

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.1004

考虑列车运行位置的动态充放电阈值控制策略

于金海, 王 欣, 郭云龙

(湖南工业大学 交通与电气工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对列车在多客运站运行过程中, 牵引网电压波动剧烈、再生制动能量浪费严重以及线路损耗过高的问题, 提出了一种基于列车运行位置和车载超级电容荷电状态的动态调整充放电阈值方法。通过能量优先原则, 对系统的运行工况进行精确划分, 以实现稳定牵引网电压。此外, 为进一步减少牵引网的“阶跃”现象, 将一种基于 SOC 状态的电压阈值变化率策略, 与固定电压阈值变化率相比, 得出该策略能更有效地减少线路损耗。最后, 采用动态权重因子的粒子群对控制参数进行优化, 并由长沙列车数据求解得到帕累托最优解集。结果表明, 在相同控制参数下, 与其他控制策略相比, 该策略有效提高了系统的节能率和稳压性。

关键词: 再生制动能量; 列车运行位置; 荷电状态; 牵引网阶跃; 电压阈值变化率

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)01-0024-09

引文格式: 于金海, 王 欣, 郭云龙. 考虑列车运行位置的动态充放电阈值控制策略[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(1): 24-32.

Dynamic Charging and Discharging Threshold Control Strategy with Train Operating Position Taken into Consideration

YU Jinhai, WANG Xin, GUO Yunlong

(School of Transportation and Electrical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the severe voltage fluctuations in the traction network, which result in a significant waste of regenerative braking energy (RBE), and excessive line losses during the operation of trains at multiple passenger stations, a dynamic adjustment method has thus been proposed for the charge and discharge threshold based on the train operating position and the state of charge (SOC) of onboard supercapacitors. By applying the energy priority principle, the operating conditions of the system are precisely classified to achieve a stable traction network voltage. In addition, to further mitigate the “step” phenomenon in the traction network, a voltage threshold variation rate strategy, which is based on SOC, has thus been introduced. Compared with the fixed voltage threshold variation rate, the proposed strategy can more effectively reduce line losses. Finally, a particle swarm optimization algorithm with dynamic weight factors is employed to optimize control parameters, with the Pareto optimal solution set obtained by using data from trains operating in Changsha. The results indicate that, under the same control parameters, the proposed strategy significantly improves the system's energy-saving efficiency and voltage stability compared to other control strategies.

Keywords: regenerative braking energy; train operating location; state of charge (SOC); traction network step; voltage threshold change rate

收稿日期: 2025-01-24

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ50006, 2022JJ50074, 2023JJ50166)

作者简介: 于金海, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城轨储能系统能量管理策略优化,

E-mail: 2172642324@qq.com

通信作者: 王 欣, 女, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为轨道交通再生节能技术,

E-mail: wwangxin97@163.com

0 引言

随着我国经济的迅猛发展, 人们的出行需求日益增加。随之, 运营线路逐年增加。如表 1 所示, 城市轨道交通 (以下简称“城轨”) 已成为最重要的出行方式之一。由于客运站间距离短, 列车启停频繁, 导致列车牵引能耗占据了整个系统总能耗的 50% 左右, 因此, RBE (regenerative braking energy) 的回收具有巨大的潜力^[1-2], 为了有效利用 RBE, 储能系统得到了广泛应用^[3]。

表 1 中国内地城市已开通的城轨概况 (截至 2022 年初)
Table 1 Overview of urban rail transit opened in mainland China (as of early 2022)

城轨制式	应用城市数量 / 个	运营线路总长度 / km	占比 / %
地铁	38	6 302.79	79.00
轻轨	4	217.6	2.73
单轨	1	98.5	1.23
市域快轨	10	805.70	10.10
有轨电车	20	485.7	6.09
磁悬浮交通	3	57.90	0.72
APM	2	10.2	0.13

车载存储增加了车辆的质量和空间, 超级电容由于具有体积小、寿命长、耐温性好、充放电快等优点, 被应用于车载储能。超级电容作为能量中转站, 接入列车中, 通过其充放电行为, 可以有效平抑列车与牵引网的供需差异, 减少线路损耗。

城轨领域, V. I. Herrera 等^[4]提出了一种车载储能系统最小储能容量配置和最优回收功率目标的优化方法, 可快速回收 RBE 用于启动和加速。该方法可有效降低运营成本, 节约能源。但在现实中, 车载储能增加了质量和体积, 导致运行成本高。因此, 设计良好的能量管理策略控制储能系统的充放电, 使列车、牵引网和储能装置之间实现双向能量流动, 是一个可行的解决方案^[5]。综上所述, 能量管理策略对于城轨供电系统至关重要。

