w_{2(k)} &= w_{2(U_{ch_M(k)})} - w_{2(U_{ch_M(k-1)})}, 1 \leq k \leq n \quad (17) \\ w_{3(k)} &= w_{3(U_{ch_M(k)})} - w_{3(U_{ch_M(k-1)})} \end{aligned}$$

3 考虑实际运行场景的参数优化与控制效果验证

为了对新型控制策略中的参数进行优化，并验证所提策略的可行性和有效性，建立了仿真模型，对控制参数的影响进行分析，对比验证新型控制策略的节能效果。

3.1 城市轨道交通供电系统仿真模型

根据城市轨道交通供电系统的实际情况，建立了仿真模型，如图 13 所示。整个模型包括列车运行模块 TPS、直流网络潮流仿真模块 DC-RLS、电池-超级电容混合储能装置模块 HESS。TPS 是基于实际线路参数，输出列车运行功率和列车位置。DC-RLS 模块用于模拟线路上多列车的运行状态，通过潮流分析得到变电站的电压、电流和储能系统的充放电功率。HESS 模块包括电池和超级电容模型，可以设置储能系统的能量管理策略。

表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

参数	数值
发车间隔/s	300
仿真时长/s	300
空载电压 U_0/V	836
P_{max}/kW	2000
空气制动启动电压 U_{br1}/V	900
再生制动切除电压 U_{br2}/V	970
P_{bat_max}/kW	400
P_{sc_max}/kW	1600

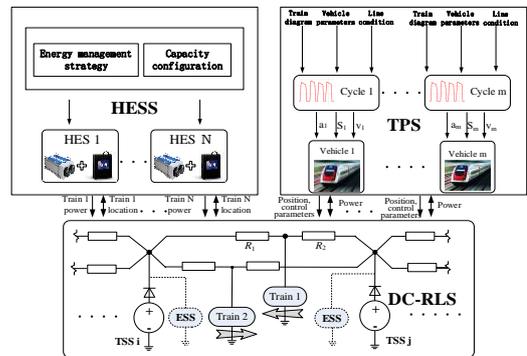


图 13 城市轨道交通列车供电系统仿真平台

Fig.13 Urban rail train power supply system simulation platform

本文以北京地铁八通线的实际参数为例，建立了五站多车仿真模型，其中第三个变电站设置有 HESS，用 300s 实际工况来进行仿真分析。仿真参数设置如表 2 所示，上行列车的功率曲线如图 14 所示。

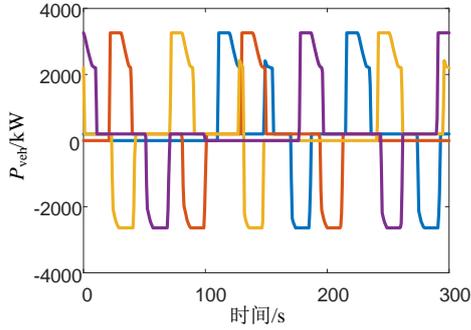


图 14 列车运行功率曲线(300s 发车间隔)

Fig.14 Train operating power curve (300s interval)

3.2 储能装置工作特性影响分析

1) U_{stch_1} 、 U_{stch_2} 对应关系的影响

以启动电压分别为 840V、850V， $U_{ch_M}=870V$ ， $P_1=400kW$ 为例，从图 15 中可以看出，当超级电容的启动电压低于电池时，超级电容在较短时间内便充满，导致空气制动的启动，能量消耗增加。因此选择 $U_{stch_1}=U_{stch_Bat}$ ， $U_{stch_2}=U_{stch_SC}$ 。

2) U_{ch_M} 的影响

以 $U_{stch_Bat}=840V$ ， $U_{stch_SC}=850V$ ， $P_1=400kW$ 为例，从图 16 中可以看出，空气制动消耗的能量呈现先减小后增大的趋势，储能系统的充电量呈先增大后减小的趋势。当 $U_{ch_M}<860V$ 时，随 U_{ch_M} 的增大，交互能量增多， w_1 和 w_2 增大，且大于 w_3 ， w 为正值，空气制动能耗减少，用于增加列车交互和储能装置充电量。随着 U_{ch_M} 的进一步增大，当 $U_{ch_M}>860V$ 时， w_1 、 w_2 的和小于 w_3 ， w 为负值，系统能耗开始增加。 s 也为负值，储能装置充电能量减少，用于增加空气制动能耗和列车交互能量。

