

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180773

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

秦强强¹ 郭婷婷² 林飞¹ 杨中平¹ 熊师¹

(1. 北京交通大学电气工程学院 北京 100044

2. 北京海博创源科技有限公司 北京 100089)

摘要 电池储能系统用于城轨交通中可有效回收列车剩余再生制动能量,抑制直流网电压波动。基于城轨交通负载特性和电池高能量密度特性,提出基于能量转移的放电阈值动态调整策略,利用电池将城轨运行低峰期和平峰期回收的制动能量部分转移到高峰期,在节能的同时可有效减少牵引变电所的峰值功率,降低牵引变电所的建设容量以及成本。结合所提控制策略以及仿真模型,利用智能算法,以经济效率和峰值功率减小率作为目标函数对能量管理策略控制参数和容量配置结果进行优化,提高储能装置性能,同时对不同权重系数的优化结果进行分析,为不同目标需求下权重系数设置提供理论依据。

关键词: 城轨交通 电池储能 能量转移 容量配置 峰值功率减小率

中图分类号: U264.91+6; TM911

Optimal Research for Energy Management and Configuration of Battery ESS in Urban Rail Transit Based on Energy Transfer

Qin Qiangqiang¹ Guo Tingting² Lin Fei¹ Yang Zhongping¹ Xiong Shi¹

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

2. Beijing Hyperstrong Technology Co. Ltd Beijing 100089 China)

Abstract The battery energy storage system used in urban rail transit can effectively recover the residual regenerative braking energy of trains and suppress the voltage fluctuation of DC network. Based on the characteristics of urban rail transit load and the high energy density of the battery, a strategy of dynamic adjustment of discharge threshold based on energy transfer is proposed in this paper. The braking energy recovered in the low peak period and flat peak period of urban rail operation is transferred to the peak period by using batteries. So that the peak power of traction substation can be effectively reduced, the construction capacity and cost of traction substation can be reduced at the same time. In order to improve the performance of energy storage device. Combined with the proposed control strategy and simulation model. Economic efficiency and peak power reduction rate are taken as objective functions to optimize energy management strategy control parameters and capacity configuration results using an intelligent algorithm. Meanwhile, the optimization results of different weight coefficients are analyzed to provide theoretical basis for setting weight coefficients under different objective requirements.

Keywords: Urban rail transit, battery energy storage, energy transfer, capacity configuration, peak power reduction

国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201105)。

收稿日期 2018-05-03 改稿日期 2019-01-01

0 引言

地铁具有运量大、速度快、安全准时等优点，对城市轨道交通发展起到越来越重要的作用。将电池储能系统安装于地铁供电系统，可以有效回收列车再生制动能量和抑制直流网电压波动^[1-3]。

目前，电池储能系统在城轨交通上已得到实际应用，如日本东武铁道、古町线、名古屋铁路、湖西线北陆本线、鹿儿岛谷山线、神户市西神-山手线、青梅线、东武野田线；韩国地铁 5 号线；意大利米兰地铁 3 号线、罗马火车站-机场线；美国费城等^[1-6]。

近年来，国内外学者针对城轨交通电池储能系统在能量管理和容量配置等方面展开了广泛深入的研究。文献[5-7]研究了地面式电池储能系统的能量管理策略。其中文献[5]采用固定充放电阈值策略，为了防止多次充放电不平衡导致电池过充或过放，在储能系统待机期间进行小电流充/放电，调整电池荷电状态 (State of Charge, SOC)，将其维持在某一值附近，但这种不必要的充放电会加速电池寿命衰减；考虑电池的寿命，文献[6]提出动态阈值策略，根据电池的 SOC 调整储能系统的放电阈值 (V-SOC 控制)，将电池 SOC 控制在某一范围；文献[7]中，通过分析电池的充电特性，提出了一种最大功率点跟踪的控制策略 (I-SOC 控制)，根据电池 SOC 调整电池的最大放电电流，使电池 SOC 维持在最大功率点附近，在相同的容量配置下，可增大储能系统的节能效果。对于如何确定电池储能系统在城轨交通供电系统安装的位置及其容量，即容量配置优化问题，也有学者做了相应研究，文献[8-9]根据离线测得的城轨交通变电所的日负荷曲线，在实现削峰填谷的前提下，以经济效率为优化目标函数，对电池储能系统配置进行优化。

然而上述研究依然存在一些不足。一是未能充分考虑电池储能系统本身的特点，与超级电容等功率型元件不同^[10-15]，锂电池储能系统除了可以回收剩余再生制动能量之外，其高能量密度使其在长供电区间或发车密度较高时还可以为列车提供牵引能量，改善供电网电压跌落明显的问题，降低牵引变电所的设计容量。二是储能系统的能量管理策略和容量配置优化方案是相互影响的，在不同的能量管理策略下，电池储能系统最优的容量配置方案是不同的，同时优化电池储能系统的能量管理策略和容量配置方案，正是本文的研究重点。

本文首先建立了包含列车和电池储能系统的城

轨交通供电系统仿真平台，结合城轨交通负载特性和电池高能量密度特性，提出基于能量转移的改进能量管理策略。最后采用智能优化算法以及结合搭建的地铁供电系统仿真平台，同时优化电池储能系统的能量管理策略控制参数和容量配置方案。