在控制策略方面, 最简单的方法是传统的固定阈值策略, 即根据专家经验选择相应的充放电阈值, 这种策略简单, 但节能效果较差。由于直流牵引供电网络具有时变性和非线性特性, 传统固定阈值策略往往不能实现最优的节能效果。事实上, 轨道交通有一个显著的特点: 运行线路的信息是事先全局可知的。因此, 可以基于已知线路信息、实际状态和实时数据, 设计储能元件的充放电阈值策略。秦强强^[6]提出了基于带超级电容的能量管理系统, 建立了牵引电源模型, 并结合列车运行状态, 采用制动电压跟随能量管

理策略。陈铭^[7]根据城轨供电系统的实际运行状况, 提出了一种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, 有效提高了列车制动时的节能性。此外, LIU H. J. 等^[8]针对采用电池与超级电容混合储能系统的有轨电车, 以列车运行过程中功率损耗最低为优化目标, 采用遗传算法优化不同系统工作模式下的电池与超级电容充放电阈值。

综上所述, 国内外学者对城轨系统运行能耗问题进行了广泛研究, 并取得了不少成果。但对于如何将列车运行特性与稳压性、最小化线路损耗相结合的能量管理策略研究, 仍存在一些不足^[9]。为此, 在以往研究的基础上, 对变电所、列车和储能系统之间的能量流动进行分析, 旨在实现 RBE 的最大利用, 设计了一种考虑列车运行位置和超级电容的动态充放电阈值能量管理策略。首先, 通过分析列车运行特性, 划分系统运行工况, 并确定与之相适应的充放电阈值; 然后, 根据超级电容的状态, 设计动态阈值的变化率, 提出了一种兼顾系统稳压性和节能性的能量管理策略; 最后, 建立系统参数的多目标优化模型, 采用改进的多目标粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 进行全局最优求解。基于长沙城轨线路参数进行算例分析, 通过对比不同策略的效果, 验证了所提策略的正确性和有效性。

1 系统结构和建模

为降低模型复杂性, 在参考以往研究的基础上^[10-11], 做出以下 5 个假设: 1) 列车运行方案与运行图编制参数已知; 2) 线路条件和列车牵引制动等特性已知; 3) 不考虑列车照明、风扇和空调等产生的辅助能耗; 4) 在区间内牵引网电阻变化与列车、站台之间的距离呈线性关系; 5) 不考虑温升效应对列车和储能系统的影响。

1.1 变电所 - 列车能量传递

在城轨供电系统中, 含有车载储能设备的列车运行时, 变电所从 10 kV/35 kV 交流电网获取交流电。通过整流机组降压整流后, 得到电压为 750/1 500 V 直流电, 为列车提供能量。为了有效利用系统的 RBE, 在列车上安装了由 DC/DC 转换器和超级电容组成的超级电容储能系统。基于单车运行场景, 为了分析系统的功率分布, 建立了一个等效模型, 如图 1 所示为单车系统等效电路, 左侧和右侧分别为变电所。整流输出电压随负载电流变化。变电所 G_1 和 G_2 等效模型为理想电压源 U_{oc1} 和 U_{oc2} 、内阻 R_{sub1} 和 R_{sub2} 、理想二极管三者串联组成, 而列车模型位于两个变电所之间。

由于车载储能系统吸收和释放能量时无需经过牵引网,传输损耗远小于牵引网供电系统。因此,在列车距离变电所较远时,优先使用车载储能系统吸收

和释放 RBE。然而,受限于车载储能系统的容量和功率等级,单独依赖车载储能系统并不能完全吸收 RBE;当车载储能系统达到其能力上限时,需要制动电阻协助配合。列车受电弓电压反映了列车的能量累积状态,因此可作为车载储能系统状态转移的依据。

当牵引列车距离变电所 G_1 较近时,如果 $P_G > P_T$, 仅由变电所 G_1 和 G_2 同时供电;如果 $P_G < P_T$, 变电所 G_1 和 G_2 继续供电,同时超级电容开始放电,此时 $U_T < U_{dis}$, 超级电容处于放电状态,主要由变电所 G_1 承担供电。

当列车距离变电所 G_1 较远,并且在变电所与客运站 (2, 3, ..., $i-1$) 之间时,变电所 G_1 和 G_2 同时减少供电量,主要由超级电容承担供电任务。此时, $U_T < U_{dis}$, 超级电容处于放电状态,以减少变电所远距离供电所带来的线路损耗。

当列车运行位置距离客运站 (2, 3, ..., $i-1$) 较近时,变电所 G_1 和 G_2 的供电与吸收能量减少,主要由超级电容承担供电和吸收能量任务。

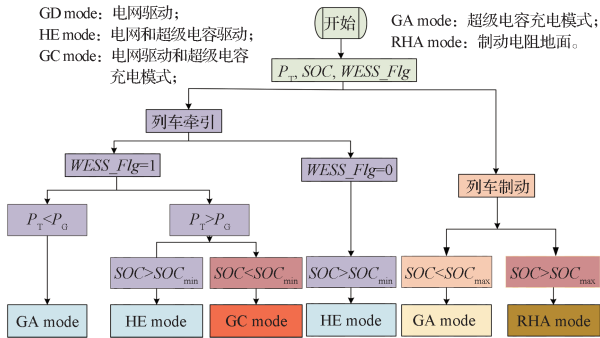


图4 车载储能系统能量管理策略状态机

Fig. 4 State machine of energy management strategy for vehicle energy storage system

