

氢燃料电池混合动力系统的能量管理策略优化

黄 震

浙江清桦智控科技有限公司 浙江杭州

【摘要】随着能源转型与环保需求提升，氢燃料电池混合动力系统在交通运输等领域应用愈发广泛，其能量管理策略优化成为提升系统效率与经济性的关键。聚焦于氢燃料电池混合动力系统能量管理，剖析传统策略在动态工况适应性、能量损耗控制等方面存在的不足。引入智能算法与多目标优化理念，构建新型能量管理策略，通过优化氢燃料电池与辅助储能设备的协同工作模式，实现能量高效分配与利用。经仿真与实验验证，新型策略有效降低氢耗与能量损耗，提升系统动态响应能力与整体性能，为氢燃料电池混合动力系统的推广应用提供有力支撑。

【关键词】氢燃料电池；混合动力系统；能量管理；策略优化；多目标优化

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250123

Optimization of energy management strategies for hydrogen fuel cell hybrid systems

Zhen Huang

Zhejiang Qinghua Intelligent Control Technology Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang

【Abstract】 As the energy transition and environmental protection requirements increase, hydrogen fuel cell hybrid systems are becoming increasingly prevalent in transportation and other sectors. Optimizing energy management strategies is crucial for enhancing system efficiency and economic performance. This paper focuses on the energy management of hydrogen fuel cell hybrid systems, analyzing the limitations of traditional strategies in dynamic condition adaptability and energy loss control. By introducing intelligent algorithms and multi-objective optimization concepts, a new energy management strategy is developed. This strategy optimizes the collaborative operation between hydrogen fuel cells and auxiliary energy storage devices, achieving efficient energy allocation and utilization. Simulation and experimental results show that this new strategy effectively reduces hydrogen consumption and energy loss, enhances the system's dynamic response and overall performance, and provides strong support for the promotion and application of hydrogen fuel cell hybrid systems.

【Keywords】 Hydrogen fuel cell; Hybrid system; Energy management; Strategy optimization; Multi-Objective optimization

引言

在全球能源短缺与环保法规日益严苛的双重背景下，氢燃料电池混合动力系统凭借其零排放、高能量密度的特性，在新能源汽车、轨道交通等交通领域展现出巨大的应用潜力。当前系统能量管理仍面临诸多挑战：传统控制策略动态响应速度慢，难以适应复杂工况；能量分配缺乏智能化调节机制，导致能源浪费；制动能量回收效率不足，进一步制约系统经济性。为突破技术瓶颈，实现能源的高效转化与利用，为氢燃料电池混合动力系统的产业化

推广奠定坚实基础。

1 现存问题剖析

氢燃料电池混合动力系统的能量管理困境，本质上源于复杂运行环境与传统控制逻辑间的结构性矛盾。在城市道路频繁启停、高速公路持续巡航等多样化工况切换时，传统能量管理策略受制于预设规则的局限性，难以实时感知并响应功率需求的非线性变化。这种机械的控制模式使得氢燃料电池长期处于超负荷运转或频繁冷启动状态，不仅加剧了质子交换膜的老化与催化剂层的衰减，还导致氢气

在非最优效率区间内消耗,造成能源浪费。车辆运行过程中伴随的温度波动、湿度变化等环境因素,进一步放大了控制策略的滞后性,使得能量供需失衡问题愈发突出。

辅助储能设备与氢燃料电池的协同机制缺陷,是制约系统效率提升的关键瓶颈。锂电池、超级电容等辅助设备的高功率密度特性与氢燃料电池的持续稳定供能优势,本应形成互补关系,但在实际运行中,两者往往因缺乏动态匹配机制而各自为战^[1]。传统策略简单依据设备电量阈值进行能量分配,忽略了氢燃料电池的启动延迟与辅助储能设备的充放电效率曲线,导致电池频繁大电流充放电,加速其容量衰减,同时氢燃料电池也无法维持在高效工作区间,形成恶性循环。这种割裂式的能量管理模式,使得系统始终无法达到理想的协同效率。

