

有轨电车混动系统控制与参数优化研究综述

张 智

大连交通大学詹天佑学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年6月27日; 录用日期: 2026年7月19日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

有轨电车混动系统以车载混合储能装置替代或辅助传统接触网供电, 兼顾无架线运营灵活性与牵引节能效益, 是城市轨道交通绿色化转型的重要方向。本文从混合储能系统拓扑结构与参数设计、能量管理策略优化, 以及面向有轨电车的专项控制研究三个维度, 对国内外相关进展进行系统梳理与评述。研究表明, 电池-超级电容全主动拓扑方案在功率特性互补与控制灵活性方面优势突出; 基于庞特里亚金最小值原理、动态规划及深度强化学习的能量管理策略在提升系统综合能效方面成效显著; 无架线供电优化与智能自适应控制是当前研究热点。最后对未来研究方向提出展望, 以期对相关工程实践与学术研究提供参考。

关键词

有轨电车, 混合储能系统, 能量管理策略, 参数优化, 无架线运营

A Review of Control and Parameter Optimization of Hybrid Power Systems for Trams

Zhi Zhang

Zhan Tianyou College, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: June 27, 2026; accepted: July 19, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Hybrid power systems for trams, which use onboard hybrid energy storage devices to replace or supplement traditional catenary power supply, provide both the operational flexibility of catenary-free running and the benefit of traction energy saving. They have therefore become an important direction for the green development of urban rail transit. This paper systematically reviews recent

research from three perspectives: the topology and parameter design of hybrid energy storage systems, the optimization of energy management strategies, and tram-oriented control methods. The review indicates that the fully active battery-supercapacitor topology offers clear advantages in complementary power characteristics and control flexibility. Energy management strategies based on Pontryagin's Minimum Principle, Dynamic Programming, and Deep Reinforcement Learning have shown strong potential for improving overall system efficiency. In addition, catenary-free power supply optimization and intelligent adaptive control have emerged as major research focuses. Finally, future research directions are discussed to provide references for further academic research and engineering applications.

Keywords

Tram, Hybrid Energy Storage System, Energy Management Strategies, Parameter Optimization, Catenary-Free Operation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的推进,对有轨电车的运行灵活性与节能性提出了更高要求。传统有轨电车依赖架空接触网实现持续供电,其架设与维护成本较高,且对城市历史街区的景观完整性产生显著影响,因此难以广泛应用于多样化城市环境。采用车载混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)为动力源的混合动力有轨电车,可在站间及特定景观区段实现无架线运行,通过制动过程将动能存储于储能装置,在启动加速阶段释放能量,显著降低对外部供电系统的峰值功率需求。

再生制动能量回收是轨道交通节能技术的重要组成部分。Khodaparastan 等人对直流轨道交通系统中再生制动能量利用方式进行了系统梳理与归纳,涉及列车运行计划优化、车载及地面储能设备配置、可逆变电力电子装置(如可逆变流器)设计等方面,认为储能设备容量选择及其控制策略对提高能量回收效率具有关键作用[1]。Wei 等针对配有地面固定储能装置的无架线有轨电车线路开展参数优化研究,通过全线运营成本分析验证了 HESS 方案的工程可行性[2]。因此混合动力系统拓扑设计、参数整定与控制策略三者间存在密切关联,需进行综合考量。本文围绕以上三个方面展开综述。

2. 混合储能系统拓扑与参数设计

2.1. 储能拓扑结构与特性分析

有轨电车混动系统多采用锂离子电池与超级电容器构成的复合 HESS 方案,形成能量-功率特性互补,为系统高效能量管理奠定硬件基础。锂离子电池具有较高的质量能量密度,可为牵引系统提供持续稳定的中低频功率分量;超级电容器凭借其高功率密度、毫秒级充放电响应及数十万次循环寿命,在城市轨道频繁启停工况下可快速吸收与释放制动峰值功率脉冲,并有效屏蔽通过电池的高频电流冲击,从根本上抑制电池容量衰减,延长储能系统整体使用寿命。Kouchachvili 等[3]对电池-超级电容 HESS 的主要拓扑结构、工作机理及典型应用特点开展了系统性综述,阐述了三种主流电气连接拓扑的原理差异与工程权衡:被动式拓扑将两种储能元件并联于直流母线,结构最为简单,但功率分配完全由器件内阻