2.3 动态阈值计算模块

考虑 SOC 状态的充放电阈值变化率,事实上,传统的能量管理策略中,当超级电容 SOC 达到 SOC_{min} 或 SOC_{max} 时,会因进入禁止工作状态而直接切断与牵引网的能量交换。充放电电流迅速截止,导致变电所电压和电流“阶跃”。这对城轨系统的稳定性、列车的安全运行以及牵引性能都会产生不良影响。为进一步减少牵引网“阶跃”现象,课题组提出了基于 SOC 状态的电压阈值变化率方法,其计算流程如图5所示。

在储能系统充放电过程中的阈值调节机制,以及充放电阈值与储能系统 SOC 的关系中,储能系统在充放电过程中, K 是核心的比例因子。它决定了在不同 SOC 阶段的电压变化量。阶梯单位 SOC 的增减量是固定值 (K_{min}),用于在特定的 SOC 区间内阈值变

化量的基准步长。 K 根据当前 SOC 状态进行调整,可以实现储能系统在充放电中电压的线性变化部分 (即 $a_2 < SOC \leq SOC_{max}$ 或者 $SOC_{min} < SOC \leq a_1$, a_1 和 a_2 为超级电容放电 SOC 阈值和充电 SOC 阈值) 中平滑过渡。

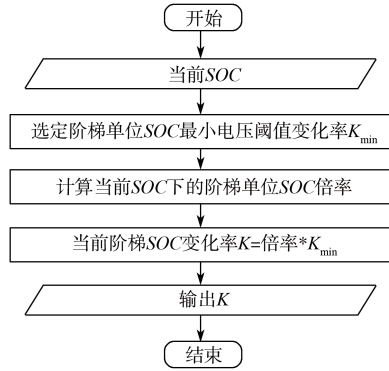


图5 电压阈值变化率计算流程

Fig. 5 Calculation flow of voltage threshold change rate

当 SOC 接近 a_1 和 a_2 时, K 值较小,充放电阈值的单位变化率也较小。

当 SOC 越来越接近 SOC_{min} 和 SOC_{max} 时, K 值增大,充放电阈值单位变化率变大。

这有助于在 SOC 较小时,超级电容充电功率增大,加快充电速度;而在 SOC 较大时,充电功率减小,充电电流平缓变化,从而减少“阶跃”现象,改善变电所电压和受电弓电压,优化充电过程和保护超级电容。通过动态调整放电阈值,可以协调储能系统和牵引网的能量流动;当储能系统 SOC 较大时,放电功率较大;而 SOC 较小时,放电功率较小,电流峰值降低,放电时间延长,从而有效降低了储能系统放电电流有效值和线路损耗。相同参数下,充放电阈值动态变化率与固定变化率对比如图6所示。

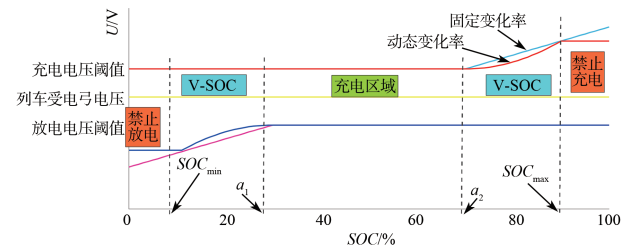


图6 充放电阈值动态变化率与固定变化率对比图

Fig. 6 Comparison chart of dynamic and fixed rate of change of charge and discharge threshold

系统实时监测列车位置和超级电容 SOC , 动态调整充放电阈值。通过反馈控制系统,在列车运行过程中,根据实际情况 (SOC 等) 对充放电阈值进行适当调整。

如图7所示,列车与变电所之间的距离 (d_0, d_1, d_2): d_1, d_2 分别表示列车到变电所 G_1 和 G_2 的距离,

d_0 代表线路总长, 计算方式如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} d_0 = |x_2 - x_1|, \\ d_1 = |x - x_1|, \\ d_2 = |x - x_2|. \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_1 为变电所 G_1 位置; x_2 为变电所 G_2 位置; x 为列车当前位置。

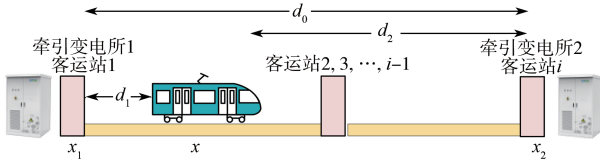


图 7 列车运行图

Fig. 7 Train operation diagram

定义两个放电阈值, 如式 (7) 所示, 分别针对变电所 G_1 和 G_2 , 阈值随着列车远离变电所而升高。

$$\begin{cases} V_{\text{discharge1}}(G_1) = V_{\text{refdis}} + k_0 \cdot \frac{d_1}{d_0}, \\ V_{\text{discharge2}}(G_2) = V_{\text{refdis}} + k_0 \cdot \frac{d_2}{d_0}. \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_{refdis} 为正常工况下基准放电阈值; k_0 为与距离正相关的控制参数。