1 动态阈值控制策略

1.1 城轨交通供电系统仿真平台

考虑电池储能系统的地铁供电系统仿真平台如图 1 所示，包括列车运行模块 TPS、直流线网潮流仿真模块 DC-RLS、电池储能系统模块 BESS。其中 TPS 根据输入的线路参数、车辆参数输出上、下行列车的位置及电功率等，BESS 模块可设置储能系统的能量管理策略和容量配置方案。DC-RLS 模块主要是模拟线路上多列车的运行工况，通过潮流解析得到每个时刻变电所的电压、电流和储能系统的充放电功率，为电池储能系统容量配置提供依据。

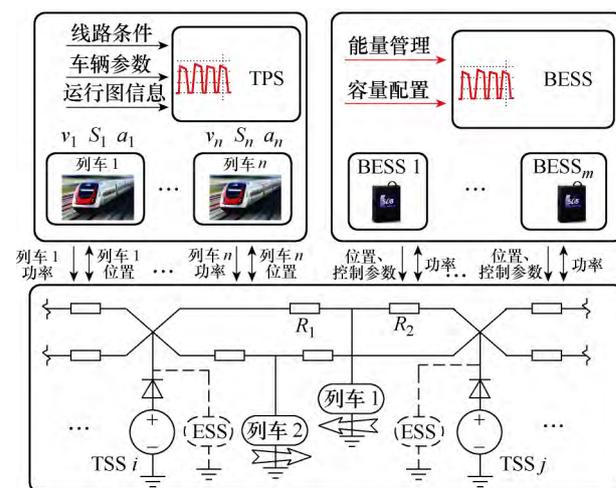


图 1 直流供电系统仿真平台

Fig.1 Equivalent model of DC traction power system

电池储能系统由电池和双向 DC-DC 变换器组成，采用传统的双闭环控制，其控制框图如图 2 所示^[5]，储能系统实时检测牵引变电所电压 U_{sub} ，当其高于充电阈值 U_{char} 时，储能系统开始充电；当其低于放电阈值 U_{dis} 时，储能系统开始放电；当其处

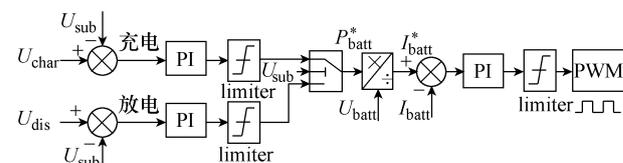


图 2 电压电流双环能量管理策略

Fig.2 Current-voltage dual-loop control strategy

于充放电阈值之间时,储能系统不动作。其中 P_{batt}^* 为电池充放电功率指令, U_{batt} 为电池电压, I_{batt}^* 为电池电流指令, I_{batt} 为电池电流, PWM 为控制输出。

1.2 基于能量转移的放电阈值动态调整策略

传统控制策略中,为了防止储能系统充放电不平衡造成电池过充或过放,常根据电池 SOC 调整充放电阈值,当 SOC 较高时,增大充/放电阈值,使储能系统更容易放电;当 SOC 较低时,充/放电阈值减小,使储能系统更容易充电^[6],从而将电池的 SOC 维持在某一较小的范围。

城市轨道交通负载与发车间隔密切相关^[8],在不同的发车间隔下,线路上同时运行的列车数量为 $n = \text{floor}(T/T_d) \sim \text{ceil}(T/T_d)$,其中 T 为全线运行时长, T_d 为列车实际发车间隔, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整函数, $\text{ceil}(\cdot)$ 为向上取整函数。在不同发车间隔下,一个发车间隔内,列车总的牵引能量和制动能量一定,与一列车从起始站运行到终点站的牵引能量和制动能量相同。在低峰期,线路上同时运行的列车数量较少,功率需求较小,列车间的交互能量较少,变电所输出功率较小,剩余的再生制动能量较多,变电所输出能量较少;高峰时段恰好相反,变电所输出能量和功率较大,列车剩余再生制动能量较少。

考虑城轨交通的负载特性,如果能够充分利用电池的高能量密度特性,将储能系统在低峰期回收的再生制动能量部分转移到高峰期,增大储能系统在高峰期的放电量 E_d ,可有效减少变电所在高峰期的输出能量与峰值功率,减少新建线路的变电所数量及其容量,增加变电所之间的距离,降低变电所建设成本。

为了保证剩余再生制动能量的有效吸收,充电阈值固定不变,本文只动态调节放电阈值。电池的剩余放电量与电池的 SOC 变化趋势相同,因此可以通过控制 SOC 实现能量的转移。改进控制策略如图 3 所示,主要分为放电阈值调整模块和 SOC_{ref} 动态调整模块两部分。

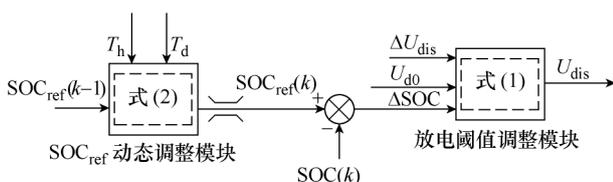


图 3 基于能量转移的放电阈值动态调整策略

Fig.3 Dynamic adjustment strategy for discharge threshold based on energy transfer