3) U_{stch_Bat} 的影响

以 $U_{stch_SC}=860V$ ， $U_{ch_M}=870V$ ， $P_1=400kW$ 为例，从图 17 中可以看出，随 U_{stch_Bat} 的增大，空气制动消耗的能量呈现先减小后增大的趋势， w 由正变为负，储能装置能量呈现减少的趋势， s 为负值。当 $U_{stch_Bat}<845V$ 时，随 U_{stch_Bat} 的增大，列车交互能量增多， w_1 和 w_2 增大，且大于 w_3 ，系统能耗减小，列车交互能量的增量由储能装置充电的减少量和系统能耗减少量共同组成。但随着 U_{stch_Bat} 的继续增大，当 $U_{stch_Bat}>845V$ 时， w_3 增大且大于 w_1 、 w_2

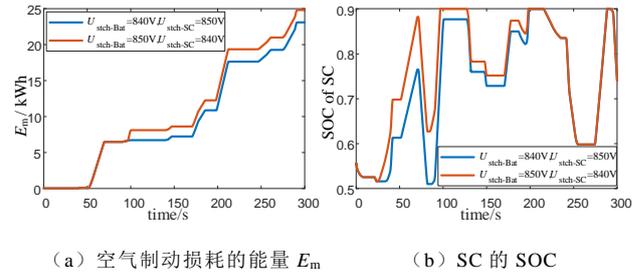
的和，系统能耗开始增大，储能装置充电的减少量用于系统能耗的增加和列车交互能量的增加。

4) U_{stch_SC} 的影响

以 $U_{stch_Bat}=845V$ ， $U_{ch_M}=870V$ ， $P_1=400kW$ 为例，从图 18 中可以看出，随 U_{stch_SC} 的增大，空气制动消耗的能量呈现先减少后增加的趋势，电池充电量逐渐减少，超级电容运行前期的充电量减少，整个运行周期充电量基本不变。当 $U_{stch_SC}<860V$ 时，随 U_{stch_SC} 的增大，交互能量增多， w_1 和 w_2 增大，且大于 w_3 ，列车交互能量的增量由储能装置充电的减少量和系统能耗减少量共同组成。但随着 U_{stch_SC} 的进一步增大，当 $U_{stch_Bat}>860V$ 时， w_3 增大且大于 w_1 、 w_2 的和，系统能耗开始增大，储能装置充电的减少量用于系统能耗的增加和列车交互能量的增加。

5) P_1 的影响

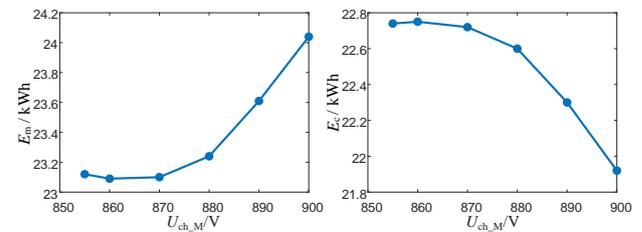
以 $U_{stch_Bat}=845V$ ， $U_{stch_SC}=860V$ ， $U_{ch_M}=870V$ 为例，从图 19 中可以看出，随 P_1 的逐渐增大，空气制动损耗的能量减少，这是由于电池充电量增多，SC 前期的充电量减少，如图 19 (b) 和 (c) 所示，因此 w_1 和 w_2 始终大于 w_3 。储能系统的充电量变化趋势与电池一致，呈逐渐减小的趋势，列车交互能量的增量由储能装置充电的减少量和系统能耗减少量共同组成。



(a) 空气制动损耗的能量 E_m (b) SC 的 SOC

图 15 储能元件对应关系影响效果

Fig.15 Effect of corresponding relationship of energy storage elements



(a) 空气制动损耗的能量 E_m (b) HESS 充电量 E_c

图 16 U_{ch_M} 的影响过程

Fig.16 The influence process of U_{ch_M}

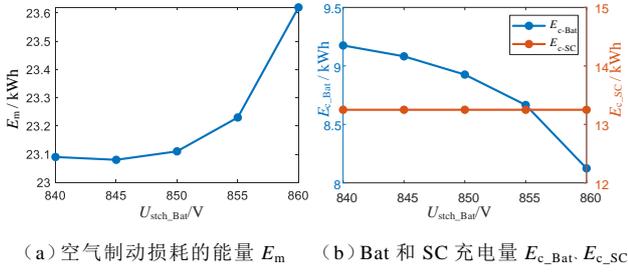
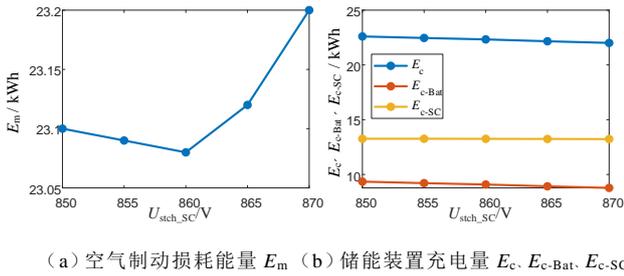


图 17 U_{stch_Bat} 的影响过程

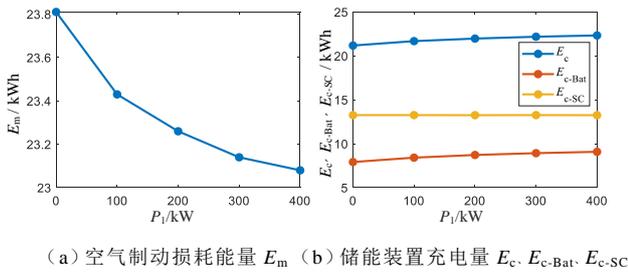
Fig.17 The influence process of U_{stch_Bat}



(c) SC 的 SOC

图 18 U_{stch_SC} 的影响过程

Fig.18 The influence process of U_{stch_SC}



(c) SC 的 SOC

图 19 P_1 的影响过程

Fig.19 The influence process of P_1

3.3 节能效果

文献[13]中已经提出一种城轨交通地面式混合储能装置的控制策略，为验证所提出的新型控制策略的有效性和先进性，本文将两种策略进行了对比。

电压指令值的仿真参数如表 3 所示，其他相应参数如前述表 2 所示。其中案例 S1 和 S2 为采用文献[13]控制策略的仿真参数，案例 S3 为本文所提出的新型控制策略，为了比较的合理性，将案例 S1 和 S2 中的充电阈值分别设置为案例 S3 中电池和电容的启动电压值。

仿真结果如下。图 20 为直流网压随时间的变化曲线，图 21 为不同案例下超级电容的 SOC，图 22 为超级电容的充电能量。从图中可以看出，通过采用新型控制策略，实现了超级电容的合理充放电：在存在能量交互时减少超级电容的不必要充电，增大超级电容放电，避免或延缓了由于超级电容充满而退出运行的情况，有效减少空气制动的能量损耗。

表 3 仿真参数

Tab.3 Simulation configuration		
案例	参数	数值
S1	U_{char}^*/V	845
	U_{dis}^*/V	800
S2	U_{char}^*/V	860
	U_{dis}^*/V	800
S3	U_{ch_M}/V	870
	U_{stch_Bat}/V	845
	U_{stch_SC}/V	860
	P_1/kW	400
	U_{std_Bat}/V	800
	U_{std_SC}/V	800

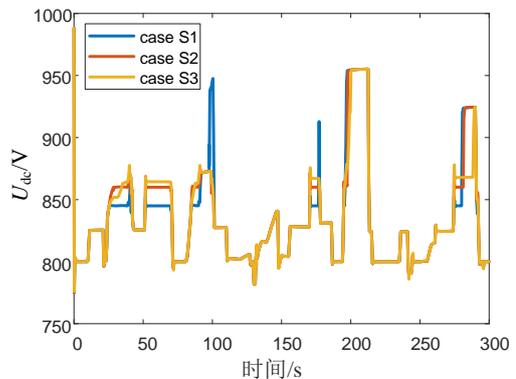


图 20 不同控制策略下网压随时间的变化曲线

Fig.20 The curve of network voltage with time under different control strategies

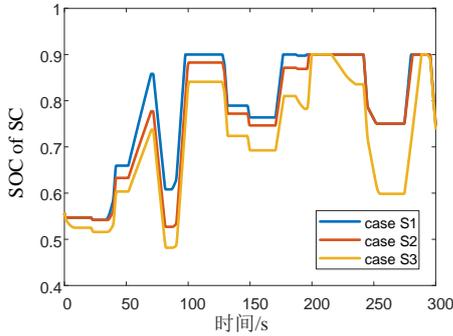


图 21 不同控制策略下 SC 的 SOC 随时间的变化曲线
Fig.21 The curve of SOC of SC with time under different control strategies

该过程中的能量流动统计如表 4 所示, 案例 S3 中相对于案例 S1 能量损耗减少了 2.4kWh, 这些能量一部分转移到储能装置中存储, 另一部分用于增加列车的能量交互。节能量统计如表 5 所示, 其中 S0 表示未安装 HESS, 节能效果 e 的计算公式如式 (18) 所示^[15-16], 该指标给出了有 HESS 时变电站输出能量 E_{sub} 和无 HESS 时变电站输出能量 E_{Osub} 的差值, 以及储能装置运行始终的能量差值 ΔE_{ess} 。从表中可以看出, 所提出的控制策略的节能效果提高了 2.0%, 能有效减少能量的浪费。

$$e = (1 - \frac{E_{sub} - \Delta E_{ess}}{E_{Osub}}) \times 100[\%] \quad (18)$$

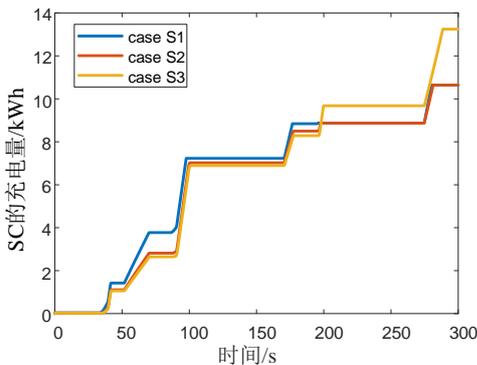


图 22 不同控制策略下电容充电能量
Fig.22 The charging energy of SC under different control strategies

表 4 制动过程能量统计

Tab.4 Energy statistics under braking condition

案例	E_b /kWh	E_{cross} /kWh	E_c /kWh	E_m /kWh	E_{line} /kWh
S1	98.55	45.115	20.82	25.48	7.135
S2	98.55	46.221	19.946	25.31	7.073
S3	98.55	46.154	22.33	23.08	6.986

表 5 节能量比较

Tab.5 Energy comparison

案例	E_{sub} /kWh	ΔE_{ess} /kWh	e [%]
S0	121.80	/	/
S1	109.5	5.74	14.81
S2	108.4	4.87	15.00
S3	108.6	7.27	16.81

4 结论

本文基于现有的针对城轨交通混合储能装置控制策略中集中式稳压控制存在的局限性, 提出基于并行双环结构的控制策略, 并对电池和超级电容电压外环指令值进行设计。通过建模和仿真分析, 结果表明所提出的新型控制策略, 相较于基于电池优先的集中式稳压控制, 能量损耗减少 2.4kWh, 节能率提高 2.0%, 整体提高了储能装置的工作性能。后续, 将根据本文所提控制策略, 结合放电曲线的设计, 进行多目标优化, 进一步提高混合储能装置的工作性能。