列车在变电所 G_1 和 G_2 之间选择动态放电阈值, 如式 (8) 所示:

$$V_{\text{dis}} = \min(V_{\text{discharge1}}(G_1), V_{\text{discharge2}}(G_2)). \quad (8)$$

这一选择确保列车始终以最低的放电阈值运行, 列车运行位置的动态放电阈值计算与式 (7) 和 (8) 类似, 取 $V_{\text{char}} = \max(V_{\text{charge1}}, V_{\text{charge2}})$, 两个变电所中优先选择较近变电所供电。

为了最大限度地利用 RBE, 应尽量减少牵引网和列车间的能量交换, 避免牵引网释放和吸收能量。因此, 当客运站 (2, 3, ..., i-1) 接收到列车即将到达和离开本站的信号 ($WESS_Flg=1$) 时, 列车的充电阈值在原充电阈值上降低 K_{char} , 放电阈值在原放电阈值上增加 K_{dis} 。否则, 原充放电阈值保持不变, 以便列车能够存储和释放更多能量。

$$U_{\text{dis}} = \begin{cases} U_{\text{dis}} + K_{\text{dis}}, & WESS_Flg=1, \\ U_{\text{dis}}, & WESS_Flg=0. \end{cases} \quad (9)$$

$$U_{\text{char}} = \begin{cases} U_{\text{char}} - K_{\text{dis}}, & WESS_Flg=1, \\ U_{\text{char}}, & WESS_Flg=0. \end{cases} \quad (10)$$

式 (9) (10) 中: K_{char} 、 K_{dis} 为控制参数。

2.4 能量管理策略

列车近距离变电所时 (低阈值放电): 当列车距离变电所较近时, 放电电压阈值较低, 优先使用外部供电, 减少车载储能系统消耗的能量。

列车远离变电所时 (高阈值放电): 随着列车远离变电所, 放电阈值逐渐提高。此时, 优先使用车载储能系统供电, 以减少长距离输电带来的损耗。

SOC 高时 (更高阈值放电): 当储能系统 SOC 较高时, 放电阈值更高, 更多地利用车载储能能量, 避免外部供电带来的线路电阻损耗。

列车近距离客运站 (2, 3, ..., i-1) 时: 直接提高放电阈值, 优先使用车载储能供电, 减少牵引网和线路电阻的能量消耗。

综上所述, U_{dis} 计算公式如式 (11), U_{char} 与 U_{dis} 的计算公式类似, 如式 (12):

$$\begin{cases} K = K_{\min} * \left[\frac{a_1 - SOC}{a_1 - SOC_{\min}} \right], \\ U_{\text{dis}} = \begin{cases} V_{\text{dis}}, & SOC > a_1; \\ V_{\text{dis}} - K * (a_1 - SOC), & SOC_{\min} < SOC \leq a_1; \end{cases} \\ U_{\text{dis}} = \begin{cases} U_{\text{dis}} + K_{\text{dis}}, & WESS_Flg=1; \\ U_{\text{dis}}, & WESS_Flg=0; \end{cases} \\ SOC = \frac{0.5CU_t^2}{0.5CU_{\text{scmax}}^2} = \left(\frac{U_t}{U_{\text{scmax}}} \right)^2, \\ 0 \leq U_t, 0 \leq K_{\min}, 0 \leq K_{\text{dis}}; \\ SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} K = K_{\min} * \left[\frac{SOC - a_2}{SOC_{\max} - a_2} \right], \\ U_{\text{char}} = \begin{cases} V_{\text{char}}, & SOC \leq a_2; \\ V_{\text{char}} + K * (SOC - a_2), & a_2 < SOC \leq SOC_{\max}; \end{cases} \\ U_{\text{char}} = \begin{cases} U_{\text{char}} - K_{\text{char}}, & WESS_Flg=1; \\ U_{\text{char}}, & WESS_Flg=0; \end{cases} \\ SOC = \frac{0.5CU_t^2}{0.5CU_{\text{scmax}}^2} = \left(\frac{U_t}{U_{\text{scmax}}} \right)^2, \\ 0 \leq U_t, 0 \leq K_{\min}, 0 \leq K_{\text{char}}; \\ SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max}. \end{cases} \quad (12)$$

3 综合优化方法

能量管理策略参数对于实现城轨系统的节能稳压效果至关重要, 所提策略的控制参数组为 [V_{refdis} , V_{refchar} , $K_{\min}$, K_{char} , K_{dis} , k_0 , a_1 , a_2], 为了尽可能提高城轨系统节能稳压效果, 课题组采用动态权重因子的多目标粒子群算法优化能量管理策略参数, 对其进行协同优化。