放电阈值动态调整模块主要是根据电池 SOC 与 SOC_{ref} 的差值 ΔSOC 对放电阈值进行动态调整,如式 (1) 所示。

$$U_{dis}(k) = \begin{cases} U_{dis0} & \Delta\text{SOC} > a_2 \\ U_{dis0} - \frac{k_2}{\Delta\text{SOC}(k)} & 0 < \Delta\text{SOC} \leq a_2, k_2 \geq 0 \\ U_{sub} - a_3 & \Delta\text{SOC} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$U_{dis0} = U_{d0} - \Delta U_{dis}$$

$$\Delta\text{SOC}(k) = \text{SOC}(k) - \text{SOC}_{ref}(k)$$

$$\text{SOC}_{min} \leq \text{SOC}_{ref}(k) \leq \text{SOC}_{max}$$

式中, U_{dis0} 为放电阈值初始值,随着空载电压的波动与发车间隔的改变而变化; ΔU_{dis} 为待定参数,与列车发车间隔有关; a_2 为 ΔSOC 的判断阈值; a_3 为固定余量值; $\text{SOC}_{ref}(k)$ 为 k 时刻 SOC 参考值; SOC_{min} 、 SOC_{max} 为电池 SOC 下限和电池 SOC 上限,当 $\text{SOC} > \text{SOC}_{max}$ 时,禁止储能系统充电;当 $\text{SOC} < \text{SOC}_{min}$ 时,禁止储能系统放电;当 $\text{SOC}_{min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{max}$ 时,储能系统正常充放电; k_2 为放电阈值减小斜率。

当 $\Delta\text{SOC} > a_2$ 时,放电阈值保持恒定, $U_{dis} = U_{dis0}$; 当 $0 < \Delta\text{SOC} \leq a_2$ 时, U_{dis} 根据放电阈值 U_{dis0} 和 ΔSOC 动态调整 $U_{dis} \leq U_{dis0}$,随着 ΔSOC 的减小放电阈值 U_{dis} 减小,逐步减小储能系统的输出;当 $\Delta\text{SOC} \leq 0$ 时,使 $U_{dis} < U_{sub}$,储能系统退出工作。通过调整放电阈值 U_{dis} 限制储能系统的放电量 E_d ,使 SOC 能够动态跟踪 SOC_{ref} 。

SOC_{ref} 动态调整模块主要通过给定 SOC 参考值 SOC_{ref} 控制从低峰期转移到高峰期的能量。实际城轨线路列车的发车间隔 T_d 是提前确定好的,基于不同时刻的发车间隔 T_d 以及当前发车间隔的剩余持续时间 T_h 都能通过通信实时获得,因此 SOC_{ref} 可根据列车的发车间隔 T_d 及其持续时间 T_h 确定,如式 (2) 所示。

$$\left\{ \begin{aligned} & \text{SOC}_{ref}(k) = \text{SOC}_{ref}(k-1) + k_1 \Delta t \\ & k_1 = \left[\text{SOC}_{ref}^{end} - \text{SOC}_{ref}(k-1) \right] / T_h / \Delta t \\ & \text{SOC}_{ref}^{end} = \begin{cases} \text{SOC}_{max} - a_1 & \text{高峰} \\ \text{SOC}_{max} - a_1 & \text{平峰} \\ \text{SOC}_{min} & \text{低峰} \end{cases} \\ & \text{SOC}_{min} \leq \text{SOC}_{ref}(k) \leq \text{SOC}_{max} - a_1 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, $\text{SOC}_{ref}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的 SOC 参考值; $\text{SOC}_{ref}(k)$

为 k 时刻 SOC 参考值; k_1 为 SOC_{ref} 变化斜率; Δt 为 SOC_{ref} 更新时间; SOC_{ref}^{end} 为当前发车间隔下期期望的 SOC_{ref} 的终值。变化斜率 k_1 根据 $SOC_{ref}(k-1)$ 和 SOC_{ref}^{end} 以及当前发车间隔的剩余持续时间 T_h 实时更新, 避免了一天之内 SOC_{ref} 初值不同或者发车间隔的调整对能量转移的影响。此模块保证在低峰期/平峰期结束时, 电池存储尽可能多的能量; 在高峰期结束时, 电池存储的能量有效释放。为了防止 SOC_{ref} 过高影响剩余再生制动能量的回收, 这里将 SOC_{ref} 工作范围限定在 $SOC_{min} \sim SOC_{max}$, 小于实际的 SOC 工作区间, 阈量为 a_1 。

2 电池储能系统容量优化模型

改进控制策略下, 储能系统配置的容量及电池允许的最大放电深度 (Depth of Discharge, DOD) D_{max} (SOC 的使用范围 $SOC_{min} \sim SOC_{max}$) 会影响从低峰期转移到高峰期的能量, 决定峰值功率的减小率, 同时, 放电深度会影响电池的使用寿命, 间接决定了电池储能系统的经济性。因此本文以峰值功率减小率和经济效率为优化目标优化电池储能系统的容量、能量管理策略参数以及电池的放电深度 D 。