特性决定, 缺乏主动调节能力, 制动能量回收效率受限; 半主动式拓扑仅在超级电容端配置单向 DC/DC 变换器, 可实现超级电容充放电功率的单向调控, 成本较低, 但其调控范围受限于拓扑结构; 全主动式拓扑为电池与超级电容支路均配置独立的双向 DC/DC 变换器, 可实现各线路功率流的完全解耦与精准控制, 控制自由度最高, 已在混动有轨电车工程实践中得到广泛应用。全主动式拓扑为能量管理策略提供了最大优化空间, 但也导致变换器硬件设计、系统散热管理及控制算法的复杂度显著增加, 需在系统性能目标、工程成本与可靠性要求之间进行综合权衡。

2.2. 储能参数优化方法

储能系统容量确定是混动有轨电车系统工程设计的核心约束条件之一, 与车辆动力性能极限、无架线区段运行时长及全生命周期等因素密切相关。储能容量过大会导致系统质量、体积及成本显著上升, 压缩有效载荷空间并增加车辆能耗; 容量过小则无法有效吸收制动能量峰值或保障无架线区段完全自主运行, 导致功能性瓶颈。

Shen 等人[4]针对电动车辆应用提出了系统化的电池-超级电容 HESS 容量优化方法, 在系统体积与成本双重约束下, 以最大化电池循环寿命为目标, 通过建立电池应力与超级电容容量间的量化关系构建优化模型。研究表明, 合理分配超级电容容量以承受高频脉冲电流分量, 可在保持系统总体积不变的前提下显著降低电池峰值电流应力, 从而有效延缓电池容量衰减速率, 降低全生命周期内的更换维修成本。Song 等人[5]通过案例研究详细探讨了 HESS 在实际电动车辆中的联合优化问题, 重点分析了电池价格下降对最优容量分配结果的影响, 结论表明, 即使电池能量成本预期持续下降, HESS 在循环寿命、功率瞬态特性及系统可靠性等方面的综合性能仍显著优于单纯超级电容方案。

国内学者在储能参数优化领域同样开展了具有工程针对性的研究。张国瑞建立了混合储能系统容量配置的多目标优化模型, 综合考虑系统成本、质量与动力性能约束, 为国产超级电容有轨电车的储能选型提供了定量设计依据[6]。该研究将线路坡度、载客量变化等实际运营参数纳入优化变量, 体现了从通用电动车辆向有轨电车专项场景的方法论迁移。

参数优化的通用研究范式以全生命周期综合成本最小化或运营总能耗最低为多目标优化函数, 选取典型运行工况作为驱动循环, 对电池与超级电容容量比例、充放电功率极限及 SOC 工作窗口等关键设计参数开展联合优化。Dong 等针对城市轨道交通变电站运行稳定性约束, 提出了 HESS 容量与控制策略的双层优化框架, 上层以投资成本与电网冲击最小化为目标确定储能容量, 下层基于模型预测控制实现实时功率分配, 两层迭代求解获得帕累托最优解集[7]。获得最优参数集合后, 可为后续能量管理策略提供明确的约束边界, 并实现控制算法参数的精确整定。

王巧等人以有轨电车实时运行状态为核心依据, 提出车载混合储能系统动态比例分配方法, 在理论完备性和工程实用性之间取得平衡: 研究从超级电容各初始荷电状态区间出发, 利用动态规划获得系统运行效率最优的功率分配途径及全局最优解集[8]; 在此基础上采用离散时间优化法对多条件分配规则进行系统化整理, 将复杂规则集转化为可直接在线执行的比例系数映射, 在保证动态规划全局优化效果的同时, 大幅降低了控制器存储量与计算复杂度, 具备直接嵌入车载控制单元的工程可行性。仿真对比分析与实车平台实验结果共同验证, 该动态比例分配策略可有效提高混合储能系统在实际工况下的整体运行效率, 在超级电容充放电循环过程中均衡功率应力分布, 显著降低储能单元的循环寿命损耗, 具有良好的工程应用前景。