3.1 目标函数

在城轨供电系统参数设计中, 目标是减少牵引网电压波动、提高节能率、减少线路损耗。基于此, 提出如下目标函数:

电压波动为

$$v = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (U_i - 1500)^2} \quad (13)$$

式中电压波动为变电所 j 的输出实时电压 U_i 与 1 500 的差值的标准差。

节能率为

$$e = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n \int_0^T U_{\text{sub},j}^{\text{mess}} I_{\text{sub},j}^{\text{mess}} dt}{\sum_{j=1}^n \int_0^T U_{\text{sub},j}^{\text{noess}} I_{\text{sub},j}^{\text{noess}} dt} \right) \times 100\% \quad (14)$$

式中: $U_{\text{sub},j}^{\text{mess}}$ 、 $I_{\text{sub},j}^{\text{mess}}$ 为安装储能系统时牵引变电所 j 的输出电压与电流; $U_{\text{sub},j}^{\text{noess}}$ 、 $I_{\text{sub},j}^{\text{noess}}$ 为未安装储能系统时牵引变电所 j 的输出电压与电流。

线路损耗

$$\begin{cases} W_1 = \int_0^t I_{\text{sub}1}^2 R_1 dt, \\ W_2 = \int_0^t I_{\text{sub}2}^2 R_2 dt, \\ W = W_1 + W_2. \end{cases} \quad (15)$$

式中: W_1 为列车与上一变电所 G_1 的线路损耗; $I_{\text{sub}1}$ 为列车与上一变电所 G_1 的线路电流; W_2 是列车与下一变电所 G_2 的线路损耗; $I_{\text{sub}2}$ 为列车与下一变电所 G_2 的线路电流; W 为线路总损耗。

为了与其他目标的数量级统一比较, 进行无量纲化归一处理, 以便在同一优化框架内进行比较和权衡, 因此线路损耗 10 000 J 单位。

3.2 优化算法

城轨供电系统是一个复杂的系统^[12], 本文采用动态权重因子的粒子群算法, 与系统仿真相结合, 寻求以上多目标优化问题的帕累托最优解集。算法流程如图 8 所示。

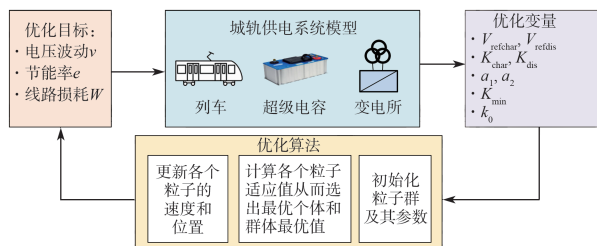


图 8 算法流程框图

Fig. 8 Algorithm flow

在传统的粒子群优化算法中, 引入动态权重因子的主要目的是在不同的搜索阶段平衡全局搜索和局部搜索的能力, 从而提高算法的性能。动态权重因子的 PSO 相较于固定权重的 PSO 有明显的优势: 平衡全局搜索与局部搜索, 提高收敛速度, 降低陷入局部最优的概率, 避免过早收敛, 增强算法的鲁棒性。

4 算例分析

4.1 参数设置

为了验证所提出的能量管理策略的效果, 本文选取长沙市城轨线路中的一段区间作为研究对象。根据线路参数数据, 搭建了城轨供电系统仿真模型, 该模型设置了 3 个客运站和 2 个变电所, 变电所分别位于 A 站和 C 站附近, B 站为只供列车停靠的客运站。在仿真模型中, 牵引系统参数、线路参数和列车基本参数分别如表 2~4 所示。超级电容的终端电压波动范围通常设定为牵引网压的 1/3~2/3。当网压是 1 500 V 时, 超级电容的工作电压范围为 500~1 000 V。超级电容的容量规格根据城轨实际运营的能量范围选择, 但是为了节省计算机资源, 结合实际运行能量范围, 适当缩短仿真时间和容量, 参数如表 5 所示。

表 2 牵引系统参数

Table 2 Parameters of traction system

参 数	取值	参 数	取值
网侧额定容量 /MVA	2*25	阀侧额定电压 /V	1 210
阀侧额定容量 /kVA	2*3 000	空载输出电压 /V	1 500
网侧额定电压 /kV	35	等效电阻 /(Ω·m ⁻¹)	0.03

表 3 线路参数

Table 3 Line parameters

参 数	取值	参 数	取值
A 站和 B 站之间的距离 /m	1 420	接触网单元电阻 /(Ω·m ⁻¹)	0.013
B 站和 C 站之间的距离 /m	1 410	轨道线路单位电阻 /(Ω·m ⁻¹)	0.019