2.1 电池使用寿命预测模型

电池储能系统的使用寿命是其投资成本分析的重要参数, 与超级电容相对固定的使用寿命不同, 有限循环次数的 BESS 使用寿命与其工作环境温度、放电深度等因素密切相关。在改进控制策略下, 电池的放电深度对峰值功率减小率的影响很大, 因此为了简化问题、突出关键点, 本文建立了考虑放电深度的寿命模型, 估算电池实际工作过程中的寿命。

电池最大充放电次数与放电深度 D 关系式为

$$N_a = N_r \left(\frac{D_r}{D_a} \right)^\alpha e^{\beta \left(1 - \frac{D_a}{D_r} \right)} \quad (3)$$

式中, D_r 为额定放电深度, 对应的循环使用次数为 N_r ; D_a 为实际放电过程的放电深度, 对应的循环使用次数为 N_a ; α 、 β 为拟合系数。

在实际运行过程中, 电池的充放电模式是不规则的, 放电深度实时变化, 因此这里采用雨流计数法 (塔顶法) [5], 统计储能系统在实际工作过程中的放电深度。假设电池一天中的循环周期数为 T , 每个循环周期对应的放电深度分别为 D_1, D_2, \dots, D_T , 对应的循环次数分别为 N_1, N_2, \dots, N_T , 则电池的寿命计算公式为

$$L_{loss} = Z \sum_{t=1}^T \frac{1}{N_t} \quad (4)$$

$$Y_b = \text{floor} \left(\frac{1}{365 L_{loss}} \right) \quad (5)$$

式中, Y_b 为电池的寿命; L_{loss} 为电池一天的寿命损耗; Z 为周期数, 全周期取 1, 半周期取 0.5。电池寿命的详细计算流程如图 4 所示。

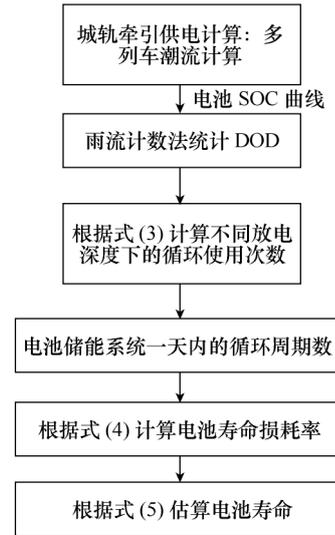


图 4 电池寿命估算流程

Fig.4 Battery life cycles estimation flow chart

2.2 经济效率

BESS 投资成本为

$$Cost_i = \begin{cases} 0 & n_b = 0 \\ (C_1 + P_i \theta) CRF(r, Y_b) + k_v P_i & n_b > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$CRF(r, Y_b) = \frac{r(1+r)^{Y_b}}{(1+r)^{Y_b} - 1} \quad (7)$$

式中, $Cost_i$ 为安装在第 i 个牵引变电所的电池储能系统投资成本。并联数 $n_b=0$ 表示此站不设置储能系统, 若 $n_b>0$, 则储能系统的投资成本包含三部分, $P_i \theta$ 表示投资成本中与电池储能系统配置功率正相关的部分, θ 为双向 DC-DC 变换器和电池的单位功率成本; P_i 为第 i 个牵引变电所储能系统的配置功率; C_1 为投资成本中与 BESS 配置不相关的部分, 包括断路器等连接设备, 以及 BESS 的人工安装、场地费用; k_v 为单位功率年运行维护费用; CRF 为等投资年值; r 为贴现率。

节能带来的收益 F_R 为

$$F_R = (E_{sub} - E_{sub}^{ess}) \times 365 y_1 \quad (8)$$

式中, E_{sub} 为未安装 BESS 时变电所输出能量; $E_{sub}^{css}(k)$ 为安装 BESS 后不同发车间隔下变电所输出能量; y_1 为不同时刻电价。能量转移带来的收益 F_T 为

$$F_T = E_t \Delta y \tag{9}$$

式中, E_t 为从高峰期转移到低峰期的能量; Δy 为高峰期与低谷期的电价差。

同时考虑节电量、投资成本和电价等因素, 评估函数经济效率 e 定义为

$$e = \frac{F_R + F_T - \sum Cost_i}{E_{sub} \times 365 y_1} \times 100\% \tag{10}$$

2.3 峰值功率减小率

在高峰期, 同时运行的列车数量较多, 功率需求较大, 变电所输出功率与能量较大, 电池储能系统的加入, 在改进控制策略下可有效削减变电所输出功率峰值, 提高供电系统负载能力。本文提出峰值功率减小率来定量评估电池储能系统改善城轨供电系统直流网压跌落的效果, 即

$$R = \frac{1 - \sum_{i=1}^{N_s} P_{subess}^{peak}(i)}{\sum_{i=1}^{N_s} P_{sub}^{peak}(i)} \times 100\% \tag{11}$$

式中, $P_{subess}^{peak}(i)$ 为加入 BESS 后变电所 i 的输出功率峰值; $P_{sub}^{peak}(i)$ 为未安装 BESS 时变电所 i 的输出功率峰值。