目前国内广州、珠海、武汉、青岛等城市的超级电容有轨电车已实现大规模商业化运营, 积累了丰富的真实线路运行数据与工况统计样本, 为后续开展混动系统控制策略的在线参数自整定、多工况自适应优化及系统级全周期性能评价工作奠定了坚实基础。

3. 能量管理策略研究

3.1. 基于规则与最优控制的方法

基于规则的能量管理策略(Rule-Based Strategy, RBS)依托工程经验制定功率分配逻辑,具有实时性强、实施成本低的特点,是最早实现工程化应用的策略。然而,固定规则难以适应复杂多变的工况,与全局最优解存在固有差距。Peng 等[9]针对燃料电池混合铁路车辆,提出一种从动态规划离线结果中提炼规则的方法,构建了可扩展的自适应规则策略框架。该方法将全局最优控制的核心规律转化为在线可执行的决策逻辑,在保留动态规划优化效果的同时实现了实时部署,为规则策略的系统化设计提供了重要范式。

以庞特里亚金最小值原理(Pontryagin's Minimum Principle, PMP)为理论基础的最优控制理论,是混动系统能量管理方法论的重要基石。Kim 等[10]基于 PMP 推导了混合动力车辆的哈密顿函数表达式,严格建立了等效消耗最小化策略(Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS)的数学框架,证明了在等效因子恒定假设下,该策略可逼近全局最优控制律。这一奠基性工作被后续大量有轨电车和铁路混动系统研究引为理论基础,推动了最优控制方法在轨道交通领域的广泛应用。

国内学者将最优控制理论与有轨电车专项工况深度结合,拓展了传统方法的适用边界。安星锟创新性地将伪谱法引入混合储能能量管理,通过将连续优化问题离散化处理,将庞特里亚金最小值原理框架下的两点边值问题转化为非线性规划问题求解[11]。该方法在保持全局最优性的同时显著提升了计算效率,为有轨电车这类具有固定运行图、工况可预测性较强的场景提供了高效求解路径。杨振涛针对间歇式供电系统的特殊性,设计了基于动态负荷预测的能量调度策略,通过预判列车进站充电需求与区间牵引功率曲线,优化储能装置的充放电时机与深度,有效降低了对电网的冲击峰值[12]。

Truong 等提出了一种基于增强型极值寻优的能量管理策略,引入等效状态变量实现燃料电池-电池-超级电容三源系统的功率协调,通过在线自整定机制追踪最优工作点,在典型有轨电车工况下实现了氢耗与电耗的综合最小化[13]。该策略无需预设工况信息即可实现近似最优控制,为规则策略向自适应策略的演进提供了新的技术路径。

3.2. 模糊逻辑控制与模型预测控制

模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control, FLC)不依赖精确的被控对象数学模型,对系统参数不确定性和外部扰动具有较强鲁棒性,已成为混合储能能量管理领域的研究热点。Maghfiroh 等对 FLC 在混合电动与混合储能车辆中的能量管理应用进行了系统综述[14],系统梳理了加权规则优化、多输入多输出模糊系统设计及与其他算法融合的研究演进,指出其尤其适用于以超级电容和电池为储能单元的有轨电车系统。针对有轨电车专项控制, Gao 等提出将超球面搜索算法(Hyper-Spherical Search, HSS)引入 FLC 参数在线整定[15],以列车实时运行工况作为补充决策变量,实现了随工况动态调整的模糊功率分配,在仿真研究中验证了该方案相对于传统固定参数 FLC 的节能提升效果。

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)基于滚动时域优化思想,在每个控制步长内求解有限预测时域的最优控制序列并取其首步执行,可显式处理功率和能量约束,兼顾优化性能与实时可行性。Cheng 等针对轻轨车辆车载 HESS 构建了基于 MPC 的能量管理方案,以系统损耗最小化为滚动优化目标[16],在实时控制框架下验证了 MPC 策略在降低储能单元非必要能量损耗方面的有效性,为后续面向有轨电车的 MPC 研究提供了基础方法参考。