表 4 B 型列车基本参数

Table 4 Basic parameters of Type B subway trains

参 数	取值	参 数	取值
列车编组	4M2T	列车总质量 /t	241.4
平均负荷 /t	52.4	单位电阻 / (Ω·m ⁻¹)	2.755 1+0.014v+0.000 75v ²
列车最大牵引功率 /MW	3.9	列车最大加速度 /(m·s ⁻²)	1.0
列车最大制动功率 /MW	3.2		

表 5 超级电容模组参数

Table 5 Ultracapacitor module parameters

参数	值
额定电压 /V	800
额定电阻 /Ω	4.9e-5
额定电容 /F	200

4.2 优化结果

采用 Matlab 编程软件来实现算法, 主要参数设置如下: 粒子数量为 100、最大迭代次数为 150、最大速度为 0.5, 最小速度为 0.2。

图 9 展示了通过仿真求解得到的 Pareto 解集在

三维空间上的分布情况。从图中可以看出, Pareto 解集具有良好的收敛性, 同时分布范围较广, 能够较好地覆盖电压波动、线路损耗和节能率的优化目标, 体现了解集的非劣性特征。为了综合考虑电压波动、节能率和线路损耗三方面的优化效果, 利用(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 法进行多属性决策。通过计算各 Pareto 解与理想解的贴近度, 最终得到最优参数方案为 $[V_{\text{refdis}}=1\,530, V_{\text{refchar}}=1\,470, K_{\text{min}}=0.1, K_{\text{char}}=1.7, K_{\text{dis}}=5, k_0=0.1, a_1=34, a_2=74]$ 。

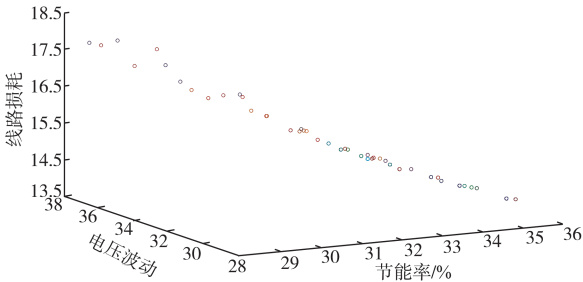


图 9 Pareto 解集
Fig. 9 Pareto solution set

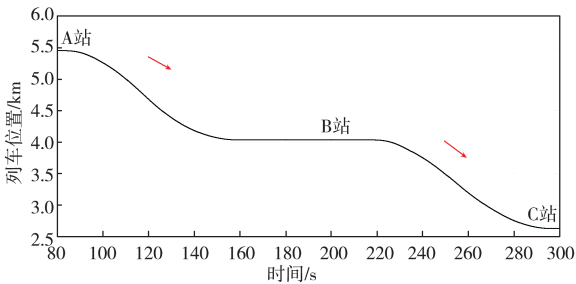
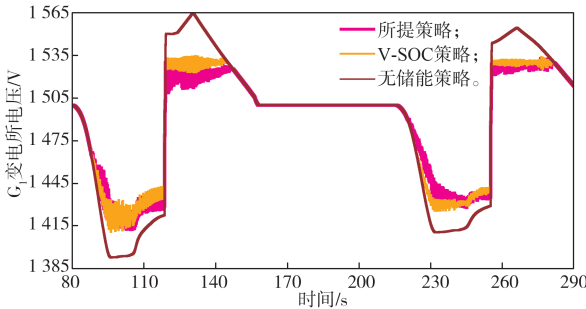


图 10 列车运行状态曲线
Fig. 10 Train operation state curve

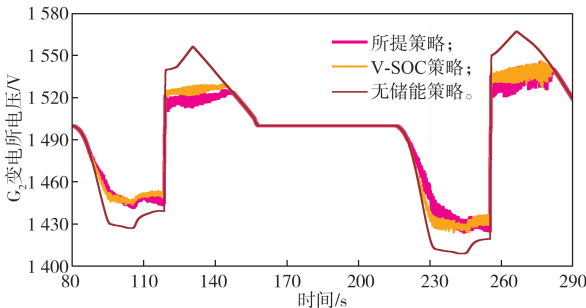
列车于 80 s 时刻加速启动驶离 A 站, 158 s 驶入 B 站, 221 s 时刻加速启动驶离 B 站, 294 s 驶入 C 站。图 10 表示列车运行状态曲线, 图 11 展示了不同控制策略下的变电所 G_1 和 G_2 电压变化情况, 具体仿真结果数据如表 6 和 7 所示。

由图 11 可知, 在相同的参数条件下, 如果不加入车载储能系统, 列车牵引加速过程中直流电压会快速下降, 最低降至 $U_{G_1}=1\,393\text{ V}$ 和 $U_{G_2}=1\,426\text{ V}$; 在列车制动时, 直流电压快速升高, 最高达 $U_{G_1}=1\,564\text{ V}$ 和 $U_{G_2}=1\,555\text{ V}$ 。这种显著的电压波动对直流牵引网的稳定性产生了较大的负面影响。当列车中引入超级电容储能系统后, 通过采用传统的基于 SOC 进行动态充放电阈值策略 (以下简称 V-SOC), 可以使得牵引网电压在列车加速阶段的最低值分别提升至 $U_{G_1}=1\,413\text{ V}$ 和 $U_{G_2}=1\,446\text{ V}$ 。在列车制动阶段, 牵引网电压上升过程更加平缓, 最终稳定在 $U_{G_1}=1\,534\text{ V}$ 和 $U_{G_2}=1\,528\text{ V}$ 。然而, 通过传统 V-SOC 策略实现的