2.4 优化目标函数 ObjV

经济效率 e 和峰值功率减小率 R 这两个评估函数, 可以定量评价电池储能系统能量管理策略和容量配置方案在两个不相关角度分别取得的效果。对于不同类别或工况下的城市轨道交通线路, 这两个评估函数受重视程度不同。例如, 对于地铁供电系统, 由于牵引变电所站间距较小、供电系统负载能力大、列车制动能量可观, 电池储能系统安装于地铁供电系统, 优化的目标更侧重于增大经济效率 e 。而对于城轨地铁或有轨电车, 站间距较大, 供电能力较差, 通过引入电池储能系统可以减少变电所输出功率峰值, 保证直流网可靠运行, 因此它们的优化目标更注重增大峰值功率减小率 R 。本文通过引入权重系数 ω 来设定优化目标函数 $ObjV$ 统一表示经济效率 e 和峰值功率减小率 R , 即

$$ObjV = \omega e + (1 - \omega)R \tag{12}$$

式中, ω 为经济效率 e 的权重系数。对于不同类别或工况下的城市轨道交通线路, ω 值会根据优化目

标的侧重点进行调整。

3 算例分析

3.1 遗传算法 (GA)

每种优化算法都有其独有优势, 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 能更好地处理约束, 更容易得到全局最优解的特点, 因而被广泛应用。为了得到不同权重系数下最优的容量配置, 本文采用遗传算法优化电池储能系统能量管理控制参数和容量配置方案。

优化变量为

$$X = [\Delta u_{dis1} \ \Delta u_{dis2} \ \Delta u_{dis3} \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4 \ D_5 \ D_6 \ D_7] \tag{13}$$

式中, 前 3 个参数决定电池储能系统在不同发车间隔下的放电阈值; 后 14 个参数分别代表安装在 7 个牵引变电所的电池储能系统模组并联数 x_i 以及电池的最大放电深度 D_i 。

遗传算法优化流程如图 5 所示, 遗传算法不断优化变量, 并输入城轨交通供电系统仿真平台, 经过仿真得到对应的目标函数, 并由此进行下一代优化。随着遗传代数的不断增长, 遗传算法可以得到最大目标函数, 并得到电池储能系统最优的能量管理策略参数和容量配置方案。

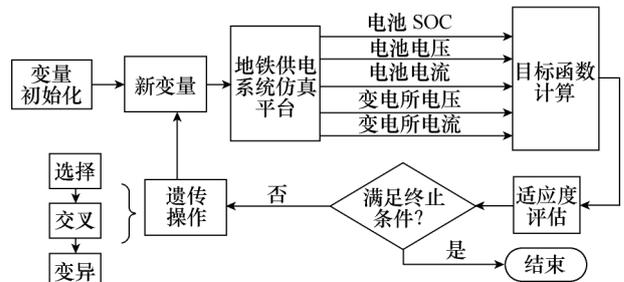


图 5 遗传算法优化流程

Fig.5 Diagram of the control parameters optimization

本文中, 对电池储能系统能量管理策略参数和容量配置方案的优化通过寻找最大的目标函数来实现, 因此把目标函数 $ObjV$ 作为个体的适应度值。目标函数值越大, 适应度值越大, 个体越优。由控制策略可知, 电池配置得越大, 放电深度 D 设置得越大, 峰值功率减小率越好, 但储能系统的经济性会较差, 为了防止 ω 较小时, 储能系统亏损, 适应度计算式为

$$Fitness[X] = \begin{cases} ObjV[X] & e \geq 0 \\ 0 & e < 0 \end{cases} \tag{14}$$

式中, $ObjV[X]$ 代表电池储能系统能量管理策略参

数和容量配置方案由 X 染色体的参数组决定时取得的目标函数。

3.2 约束条件

系统仿真时，充放电阈值的约束条件为

$$\begin{cases} U_{oc} < U_{char} < U_{st} \\ U_{min} < U_{dis} < U_{oc} \end{cases} \quad (15)$$

式中， U_{oc} 为整流机组的空载电压； U_{min} 为直流母线的理论最低电压值； U_{st} 为制动斩波器的起动电压。

为防止电池过充或过放，电池最大放电深度 D_{max} 的约束条件

$$0 \leq D_{max} \leq 0.6 \quad (16)$$

电池的 SOC 工作范围为

$$0.5 - \frac{1}{2} D_{max} \leq SOC \leq 0.5 + \frac{1}{2} D_{max} \quad (17)$$

4 仿真研究

为了验证上述所提控制策略的有效性和可行性以及分析遗传算法的优化效果，本文进行了系统性的仿真分析。

4.1 能量转移控制策略仿真验证

4.1.1 仿真条件

本文基于北京地铁实际线路数据，建立了包含 7 个牵引变电所多列车运行模型。牵引变电所的位置见表 1，上下行同时运行，每天运行 19h，列车的发车间隔随着客流量的变化而变化，经统计其中约 5.0h 处于 600s 低峰工况，约 6.5h 处于 450s 平峰工况，约 7.5h 处于 150s 高峰工况。

表 1 线路参数

Tab.1 Line parameters

牵引变电所	站间距/km
1	0
2	1.93
3	4.08
4	6.39
5	8.51
6	11.20
7	13.97

电池选取 MICROVAST 公司的电池单体 (MV06203127NTP) 串并联构成，其电气参数见表 2。为了便于双向 DC-DC 变换器的设计，电池模组串联后端电压需小于直流供电网电压（空载电压为 836V），所以选择电池端电压为 500V，即选取电池串联数为 216，并由并联数 n 决定电池的功率。