国内研究在 MPC 应用方面形成了具有线路针对性的技术方案。燕雨提出基于模型预测控制的燃料电池功率跟随算法,将线路坡度、限速曲线与站点停靠计划纳入预测模型,通过滚动优化实现燃料电池输出功率的平稳跟踪,有效抑制了功率波动对燃料电池寿命的不利影响[17]。该研究体现了从通用 MPC

框架向有轨电车固定运行图场景的方法论适配。张浩然聚焦新型供电制式下的能量管理难题,构建了考虑线路坡度与载客量变化的自适应优化框架,通过实时修正预测模型中的等效质量参数与阻力系数,显著提高了复杂工况下的能量分配精度[18]。

Zhang 等将竞争粒子群算法与模型预测控制相结合,提出了一种混合优化能量管理策略,利用粒子群算法离线求解不同工况簇的最优控制参数库,在线阶段通过工况识别快速调用对应参数,在保证实时性的同时提升了优化深度[19]。该研究为智能优化算法与模型预测控制的融合应用提供了有益参考。

3.3. 深度强化学习方法

随着深度学习与强化学习的深度融合,深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)为混动系统能量管理带来了全新的研究范式。与需精确系统模型的最优控制方法及依赖人工设计规则的传统方法不同,DRL 以神经网络为函数近似器,通过智能体在仿真环境中通过试错学习自主优化控制策略。DRL 的核心框架包含环境状态、智能体动作及即时奖励信号三要素:智能体在每一时步感知系统当前状态信息(包括储能 SOC、功率需求等),执行功率分配动作,环境反馈即时奖励(如能耗代价)和下一状态,智能体通过最大化长期累积奖励的策略梯度或时序差分方法迭代优化神经网络参数。Deng 等将 DRL 应用于燃料电池混合动力铁路车辆的 EMS 研究,在奖励函数设计中创新性地将燃料电池的动态健康退化模型纳入优化代价[20],使智能体在训练过程中实现对氢耗、电耗及燃料电池寿命损耗的多目标权衡,在多种典型铁路运营工况的仿真对比中,DRL 策略的综合性能显著优于传统规则基础方案。该研究证明,DRL 方法无需预先获取行驶工况全程信息即可实现接近全局最优的在线决策,并具备随工况分布动态变化的持续自适应能力,为有轨电车混动系统迈向智能化自主控制提供了重要的技术探索。

国内研究在 DRL 与有轨电车场景的融合方面也取得了积极进展。高翾宇针对氢燃料电池有轨电车的动态特性,提出基于多目标优化的节能协同控制策略,通过建立燃料电池-超级电容混合系统动态模型,实现了氢能消耗与系统效率的综合优化[21]。该研究将 DRL 的训练框架与燃料电池衰退机理相结合,在奖励函数中嵌入寿命损耗项,使智能体在节能与耐久之间形成自主权衡。

Jung 等针对重复路径运行的燃料电池混动有轨电车,提出了一种基于工况记忆的最优能量管理策略,利用历史运行数据构建工况特征库,通过相似度匹配实现控制策略的快速初始化与在线微调,在固定线路场景下显著缩短了 DRL 的训练周期并提升了策略收敛稳定性[22]。这一研究对国内已开通运营的固定线路有轨电车具有直接的借鉴价值,表明 DRL 策略的工程化部署需充分利用线路运行图的可预测性特征。

4. 无架线有轨电车混合供电系统优化研究

无架线自主运营是现代有轨电车差异化发展的核心方向之一,要求储能系统在站间充电时间内完成能量足额补给,同时满足全程牵引功率需求。Di Noia 等研究了超级电容与感应电能传输(Inductive Power Transfer, IPT)系统在无架线有轨电车中的最优集成方案,通过建立系统联合优化模型对储能容量与 IPT 功率传输参数进行协同设计[23],从可行性与效率视角论证了无线补电-车载储能混合供电架构的工程价值。D'Ovidio 等以氢能城市有轨电车为对象,提出面向非电气化线路的新型预测功率流控制策略[24],在燃料电池-储能复合系统建模基础上,通过数值分析验证了氢能有轨电车在典型城市工况下的能量管理可行性,标志着零碳排放混动有轨电车的前沿探索方向[25]。

Kapetanović 等对区域铁路牵引替代方案的能耗与温室气体排放进行了系统比较研究,涵盖架空接触网供电、车载储能、氢燃料电池及混合动力等多种技术路线,通过全生命周期评估方法量化了各方案在不同线路长度与运量条件下的碳排放强度与能效表现[26]。研究结果表明,混合动力方案在中等运量、站间距适中的城市轨道交通场景中具有最优的综合环境效益,为有轨电车技术路线的选择提供了定量决策

依据。

Huang 等针对灵活牵引供电系统中的混合储能运行优化问题,提出了一种考虑不确定列车时刻表偏差的多时间尺度协调控制策略,上层以日前计划为基础优化储能日前充放电曲线,下层基于模型预测控制实时修正因列车晚点、早到等扰动引起的功率偏差,通过上下层协同实现了计划性与灵活性的统一[27]。该研究揭示了有轨电车混动系统从单一能量管理向多时间尺度协调优化的演进趋势,对提升无架线区段供电可靠性具有重要参考价值。

5. 结论与展望

本文从混合储能系统拓扑与参数设计、能量管理策略、有轨电车专项应用三个方面,对有轨电车混动系统控制及参数优化领域的国内外研究现状进行梳理。主要结论如下:电池-超级电容全主动拓扑方案已成为工程应用的主流;以全生命周期成本与循环寿命为目标的参数协同优化成为系统构建的核心;能量管理策略已从传统规则方法、最优控制发展为模糊智能与深度学习相结合的阶段,对复杂工况的自适应能力显著增强;有轨电车混动技术正朝着无架线运行与氢能源应用方向深入发展,综合性能仍存在较大提升空间。

从长远发展视角,未来研究应重点关注以下方向:其一,构建融合线路地图、运行计划及实时感知信息的预测性能量管理策略,以增强控制的前馈能力;其二,建立储能寿命衰减模型与能量管理策略的深度关联并进行协同优化,实现能耗与寿命的综合改善;其三,构建以数字孪生技术为核心的仿真-实验联合验证平台,加速新型控制算法的理论向工程实践转化。随着人工智能技术、宽禁带功率器件及新型储能材料的持续发展,有轨电车混动系统的控制精度与综合效益将得到进一步提升。

参考文献

- [1] Khodaparastan, M. and Mohamed, A.A. (2019) Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **68**, 5211-5226.
- [2] Wei, S., Jiang, J., Murgovski, N., et al. (2020) Optimisation of a Catenary-Free Tramline Equipped with Stationary Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **6**, 654-665.
- [3] Kouchachvili, L., Yaïci, W. and Entchev, E. (2018) Hybrid Battery/Supercapacitor Energy Storage System for the Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, **374**, 237-248. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>
- [4] Shen, J., Dusmez, S. and Khaligh, A. (2014) Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**, 6525-6535.
- [5] Song, Z., Li, J., Hou, J., Hofmann, H., Ouyang, M. and Du, J. (2018) The Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications: A Case Study. *Energy*, **154**, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.148>
- [6] 张国瑞. 有轨电车用燃料电池混合动力系统配置、建模及能量管理方法[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [7] Dong, H., Tian, Z., Spencer, J.W., Fletcher, D. and Hajiabady, S. (2024) Bilevel Optimization of Sizing and Control Strategy of Hybrid Energy Storage System in Urban Rail Transit Considering Substation Operation Stability. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **10**, 10102-10114. <https://doi.org/10.1109/tte.2024.3385821>
- [8] 王珂, 杨中平, 林飞, 等. 有轨电车载混合储能系统动态比例分配策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 161-170.
- [9] Peng, H., Li, J., Thul, A., Deng, K., Ünlübayir, C., Löwenstein, L., et al. (2020) A Scalable, Causal, Adaptive Rule-Based Energy Management for Fuel Cell Hybrid Railway Vehicles Learned from Results of Dynamic Programming. *eTransportation*, **4**, Article 100057. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100057>
- [10] Kim, N., Cha, S. and Peng, H. (2011) Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **19**, 1279-1287. <https://doi.org/10.1109/tcst.2010.2061232>
- [11] 安星银. 基于伪谱法的有轨电车混合储能系统能量管理策略的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.

- [12] 杨振涛. 有轨电车间歇式供电系统优化配置与能量管理策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [13] Truong, H.V.A., Trinh, H.A., Do, T.C., *et al.* (2024) An Enhanced Extremum Seeking-Based Energy Management Strategy with Equivalent State for Hybridized-Electric Tramway-Powered by Fuel Cell-Battery-Supercapacitors. *Mathematics*, **12**, Article 1849. <https://doi.org/10.3390/math12121849>
- [14] Maghfiroh, H., Wahyunggoro, O. and Cahyadi, A.I. (2024) Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review. *IEEE Access*, **12**, 56097-56109. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3390436>
- [15] Gao, F. and Gao, X. (2022) Hyper-Spherical Search Optimized Fuzzy Logic Control Considering Operating Conditions for Hybrid Tram. *IEEE Access*, **10**, 65925-65935. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3183643>
- [16] Cheng, L., Acuna, P., Aguilera, R.P., Jiang, J., Flether, J. and Baier, C. (2017) Model Predictive Control for Energy Management of a Hybrid Energy Storage System in Light Rail Vehicles. 2017 11th *IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Cadiz, 4-6 April 2017, 817-822. <https://doi.org/10.1109/cpe.2017.7915255>
- [17] 燕雨. 燃料电池混合动力有轨电车运行控制与优化方法研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [18] 张浩然. 新型供电制式有轨电车混合动力系统能量管理优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [19] Zhang, Z., Cheng, X., Xing, Z. and Wang, Z. (2024) Energy Management Strategy Optimization for Hybrid Energy Storage System of Tram Based on Competitive Particle Swarm Algorithms. *Journal of Energy Storage*, **75**, Article 109698. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109698>
- [20] Deng, K., Liu, Y., Hai, D., Peng, H., Löwenstein, L., Pischinger, S., *et al.* (2022) Deep Reinforcement Learning Based Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Railway Vehicles Considering Fuel Cell Aging. *Energy Conversion and Management*, **251**, Article 115030. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115030>
- [21] 高翔宇. 氢燃料电池有轨电车节能优化与协同控制[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [22] Jung, J., Kim, D., Yang, L. and Kim, N. (2024) Optimal Energy Management Strategy for Repeat Path Operating Fuel Cell Hybrid Tram. *Energies*, **17**, Article 1560. <https://doi.org/10.3390/en17071560>
- [23] Di Noia, L.P., Genduso, F., Miceli, R. and Rizzo, R. (2019) Optimal Integration of Hybrid Supercapacitor and IPT System for a Free-Catenary Tramway. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **55**, 794-801. <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2871438>
- [24] D'Ovidio, G., Ometto, A. and Valentini, O. (2020) A Novel Predictive Power Flow Control Strategy for Hydrogen City Rail Train. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 4922-4931. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.067>
- [25] Tao, S., Chen, W., Gan, R., Li, L., Zhang, G., Han, Y., *et al.* (2021) Energy Management Strategy Based on Dynamic Programming with Durability Extension for Fuel Cell Hybrid Tramway. *Railway Engineering Science*, **29**, 299-313. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00247-w>
- [26] Kapetanović, M., Núñez, A., van Oort, N. and Goverde, R.M.P. (2024) Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Traction Alternatives for Regional Railways. *Energy Conversion and Management*, **303**, Article 118202. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118202>
- [27] Huang, Y., Hu, H., Liu, Y., Ge, Y., Wang, K., Chen, J., *et al.* (2025) Multitimescale Optimal Operation for Hybrid Energy Storage of Flexible Traction Power Systems Considering Uncertain Train Timetable Deviations. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **11**, 6640-6653. <https://doi.org/10.1109/tte.2024.3514086>