削峰填谷效果仍有一定局限性, 牵引网电压波动尚未完全满足系统优化要求。



a) G_1



b) G_2

图 11 不同控制策略下的 G_1 和 G_2 变电所电压变化情况
Fig. 11 Voltage changes of G_1 and G_2 substation under different control strategies

表 6 不同系统条件下 G_1 和 G_2 电压波动范围
Table 6 Voltage fluctuation ranges of G_1 and G_2 under different system conditions

能量管理策略类型	G_1			G_2		
	最高电压 /V	最低电压 /V	电压差 /V	最高电压 /V	最低电压 /V	电压差 /V
无储能	1 565	1 393	172	1 567	1 410	157
V-SOC 策略	1 534	1 410	124	1 546	1 443	103
所提策略	1 526	1 412	114	1 535	1 444	91

表 7 不同系统条件下电压波动范围
Table 7 Voltage fluctuation range under different system conditions

系统类型	电压波动 /V	线路损耗 /(10^5 W)	节能率 /%
无储能	41.7	17.7	—
V-SOC 策略	31.2	17.7	33.0
所提策略	29.0	14.0	35.4

所提控制策略根据列车运行工况动态调整列车与牵引网之间的能量交换, 有效提升了“削峰填谷”的效果。在列车从 A 站牵引加速时, 牵引网电压最低分别降至 $U_{G_1}=1\,412\text{ V}$ 和 $U_{G_2}=1\,445\text{ V}$, 与 V-SOC 策略最低电压相比, 差异不大。而在 B 站制动时, 牵引网电压分别稳定在 $U_{G_1}=1\,528\text{ V}$ 和 $U_{G_2}=1\,514\text{ V}$ 左右。制动时的电压稳压效果更加显著, 使牵引网电

压能够更快速地恢复到稳定状态。由表7可知,其电压波动达29 V,较传统控制的31.2 V有了显著改善。

图12展示了相较于传统控制策略下的超级电容SOC对比情况。可以看出,相较于传统控制策略V-SOC,所提策略通过牵引网能量协调控制,使车载超级电容实现了更快速的充放电响应,并显著降低了放电深度。这表明该方法能够有效提升超级电容的能量释放与回收能力,从而提高整体节能效果。

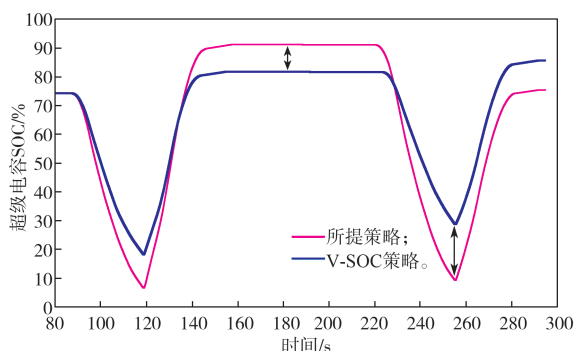


图12 超级电容SOC

Fig. 12 Supercapacitor SOC

从图13和14所示,车载超级电容充放电阈值的变化情况,可以看出充放电阈值是动态设置的。

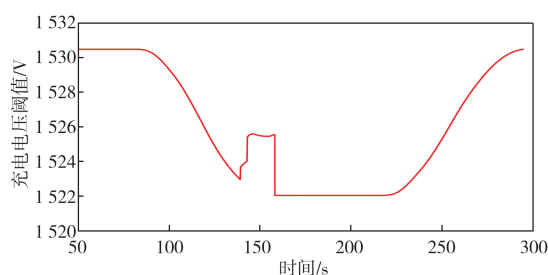


图13 充电阈值

Fig. 13 Charging threshold

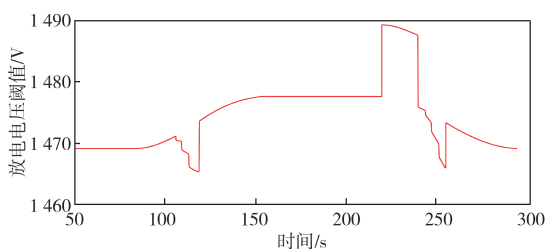


图14 放电阈值

Fig. 14 Discharge threshold

列车从A站加速启动出站时,导致 U_{G_1} 、 U_{G_2} 快速下降,此时超级电容释放能量,并优先由距离列车较近的 G_1 变电所提供主要启动能量,从而 G_2 变电所的供电需求较少,显著减少了能量传输过程中的线路损耗。随着列车运行距离增加,超级电容逐步承担列车运行所需的主要能量,SOC减小的趋势增大。直至130 s时刻左右,列车制动减速驶入B站,为减