表 2 电池 (MV06203127NTP) 参数

Tab.2 Battery (MV06203127NTP) parameters

参数	数值
额定电压/V	2.3
额定持续电流/A	30 (3C)
内阻/ Ω	0.018
容量/(A·h)	10
额定持续功率/W	69
能量/(W·h)	23

4.1.2 仿真结果

图 6c~图 6h 为不同发车间隔改进控制策略下储能系统的 SOC 和放电阈值曲线，与图 6a 和图 6b 相比可以看出，储能系统的放电阈值根据电池 SOC

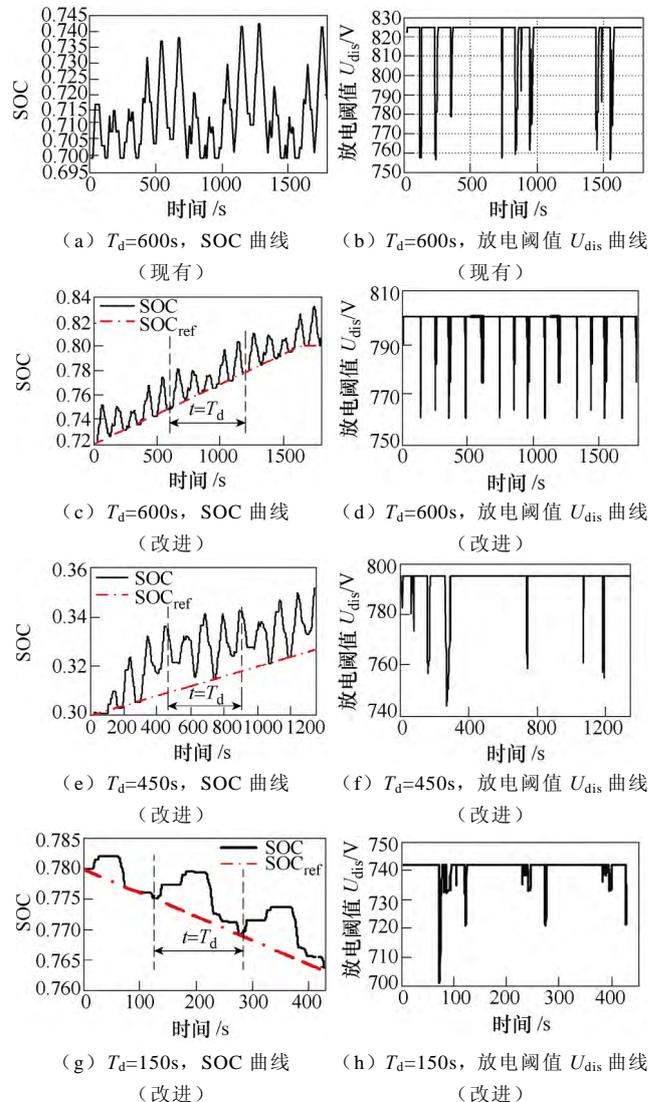


图 6 不同策略下不同发车间隔的储能系统 SOC 和放电阈值

Fig.6 Curves of SOC and SOC_{ref} under different headways at different strategies

与 SOC_{ref} 实时调整, SOC 可动态跟踪 SOC_{ref} , 低峰期减少电池放电容量, 将部分剩余再生制动能量进行存储。高峰期增加放电容量, 从而实现能量从低峰期到高峰期的转移。

图7为发车间隔150s时变电所3在不同控制策略的输出功率曲线, 其中点画线为未安装 BESS 时变电所输出, 虚线为传统的固定 SOC_{ref} 策略下的变电所输出, 实线为改进控制策略变电所输出(仿真过程只在变电所4加入2MW功率等级的电池储能系统)。通过结果对比可以明显看出本文提出的改进控制策略能明显地减小高峰期时牵引变电所的峰值功率, 进而减小变电所的设计容量。表3列出了典型发车间隔不同策略下储能系统的充电量 E_c 、放电量 E_d 和峰值功率。改进控制策略下由于高峰期可释放的能量增加, 储能系统的放电时间和放电功率均增大, 与现有控制策略相比, 变电所峰值功率减小了590kW, 改善率约为16.3%, 与无储能系统相比, 峰值功率减小了1110kW。改进控制策略下由于低峰/平峰期的放电量 E_d 减少, 变电所峰值功率略有增加, 但与高峰期的峰值功率相比, 可以忽略。

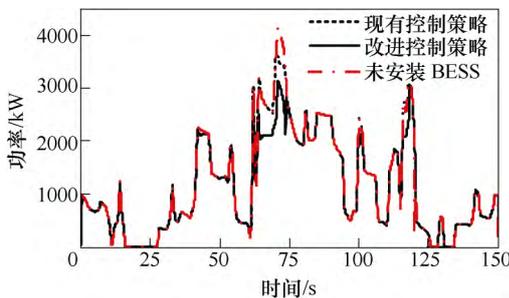


图7 高峰期不同控制策略下变电所输出功率比较

Fig.7 Substation's output power under traditional control strategy and improved control strategy

表3 典型发车间隔下不同控制策略比较

Tab.3 Different control strategy at typical headways

控制策略	发车间隔 T_d/s	$E_c/(kW \cdot h)$	$E_d/(kW \cdot h)$	峰值功率/kW	改善效果(%)
现有	150	3.47	3.39	3 620	12.56
	450	146.15	140.32	1 283	27.92
	600	124.23	120.64	1 322	26.14
改进	150	3.47	6.87	3 030	26.8
	300	40.25	42.33	1 924	21.79
	600	124.23	103.44	1 455	18.72

4.2 GA 优化分析

4.2.1 GA 优化条件

遗传算法相应参数主要是根据专家经验以及综

合考虑计算时间与计算精度问题进行设定, 最终设定值见表4, 其中 NIND 为种群大小, MAXGEN 为遗传代数, P_c 为交叉概率, P_m 为变异概率, GGAP 为种群代沟。

表4 遗传算法相应参数

Tab.4 GA's parameters

NIND	MAXGEN	P_c	P_m	GGAP
100	100	0.7	0.015	0.95

在优化目标经济效率 e 计算过程中, 相应参数见表5。

表5 经济效益相关参数

Tab.5 Parameters related to economic benefits

参数	数值
单位功率成本 θ (元/kW)	10 000
单位功率年运行维护费用 k_v (元/kW)	1 500
固定费用 C_1 /元	500 000
贴现率 r (%)	10
拟合系数 α, β	0.19, 1.69
电价 y_1 /(元/(kW·h))	0.7, 1.2

4.2.2 GA 优化结果

图8是遗传算法优化下 $\omega=0.5$ 时每代最优目标函数变化图, 可以看出第43代开始, 目标函数不再变化, 对应的控制参数即为最优解。

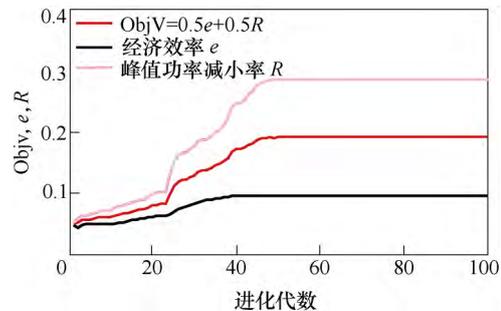


图8 $\omega=0.5$ 时目标函数迭代过程

Fig.8 The iteration process of the objective function at $\omega=0.5$

不同权重系数 ω 下的经济效率和峰值功率减小率见表6和如图9所示。权重系数 ω 从0逐渐增大到1时, 经济效率 e 从0逐渐增大到13.10%, 峰值功率减小率 R 从32.27%逐渐降低到16.56%。可以为不同城轨交通供电系统在提高公司运营效益、改善网压跌落以及选择合适的权重系数等方面提供一定参考帮助。例如, 对于地铁供电系统, 比较合适的选择范围是[0.7, 1], 可以更好地实现列车制动能量回收, 降低供电费用, 提高公司运营效益; 对于

有轨电车供电系统,比较合适的选择范围是[0, 0.6],可以更好地改善网压跌落状况,减少变电所输出功率峰值,提高供电能力。

表 6 不同权重系数 ω 下的经济效率和峰值功率减小率
Tab.6 Economic efficiency and peak power reduction at different weight factors ω

ω	ObjV	$e(\%)$	$R(\%)$
0	0.322 7	0	0.322 7
0.25	0.239 05	0.055	0.300 4
0.5	0.189 7	0.094 8	0.284 6
0.75	0.154 85	0.117 4	0.267 2
1	0.131 0	0.131 0	0.165 6

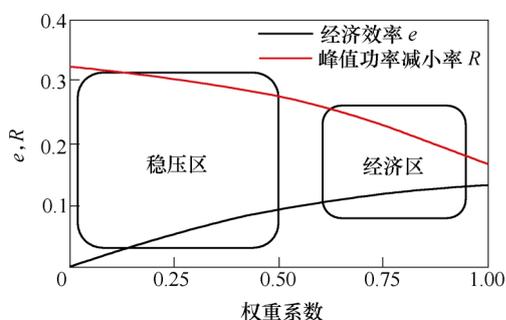


图 9 不同权重系数 ω 下的经济效率和峰值功率减小率
Fig.9 Economic efficiency and peak power reduction at different weight factors ω

电池储能系统在采用不同优化目标函数 (ω 不同)的前提下,最优的容量配置方案见表 7。从表 7 可以看出,随着 ω 增大,即经济效率的权重系数增大,电池储能系统在所有牵引变电所的配置容量整体上呈减小的趋势,并且只在部分特定的牵引变电所配置。相对于全线所有牵引变电所都配置超级电容储能系统的方式,只在部分特定的牵引变电所配置储能系统可以取得更高的经济效率。本文综合考

表 7 不同权重系数 ω 下的容量配置

Tab.7 Capacity configuration at different weight factors ω

ω	容量配置/kW						
	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6	站 7
0	900	1 860	2 040	1 800	1 440	1 680	1 020
0.25	780	1 650	1 860	1 470	1 170	1 410	780
0.5	480	1 380	1 380	900	840	960	390
0.75	0	960	1 020	660	420	720	0
1	0	660	780	540	0	600	0
1	0	660	780	540	0	600	0