参考文献

- [1] 曹志超,袁振洲,李得伟,张思林.城市轨道交通跨站越行模式的开行方案优化 [J]. 铁道学报,2017,39(11):15-22.
Cao Zhichao, Yuan Zhenzhou, Li Dewei, Zhang Silin. Optimization of Stop-skip Train Operation Scheme for Urban Rail Transit [J]. Journal of the China Railway Society,2017,39(11):15-22.
- [2] 杨晓峰,薛皓,郑琼林.基于双向可变电阻模块的杂散电流与轨道电位动态模拟系统 [J]. 电工技术学报,2019,34(13):2793-2805.
Yang xiaofeng, Xue Hao, Zheng Qionglin. Stray Current and Rail Potential Dynamic Simulation System Based on Bidirectional Variable Resistance Module[J]. Transactions of China Electrical Technology, 2019,34(13):2793-2805.
- [3] 杨安安,汪波,陈艳艳,黄建玲.我国城市轨道交通多模式运营研究 [J]. 都市快轨交通,2017,30(06):99-103.
Yang Anan, Wang Bo, Chen Yanyan, Huang Jianling. Multi-mode Operation for Urban Rail Transit in China [J]. Urban rapid rail transit,2017,30(06):99-103.
- [4] 王大杰,孙振海,陈鹰,李胜飞,赵思锋,温海平.1 MW 阵列式飞轮储能系统在城市轨道交通中的应用 [J].

- 储能科学与技术,2018,7(05):841-846.
- Wang Dajie, Sun Zhenhai, Chen Ying, Li Shengfei, Zhao Sifeng, Wen Haiping. Application of Array 1 MW Flywheel energy storage system in Rail Transit [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012,7(05):841-846.
- [5] Ibrahim H , Ilinca A , Perron J . Energy storage systems—Characteristics and comparisons[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008(5):1221-1250.
- [6] Chen Y , Zhang X , Huang Z , et al. A hybrid model predictive charging control strategy for ultracapacitors of urban rail vehicles[C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2016.
- [7] Hayashiya H, Abe S, Iino Y, et al. Proposal of a novel control method of Li-ion battery system for regenerative energy utilization in traction power supply system[C]//2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, 2016: 298-303.
- [8] Ciccarelli F, Iannuzzi D, Spina I. Comparison of energy management control strategy based on wayside ESS for LRV application[C]// IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013:1548-1554.
- [9] Ding K , Li F , Zhang X . Power Smoothing Control of DC Microgrid Hybrid Energy Storage System Based on Fuzzy Control[C]// 2019 Chinese Control Conference (CCC). 2019.
- [10] 涂春鸣,黄红,兰征,孟阳,肖凡.微电网中电力电子变压器与储能的协调控制策略[J].电工技术学报,2019,34(12):2627-2636.
- Tu Chunming, Huang Hong, Lan Zheng, Meng Yang, Xiao Fan. Coordinated Control Strategy of Power Electronic Transformer and Energy Storage in Microgrid[J]. Transactions of China Electrical Technology,2019,34(12):2627-2636.
- [11] Bocklisch T, Böttiger M, Paulitschke M. Multi-storage Hybrid System Approach and Experimental Investigations[J]. Energy Procedia,2014,46:186-193.
- [12] Chen L, Deng Z, Xu X. Two-Stage Dynamic Reactive Power Dispatch Strategy in Distribution Network Considering the Reactive Power Regulation of Distributed Generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(2): 1021-1032.
- [13] 秦强强,张骅,李宇杰,林飞,杨中平.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, Lin Fei, Yang Zhongping. Research on Time-Phased Control Strategy of Urban Rail Ground Hybrid Energy Storage Device Based on Train Operation Status[J]. Transactions of China Electrical Technology,2019,34(S2):760-769.
- [14] 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):135-144.
- 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 Electrical Technology, 2019, 34(03):135-144.
- [15] Qin Q, Guo T, Lin F, Yang Z. Energy Transfer Strategy for Urban Rail Transit Battery Energy Storage System to Reduce Peak Power of Traction Substation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11714-11724.
- [16] Zhu F, Yang Z, Lin F, Xin Y. Decentralized Cooperative Control of Multiple Energy Storage Systems in Urban Railway Based on Multiagent Deep Reinforcement Learning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9368-9379.

作者简介

陶孝涛 女, 1995 年生, 硕士, 研究方向为城市轨道交通储能技术研究。

E-mail: 18121496@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)