小线路损耗和牵引网电压波动,并且结合超级电容SOC,充电阈值以较小幅度动态调整,确保系统的平稳运行。

在221 s时,列车从B站加速启动,为减少线路损耗,超级电容优先承担启动所需的主要能量。此时,由于放电电流增加,距离列车较近的 G_2 变电所比 G_1 变电所供电更多,因此超级电容在此阶段的放电阈值较其他阶段更高。然而,随着列车驶向C站, G_2 变电所承担主要列车运行能量所需,超级电容放电阈值逐步降低。在列车制动过程中,超级电容以更低的充电阈值吸收大量的RBE。在280 s时,超级电容SOC超过设定阈值,进入保护模式,使得充电阈值呈阶梯式上升,SOC有效平滑上升。通过上述策略,实现了变电所与超级电容之间能量流动的高效协调,同时显著减少了线路损耗。

表7为线路损耗的比较情况。传统控制策略V-SOC未考虑列车的运行位置,因此在充放电过程中,线损相对较高。由于传统控制下的超级电容充放电电量较少,导致损耗明显增加。而通过动态设置电压阈值方法,随着列车行驶距离的增加,可以有效减少线路损耗。结果表明,采用考虑列车运行位置的动态设置电压阈值方法,相较于传统控制策略,可以减少约3.7%的线路损耗。

5 结语

为了降低传输线路损耗和提高稳压效果,提出了一种考虑列车运行位置和超级电容SOC的能量管理策略,并且根据SOC状态设置充放电阈值变化率。通过实时跟踪列车位置和SOC,动态调整超级电容的充放电阈值,以协调变电所与列车之间的能量流动。这种策略可以使超级电容的能量利用更加合理,提高RBE利用率。仿真结果表明,与传统控制策略相比,该方法有效稳定了直流牵引电压,显著增强了“削峰填谷”效果,并具有更好的节能效果。

参考文献:

- [1] 金 勇,黄先进,石春珉,等.城市轨道交通地面储能技术应用综述[J].电工技术学报,2024,39(15): 4568-4582,4642.
JIN Yong, HUANG Xianjin, SHI Chunmin, et al. Review on Wayside Energy Storage Technology for Urban Rail Transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4568-4582, 4642.
- [2] 冯晓云,黄德青,王青元,等.轨道交通列车综合节能研究综述[J].铁道学报,2023,45(2): 22-34.

- FENG Xiaoyun, HUANG Deqing, WANG Qingyuan, et al. Overview on Comprehensive Energy Saving Schemes for Rail Transit Train Operation System[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(2): 22–34.
- [3] 毛润前. 城轨交通车载储能系统容量配置优化和车地协调控制策略 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
MAO Runqian. Capacity Configuration Optimization and Vehicle-Ground Coordinated Control Strategy of Urban Rail Transit Vehicle Energy Storage System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [4] HERRERA V I, GAZTAÑAGA H, MILO A, et al. Optimal Energy Management and Sizing of a Battery: Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle with a Multiobjective Approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3367–3377.
- [5] RATNIYOMCHAI T, HILLMANSEN S, TRICOLI P. Recent Developments and Applications of Energy Storage Devices in Electrified Railways[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2014, 4(1): 9–20.
- [6] 秦强强. 基于列车发车间隔的城轨地面混合储能系统 SOC 动态调整能量管理策略研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
QIN Qiangqiang. Research on Dynamic Adjustment Energy Management Strategy of SOC of Urban Rail-Ground Hybrid Energy Storage System Based on Train Departure Interval[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] 陈 铭. 城轨列车时刻表节能调整优化方法 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
CHEN Ming. Optimization Method for Energy-Saving Adjustment of Urban Rail Train Timetable[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [8] LIU H J, ZHOU M C, GUO X W, et al. Timetable Optimization for Regenerative Energy Utilization in Subway Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(9): 3247–3257.
- [9] 王桂博. 有轨电车混合储能系统的能量管理策略与容量优化研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
WANG Guibo. Study on Energy Management Strategy and Capacity Optimization of Tram Hybrid Energy Storage System[D]. Qingdao: Qingdao University, 2023.
- [10] 刘 炜. 城市轨道交通列车运行过程优化及牵引供电系统动态仿真 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
LIU Wei. Optimization of Train Operation Process and Dynamic Simulation of Traction Power Supply System in Urban Rail Transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [11] KALYANMOY D. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 3–34.
- [12] 肖 浩, 裴 玮, 孔 力. 含大规模电动汽车接入的主动配电网多目标优化调度方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 2): 179–189.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-Objective Optimal Scheduling Method for Active Distribution Network with Large-Scale Electric Vehicle Access[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 179–189.

(责任编辑: 申 剑)