虑经济效率与峰值功率建效率最终选择了 $\omega=0.75$ 作为最终配置结果。

表 8 和表 9 分别为不同权重下电池的最大放电深度和电池寿命。从表 8 和表 9 可以看出,随着 ω 的增大,储能系统的允许放电深度 D 逐渐减小,电池的寿命呈现先增大后减小的趋势。综合分析,当 ω 较小时,随着 ω 的增大,电池配置功率变化较小, D 减小,使得电池寿命有效延长,经济效率上升较快;当 ω 较大时,随着 ω 增大, D 虽然减小,但由于电池配置的功率迅速减小,造成电池利用率较大,因此寿命略有减小,导致经济效率变化比较平缓,与图 9 结果一致。

表 8 不同权重系数 ω 下电池的最大放电深度 D

Tab.8 Maximum discharge depth of battery at different weight factors ω

ω	最大放电深度 D						
	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6	站 7
0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.25	0.45	0.54	0.52	0.57	0.56	0.49	0.44
0.5	0.31	0.37	0.38	0.41	0.4	0.34	0.29
0.75	—	0.22	0.19	0.27	0.3	0.24	—
1	—	0.1	0.1	0.1	—	0.1	—

表 9 不同权重系数 ω 下电池寿命

Tab.9 Life cycles of battery at different weight factors ω

ω	寿命/年						
	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6	站 7
0	6.2	6.8	6.6	6.5	6.4	6.7	6.1
0.25	7.2	7.1	6.9	6.8	7.1	7.2	7.2
0.5	7.2	7.3	7.2	7.0	7.3	7.4	7.3
0.75	—	7.2	7.3	7.1	7.1	7.2	—
1	—	6.9	7.1	6.9	—	7.1	—

5 结论

本文首先建立了包含列车和电池储能系统的城轨交通供电系统仿真平台,综合考虑城轨交通负载特性和电池的高能量密度特性,提出了基于能量转移的放电阈值动态调整策略,减小了变电站峰值功率,降低建设成本。综合电池实际运行特性,考虑放电深度对电池使用寿命的影响,建立了电池寿命预测模型,用于评估储能系统经济效率。最后以经济效率和峰值功率减小率为目标函数,提出了基于遗传算法的可同时优化电池储能系统能量管理策略

参数和容量配置方案的方法,最后利用实际线路数据进行了仿真分析,为改善城轨列车制动能量回收和提高供电能力提供了支持。

参 考 文 献

- [1] Hayashiya H, Suzuki T, Kawahara K, et al. Comparative study of investment and efficiency to reduce energy consumption in traction power supply: a present situation of regenerative energy utilization by energy storage system[C]//IEEE Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014: 685-690.
- [2] 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.
- [3] Suzuki T, Hayashiya H, Yamanoi T, et al. Application examples of energy saving measures in Japanese DC feeding system[C]//2014 International Power Electronics Conference, Hiroshima, Japan, 2014: 1062-1067.
- [4] 胡斯登, 梁梓鹏, 范栋琦, 等. 基于 Z 源变换器的电动汽车超级电容-电池混合储能系统[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 247-255.
Husten, Liang Shupeng, Fan Dongqi, et al. Electric vehicle super capacitor-battery hybrid energy storage system based on Z source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 247-255.
- [5] Takashi Yamanoi, Shigeki Umeda, Yoshiaki Nakamura, et al. Field test of hybrid power supply system for DC electric railways[J]. West Japan Railway Company, Osaka, Japan, 2010.
- [6] Takahashi H, Tabata N, Ikarashi H, et al. Lithium ion battery application in traction power supply system[C]//2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014, DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980635.
- [7] Sadakiyo M, Nagaoka N, Ametani A, et al. An optimal operating point control of lithium-ion battery in a power compensator for DC railway system[C]//IEEE International Universities Power Engineering Conference, Upec 2007, Brighton, UK, 2007: 681-686.
- [8] Park J Y, Heo J H, Shin S, et al. Economic evaluation of ESS in urban railway substation for peak load shaving based on net present value[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2017, 12(2): 981-987.
- [9] Park J Y, Jung H, Kim H, et al. Capacity determination of ESS for peak load shaving based on the actual measurement of loads in the substation of urban railway[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2014, 63(6): 860-865.
- [10] Barrero R, Tackoen X, Mierlo J V. Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network[C]//2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, 2008: 1-8.
- [11] 夏欢, 杨中平, 杨志鸿, 等. 基于列车运行状态的城轨超级电容储能装置控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 16-23.
Xia Huan, Yang Zhongping, Yang Zhihong, et al. Control strategy of urban rail supercapacitor energy storage device based on train running state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 16-23.
- [12] 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究[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.
- [13] 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): 335-340.

Zhang Chunjiang, Dong Jie, Liu Jun, et al. Control strategy of battery and super capacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 335-340.

[14] Iannuzzi D, Pagano E, Tricoli P. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines[J]. Energies, 2013, 6(4): 1802-1820.

[15] 刘诗涵, 周羽生, 许振华, 等. 基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 9-15.

Liu Shihan, Zhou Yusheng, Xu Zhenhua, et al. Research on low voltage ride-through of permanent

magnet synchronous offshore wind power based on super capacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 9-15.

作者简介

秦强强 男, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通储能技术研究。

E-mail: 17121483@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.com (通信作者)

(编辑 郭丽军)