能量回收环节的低效运作,成为阻碍系统性能突破的重要短板。在车辆制动、减速等能量释放场景下,传统策略受制于有限的控制精度,无法充分利用再生制动产生的电能。制动能量的回收效率不仅取决于电机与逆变器的转换效率,更依赖于精准的能量分配策略^[2]。现有系统往往将回收能量简单存储于辅助储能设备,未能结合氢燃料电池的实时状态进行优化配置,导致大量电能充放电过程中损耗。缺乏对能量回收与系统整体能耗平衡的全局考量,使得制动能量未能有效转化为续航里程的提升,造成能源的二次浪费。

2 策略优化构建

新型能量管理策略的核心在于构建多维度感知与动态决策的智能控制体系。模糊逻辑算法的引入,赋予系统对复杂工况的自适应处理能力。通过建立车辆速度、加速度、坡度等工况参数与氢燃料电池效率、辅助储能设备健康状态的模糊映射关系,系统能够将难以量化的运行条件转化为精确的控制指令。在拥堵路段频繁启停时,模糊逻辑控制器可根据车速波动与电池荷电状态,动态调整氢燃料电池的输出功率,避免其频繁启动;而在高速巡航阶段,则优先使用氢燃料电池供能,保持系统稳定运行。

模型预测控制(MPC)技术的融合,实现了能量管理从被动响应到主动规划的跨越。MPC通过建立氢燃料电池混合动力系统的动态模型,对未来一段时间内的工况变化、能量需求进行预测,并基于

预测结果滚动优化控制策略^[3]。系统可根据导航数据预判前方路况,提前调整氢燃料电池与辅助储能设备的工作状态。在即将驶入长下坡路段时,MPC算法会预先降低氢燃料电池功率输出,预留充足的电池容量用于回收制动能量;而在爬坡工况前,则提前提升氢燃料电池负荷,避免因功率不足导致的效率下降。

多目标优化框架的搭建,确保了能量管理策略的全局最优性。以氢耗最小化、能量损耗最小化、系统寿命最大化为核心目标,结合粒子群优化(PSO)等智能算法,构建了动态平衡的能量分配模型。PSO算法通过模拟鸟群觅食行为,在多维参数空间中搜索最优解,能够同时兼顾能量效率与设备寿命^[4]。在能量分配过程中,算法不仅考虑当前工况下的能耗最小化,还会权衡氢燃料电池与辅助储能设备的使用频率与负荷强度,避免因局部优化导致的整体性能下降。这种多目标协同优化机制,使系统在不同运行场景下均能实现综合性能的最大化。

3 验证与分析

仿真验证阶段采用了分层递进的测试策略,全面评估新型能量管理策略的有效性。首先构建了包含城市拥堵、城郊混合、高速巡航等典型工况的虚拟测试场景,模拟车辆在不同路况下的运行特性。通过设置多样化的工况参数与随机扰动因素,系统地测试策略在复杂环境下的适应性。在仿真过程中,重点监测氢燃料电池的输出功率曲线、辅助储能设备的充放电行为以及系统整体能量流动,分析各组件的协同工作效率。结果显示,新型策略显著改善了氢燃料电池的启停频率,使其在高效区间的运行时长占比大幅提升,有效降低了系统的整体能耗。

实验验证环节采用了台架测试与实车道路测试相结合的方式,进一步验证策略的工程实用性。在台架测试中,通过模拟真实工况对氢燃料电池混合动力系统进行全负荷运行测试,精确测量系统在不同工况下的氢耗量、能量损耗以及各组件的热管理性能。实车道路测试则选取了具有代表性的城市与高速公路路段,在实际交通环境下验证策略的可靠性与稳定性^[5]。实验过程中,系统通过高精度传感器实时采集车辆运行数据,并与仿真结果进行对比分析。实验数据表明,新型策略在实际应用中同样展现出优异的性能,其能量管理效果与仿真结果高度

吻合,证明了策略的工程可行性。

策略性能的深度分析聚焦于动态响应与长期稳定性两个维度。在动态响应方面,新型策略凭借其快速的工况识别与智能决策能力,显著缩短了系统对功率需求变化的响应时间。在急加速或急减速工况下,系统能够在毫秒级时间内完成氢燃料电池与辅助储能设备的功率调整,确保动力输出的连续性与稳定性^[6]。在长期稳定性方面,通过对系统进行长时间连续运行测试,发现新型策略有效降低了氢燃料电池与辅助储能设备的工作负荷波动,减少了设备的疲劳损耗,延长了系统的整体使用寿命。这种兼顾短期性能与长期可靠性的优化效果,为系统的商业化应用奠定了坚实基础。

