



基于储能技术的铁路新型牵引供电关键技术研究

刘雨欣¹, 贾豪威², 周 敏²

(¹河南省高速铁路运营维护工程研究中心, 河南 郑州 451460; ²中国铁路郑州局集团有限公司, 郑州东高铁基础设施段, 河南 郑州 450046)

摘 要:“双碳”战略目标下, 节约铁路交通能源消耗、优化供电系统成为能源结构调整的主要发展方向。传统铁路牵引供电系统存在可再生能源接纳能力不足、再生制动能量浪费等问题, 对于公共电网的冲击难以得到有效控制。为实现铁路牵引供电系统的升级换代, 针对基于储能技术的铁路新型牵引供电关键技术展开研究。分析提出了适用于铁路牵引供电的储能技术, 并分析了基于储能的铁路牵引供电系统关键技术研究进展, 进而总结当前研究所面临挑战的同时, 展望其未来发展方向。

关键词: 储能技术; 铁路牵引供电; 电化学储能; 机械储能

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0668

中图分类号: TM 922

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 08-3265-03

Research on key technologies of new railway traction power supply based on energy storage technology

LIU Yuxin¹, JIA Haowei², ZHOU Min²

(¹Henan High-speed Railway Operation and Maintenance Engineering Research Center, Zhengzhou 451460, Henan, China; ²Zhengzhou East High Speed Rail Infrastructure Section, China Railway Zhengzhou Group Co., Ltd., Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: Under the "dual carbon" strategic goal, saving energy consumption in railway transportation and optimizing the power supply system have become the main development directions for energy structure adjustment. The traditional railway traction power supply system has problems such as insufficient renewable energy acceptance capacity and waste of regenerative braking energy, making it difficult to effectively control the impact on the public power grid. To achieve the upgrading and replacement of railway traction power supply system, research is conducted on key technologies for new railway traction power supply based on energy storage technology. An energy storage technology suitable for railway traction power supply was analyzed and proposed, and the research progress of key technologies based on energy storage in railway traction power supply systems was analyzed. Furthermore, while summarizing the challenges faced by current research, the future development direction was also discussed.

Keywords: energy storage technology; railway traction power supply; electrochemical energy storage; mechanical energy storage

收稿日期: 2026-07-30。

第一作者及通信联系人: 刘雨欣 (1986—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为铁道供电, E-mail: liuyuxindq@163.com。

引用本文: 刘雨欣, 贾豪威, 周敏. 基于储能技术的铁路新型牵引供电关键技术研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3265-3267.

Citation: LIU Yuxin, JIA Haowei, ZHOU Min. Research on key technologies of new railway traction power supply based on energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3265-3267.

传统铁路牵引供电系统的供电模式较为单一,机车只能接收外部电网或牵引变电所输出的交变电信号,虽然能够满足车辆的基础运行需求,但出车频次以及机车功率不断增大,这种模式暴露出了诸多局限性。此外,若列车再生制动所产生的动能直接被接触网所吸收,则可能导致供电端电压水平的升高,既威胁了设备安全,也可能导致能量浪费。在此背景下,对于新型储能技术的研究就显得极为必要。利用性能优异的储能装置吸收剩余能量,并在列车需要电能供应时释放这些能量,从而在牵引供电系统与外部电网之间形成一种稳定的电力循环模式,并以此为大规模的机车组功率需求提供支撑。本研究旨在深入挖掘储能技术在铁路新型牵引供电系统中的应用,以期对相关工程实践的发展提供参考^[1]。

1 铁路牵引供电储能技术

1.1 储能技术类型

1.1.1 电化学储能

锂离子电池、超级电容器是铁路牵引供电系统中最常见的电化学储能技术。相较于其他电池组件,锂离子电池的能量密度更高(最高可达250 Wh/kg)、循环使用寿命更长(最高可达5000次循环)、充放电完成周期更短。将锂离子电池作为铁路牵引供电系统的储能设备,可以提供更为稳定且持久的电能输出。此外,锂离子电池的体积小、重量轻、更换成本低,以其作为车载动力源,可以提供更为灵活的能量输出。

1.1.2 机械储能

飞轮储能是铁路牵引供电系统中广泛应用的机械储能技术。通过飞轮旋转带动电动机,使其达到与飞轮同频的转速水平,此时所产生电能将通过其他电力装置的转化,以动能的形式暂时存储于电池组件之中。当列车行驶或加速时,飞轮开始反向旋转,此时带动发动机进行发电,并将暂存于电池组件中的动能转化为电能,并与其旋转所产生的电能共同输送至牵引供电系统中。组成方面,飞轮系统的核心部件包括电力电子转换装置、真空室、电机/发电机。其中,转子属于电力电子转换装置,多为碳纤维复合体等高强度材料,在没有风力及其他外界干扰的情况下,转子转速每分钟可达数万转。列车进入制动状态时,飞轮储能系统可以90%

以上的高效率快速吸收再生能量,以避免铁路牵引供电中出现以热能或其他形式的能源浪费现象。

1.2 储能技术与铁路牵引供电系统的适配性

列车行驶过程中,铁路牵引供电系统需要应对列车启动、加速时的瞬时大功率冲击等场景。储能技术以其毫秒级的响应能力不仅能够适应多变的供电需求,还可以在短时间内释放大量的能量以填补功率缺口。不但可以解决接触网电压骤降的问题,还能够在制动的同时有效回收能量。锂离子电池、超级电容器、飞轮转子等储能设备具有同步抑制电网谐波、补偿系统无功功率的能力,从宏观层面来看,既提升了牵引供电系统的平均功率因数,也大幅削弱了谐波信号对基础电力网络的污染影响。此外,在牵引变电所、接触网或其他设备因为故障而退出系统运行时,储能系统还可以从牵引供电回路中脱离出来,成为独立电源,为机车信号系统及其他关键设备提供电力供应,从而避免长时间停电对铁路网络造成影响。列车制动时,储能设备通过释放其存储的再生能量,在牵引供电系统中形成辅助牵引,并以此加快“制动-储能”的形成,以确保列车的稳定行驶。多样性方面,锂离子电池、超级电容器、飞轮系统等储能设备都可与风电、光伏及其他可再生能源结合,形成“风光储一体化”的供电网络,对于铁路网络而言,不再完全依赖传统能源的供应,也是储能技术与牵引供电系统具有较高适配性的重要表现^[2]。

2 基于储能的铁路牵引供电系统关键技术

2.1 车载储能牵引供电

车载储能在铁路牵引供电系统中的发展以高效节能、智能化、绿色环保等多重性能相结合作为主要目标。提升储能密度与耐压、杂化超级电容器、能量回收与再利用都是高效节能的发展模式。其中,提升储能密度与耐压性能可以通过增大超级电容储能密度的方式,来满足列车对于供能系统在功率与时间方面的要求。杂化超级电容器则是指从内部结构上融合蓄电池、超级电容两种不同的电极,使其成为性能更为突出的复合型电容器组件,促进两种储能方式的功能性互补,使其在铁路牵引供电系统中既具备普通蓄电池的高能量密度特性,也表现出超级电容设备的高功率密度特性。智能化旨在

采用更为智能的控制和监测手段来优化储能技术,一方面实现对车载储能装置的调节与监控,另一方面提前诊断潜在的储能装置故障问题,减少故障停机时间。绿色环保主要表现为新能源融合与节能减排,在安装车载储能的基础上,加装在列车顶部的太阳能电池板,为供电系统及储能设备提供直流充电,降低列车能耗。此外,多能互补也是车载储能牵引供电的主要发展方向,根据列车实际运行需求,调整不同能源设备的实时输出功率,实现储能装置与供电设备之间的能源互补。

2.2 地面固定式储能牵引供电

地面固定式储能牵引供电的未来发展,以实现综合性能源转变为目标,在缓解能源成本压力的同时,满足电网互动需求,进而提升铁路运能。技术层面上,同步落实储能介质的混合化与多元化,锂离子电池依然是牵引供电系统的发展主流,但可以引入固态电池、磷酸铁锂等新型的储能材料,以确保铁路供电向更低成本的方向发展。在需要瞬时大功率支撑的场景下,结合超级电容与飞轮转子,实现功率型储能、能量型储能的同步应用,并通过多极化管理,满足牵引供电系统的功率和能量吞吐需求,从而激发储能技术的发展潜力。对于多场景接入的拓扑环境,在原有储能设备直接接入牵引供电系统的基础上,设计锂电池或超级电容器与直流母线或交流母线相连的接线模式,通过电力电子变压器的中转作用,控制输入电压,从而将更多的电能保存在供电系统中,以便于运行机车的直接利用。

2.3 混合储能牵引供电

混合储能系统的应用指磷酸铁锂电池、超级电容等新型储能装置,在铁路牵引供电系统中,利用该系统可以更好地保障列车运行稳定性,避免电力负荷波动对供电出力造成影响。磷酸铁锂电池是一种性能优异的高能量密度型储能设备,基于化学能氧化还原反应进行能量转换,在长时间供电过程中具有较强的稳定性;超级电容是依赖电极表面双电

层进行电荷吸附的储能设备,能够有效应对高频能量波动信号,在铁路牵引供电系统中,其响应速度通常可以达到毫秒级标准,循环寿命极长。磷酸铁锂电池、超级电容可以通过DC/DC变换器建立二者之间的连接关系,并将其连接至牵引变电系统的直流母线终端。从完整性方面来看,引入混合储能设备后的铁路牵引供电系统在协同作用方面兼具闪电配送与能量仓储的能力,既能够在列车制动时回收能量,控制电阻制动造成的热损耗效应,也可以在供电负荷高峰时期释放能量,降低列车瞬时功率需求。未来,混合储能将作为铁路新型牵引供电的主导技术,与其他新能源系统及储能机制一起,为提升铁路系统的供电可靠性提供保障。

3 结 语

随着铁路运输业的蓬勃发展,其对于绿色化、可靠性供电的需求日益突出。电化学储能、机械储能等新型技术经过不断的探索与优化,以其持续性强、稳定性突出的优势,在铁路牵引供电系统中崭露头角。未来,电力电子、材料科学等技术的持续创新,将带动储能技术向着更低成本、更高能量密度的方向发展。

参 考 文 献

- [1] 许晓璇, 张长昆, 李先锋. 面向长时储能的液流电池储能技术: 发展、挑战及未来展望[J]. 科学通报, 2025, 70(9): 1230-1246.
XU X X, ZHANG C K, LI X F. Flow battery for long duration energy storage: Development, challenges and prospects[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(9): 1230-1246.
- [2] 王驿凯, 赵栋霖, 杨曙川, 等. 区域能源系统中热泵储能技术研究与应用综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(3): 839-848. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2025.03.026.
WANG Y K, ZHAO D L, YANG S C, et al. Review of pumped thermal energy storage technology and application in district energy systems[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(3): 839-848. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2025.03.026.