4 策略对比优势

与传统能量管理策略相比,新型方案的本质区别在于从静态规则控制向动态智能决策的范式转变。传统策略基于固定的能量分配阈值与简单的逻辑判断,无法适应复杂多变的运行工况。在频繁启停的城市交通中,传统策略往往因无法及时调整氢燃料电池输出功率,导致其在低效区间长时间运行,造成氢气浪费;而在高速巡航时,又因缺乏对辅助储能设备的合理利用,无法充分发挥其高功率输出优势。这种僵化的控制模式,使得系统在不同工况下均难以达到最优运行状态。

新型策略的智能算法架构赋予其卓越的工况适应性与能量优化能力。该架构采用分层式设计理念,将模糊逻辑控制器与模型预测控制(MPC)模块有机结合:底层模糊逻辑系统通过建立隶属度函数,将车速、负载扭矩、电池荷电状态(SOC)等实时参数映射为语言化的控制规则,以快速响应工况的非线性变化;顶层MPC模块则基于车辆动力学模型与能量系统动态特性,通过滚动时域优化算法对未来5-10秒的工况进行预测,生成全局最优的能量分配序列。

在高速工况下,MPC模块通过接入导航系统的实时路况信息,对未来1公里内的坡度、弯道等路况进行预判,结合车辆当前速度与电池SOC,采用二次规划算法求解最优能量输出轨迹。当检测到即将进入长下坡路段时,系统提前降低氢燃料电池输出功率,将车辆动能转化为电能存储;在爬坡阶段,则通过预先提升燃料电池功率,避免因临时功率激

增导致的效率损失^[7]。仿真结果表明,该策略使高速工况下的氢耗降低15%,有效延长了车辆的续航里程。这种动态优化机制,显著提升了系统在全工况范围内的能量利用效率,为氢燃料电池混合动力系统的商业化应用提供了重要技术支撑。

从系统全生命周期的视角来看,新型策略展现出更强的经济性与可靠性优势。通过减少氢燃料电池的启停次数与负荷波动,有效降低了设备的维护成本与更换频率;合理的能量分配策略延长了辅助储能设备的使用寿命,减少了电池更换带来的经济负担。在能量损耗方面,新型策略通过精准的功率控制与高效的能量回收机制,大幅降低了系统的能量浪费,提升了能源利用效率^[8]。这种兼顾性能提升与成本控制的优化策略,使氢燃料电池混合动力系统在市场竞争中更具优势,为其大规模商业化应用提供了有力支撑。

5 结语

氢燃料电池混合动力系统能量管理策略优化对提升系统性能与推广应用意义重大。当前优化策略已在降低氢耗、提升效率等方面取得良好成效。未来,随着技术进步,可进一步融合人工智能前沿技术,深入研究多能源协同控制与能量高效转换,探索与车辆智能化、网联化技术的深度融合,推动氢燃料电池混合动力系统在更多领域实现高效、稳定应用,助力能源清洁化转型与可持续发展。

参考文献

- [1] 谢嘉欣,郭婉露,秦庆民.氢燃料混合动力机车能量管理策略[J].内燃机与配件,2024,(10):122-124.
- [2] 岡本秀一,张静.FV-E991 系氢燃料电池混合动力动车组[J].国外铁道机车与动车,2024,(03):12-15+48.
- [3] 白晶,王文.一种大功率氢燃料电池混合动力机车动力系统匹配性研究[J].铁道机车与动车,2024,(04):38-40+48+62.
- [4] 郭婉露,康明明,陈雄伟,等.大功率氢燃料电池混合动力机车电气系统设计[J].电力机车与城轨车辆,2023, 46(06): 7-12.
- [5] 邢建华,周志国.大功率氢燃料电池混合动力机车牵引传动系统设计[J].铁道机车与动车,2023,(09):1-5.
- [6] 綦芳,崔周森,张弛,等.数字轨道胶轮电车氢燃料电池混

合动力系统设计与运用[J].机车电传动,2023,(03):57-64.

1-11.

- [7] 任志勇.氢燃料电池混合动力机车运行考核试验过程中主要系统性能优化[J].铁道机车与动车,2023,(04):7-9+15.

- [8] 樊运新,龙源,江大发,等.新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J].电力机车与城轨车辆,2023,46(01):

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS