

高压快充下动力电池极化抑制与充电策略协同优化

徐群杰 夏福禄 李娜娜*

山东劳动职业技术学院汽车工程系, 山东 济南 250000

摘要: 新能源产业快速发展, 新能源汽车对动力电池快充性能需求愈发迫切, 高压快充技术因缩短充电时间成为行业核心方向, 但高压快充易引发电池极化效应, 导致容量衰减、寿命缩短, 阻碍其广泛规模化应用。研究聚焦二者协同优化, 解析极化机制与关键影响因素, 探寻高效抑制技术, 科学合理构建兼顾快充效率与安全性的充电方案, 研究成果可为优化高压快充系统、推动新能源汽车产业高质量发展提供重要技术参考。

关键词: 高压快充; 动力电池; 极化抑制; 充电策略; 协同优化

0 引言

能源转型与绿色发展引领下, 新能源汽车以低排放、高效率逐步取代传统燃油汽车, 成为交通领域变革核心趋势, 动力电池作为核心部件, 充电速度与寿命直接关系用户体验与产业竞争力, 高压快充技术提升电压缩短充电时间, 缓解里程焦虑与充电焦虑, 但高压大电流易引发电池内部极化。极化会打破电化学反应平衡, 诱发局部过热、容量衰减, 严重危及电池安全, 探析高压快充下极化抑制与充电策略协同优化, 化解二者矛盾, 具有重要理论与实践价值。

1 高压快充下动力电池极化特性分析

1.1 动力电池极化的类型与表征

动力电池充放电时的极化, 是电极表面与内部电化学反应和物质传输速率失衡的体现, 具体分为欧姆极化、电化学极化及浓差极化三类, 欧姆极化源于内部电子与离子传输阻力, 含电极、电解质等组件固有电阻及界面接触电阻, 与充电电流强度线性相关^[2]。电化学极化是电极表面电化学反应速率滞后电荷转移, 导致电极电势偏离平衡电势, 高压快充大电流会加剧这一滞后, 浓差极化因充电时电极表面锂离子消耗与电解液补充速率失衡, 浓度差异引发电势偏移, 不同极化叠加影响电池充电性能与安全, 可通过电极电势变化、温升速率、充电效率衰减等间接表征。

1.2 高压快充对极化产生的诱发机制

高压快充中, 电压提升致电流密度增大, 是极化加剧核心诱因, 电荷传输时, 大电流加速电极表面电荷积累, 超出电化学反应承载, 电化学极化快速累积, 锂离子嵌入速率提升, 电解液扩散与电极内迁移速率难匹配, 浓差极化加剧。高压改变电解液电导率与电极界面阻

抗, 增大欧姆极化阻力, 叠加极化效应, 极化焦耳热改变电池温度场, 升温虽降界面阻抗, 高温却加速电解液分解与电极老化, 形成极化—温升—性能衰减恶性循环^[3]。

1.3 极化现象对动力电池性能的影响

极化累积会多维度劣化动力电池性能, 充电效率上, 极化引发的电势偏移增加能量耗散, 部分电能以热能流失, 实际与理论充电容量偏差扩大, 充电效率下降, 循环寿命上, 长期极化加剧电极材料结构破坏, 如正极溶出、负极锂枝晶析出, 加速电解液分解老化, 电池内阻攀升, 循环寿命大幅缩减^[4]。安全性能层面, 极化诱发的局部过热削弱热稳定性, 热量未及时散出易诱发热失控, 威胁使用安全, 极化还会导致充放电电压平台波动, 干扰新能源汽车动力输出平顺性。

2 动力电池极化抑制核心技术路径

2.1 电极材料结构优化技术

电极材料作为电化学反应的核心承载介质, 结构特性深刻关联离子传输效率与电荷转移速率, 是抑制极化的核心切入点, 优化电极材料孔隙结构、搭建多级孔道体系, 能够提升电解液浸润效果与锂离子扩散通道的顺畅度, 进而缓解浓差极化, 多孔纳米结构的正极材料应用可扩大电极与电解液的接触范围, 提升电化学反应效率, 削减电化学极化的累积效应^[5]。负极材料改性过程中, 表面包覆技术可在材料表层形成防护层, 阻滞电解液分解与锂枝晶滋生, 减小界面阻抗, 弱化欧姆极化与电化学极化的叠加作用, 调整电极材料的粒径分布与晶体构型, 能够提升材料的离子导电性能与电子导电性能, 从本质上改善高压快充场景中的极化现象。

2.2 电解液体系改良策略

电解液承担锂离子传输载体功能,性能表现直接关联高压快充场景中的极化水平,高压快充场景下,电解液体系改良的核心导向在于提高离子电导率、拓展电化学稳定窗口及强化热稳定性,优化电解液溶剂配比,选取高介电常数、低粘度的溶剂组合,能够减小锂离子迁移阻力,提高离子传输效率,进而缓解浓差极化。功能性添加剂的引入是电解液性能改良的关键路径,离子液体添加剂的添加能够提升电解液高温稳定性,削减充电过程中电解液的分解程度,成膜添加剂的融入可在电极表面构筑稳定的固体电解质界面膜,减小界面阻抗,阻滞欧姆极化,高盐浓度电解液与新型电解质材料的研发,能够进一步拓展电解液的高压稳定区间,契合高压快充的工作诉求,降低极化现象的发生概率。

2.3 电池热管理系统协同调控

温度作为影响动力电池极化特性的关键环境要素,科学的热管理调控能够抑制极化现象的进一步发展,高压快充阶段,极化引发的焦耳热会造成电池温度上升,过高温度则会加快极化累积与性能衰退,热管理系统需达成控温与抑极化的协同效应。优化热管理系统结构设计,采用液冷、风冷与相变散热相结合的复合散热方案,能够提高散热效率,迅速散出极化引发的热量,将电池温度维持在最佳工作范围,基于电池实时温度反馈的动态热管理方案,可依据充电阶段的温度波动调整散热功率,规避过度散热或散热欠缺的情况,热管理系统与充电策略的协同联动,可在温度上升时适度调整充电电流,平衡快充效率与极化抑制,保障电池充电阶段的安全与稳定性能。

3 高压快充策略的优化设计

充电桩行业上游设备元器件主要包括充电设备、配电设备以及管理设备三类,充电桩的主要成本在于充电硬件设备,占比达90%以上,充电模块是充电桩的核心设备,其主要功能是将电网中的交流电转化成可以为电池充电的直流电,约占充电系统成本的40%左右。其中,IGBT功率器件是充电模块的关键组成部分,是在充电过程中起着电力转换与传输作用的核心器件,目前国内如士兰微、斯达半导、时代电气等都在积极布局IGBT,以实现国产替代,充电桩上游技术门槛低,产品差异化程度低,竞争尤其激烈,由于设备门槛低,充电桩整机制造商与元器件生产商、中下游的建造运营商也有部分重合,比如特锐德虽主要负责充电桩的运营,但也进行充电设备元器件的生产,普天新能源和特斯拉的业务也兼顾了充电桩的整机

制造和运营^[1]。

3.1 传统快充策略的局限性分析

传统高压快充策略多采用恒流-恒压模式,充电初期以恒定大电流推进,虽能加快充电进程,却易促成极化的快速累积,电池电压抵达设定阈值后切换至恒压阶段,充电电流随之逐步衰减,充电效率明显下滑,无法实现快充效率与极化抑制的有效平衡。传统快充策略对电池状态缺乏实时感知能力,未充分考量SOC、温度、内阻等关键参数的动态波动,沿用固定充电参数开展充电操作,在电池不同工作状态下易诱发过度极化或充电不充分的情况,电池SOC处于较高水平时,若持续保持较大充电电流,会进一步加剧极化,低温环境中,固定充电电流难以适配电池内阻增大的特性,导致极化与充电性能进一步劣化,传统快充策略的静态特征与单一属性,使其难以适配高压快充场景的性能诉求。

3.2 基于极化反馈的动态快充策略

基于极化反馈的动态快充策略将电池实时极化状态作为核心调控基准,借助对极化程度的精准捕捉与充电参数的动态适配,达成快充效率与极化抑制的协同效果,核心在于搭建精准的极化表征模型,采集充电过程中电池的电压、电流、温度等实时数据,融合电化学机理模型完成极化电压的估算,达成极化状态的实时追踪。依托极化反馈信号,运用自适应控制算法动态适配充电电流与电压,极化程度超出阈值时适度下调充电电流以阻滞极化累积,极化程度回落之后再逐步提升充电电流,确保快充效率不受影响,融合电池SOC阶段特性,低SOC阶段采用较大电流实现快速充电,高SOC阶段依托极化反馈动态缩减电流,能够进一步优化充电曲线,降低全充电过程中的极化损耗,强化充电性能与电池使用寿命。

3.3 多目标协同快充策略的构建

高压快充策略的优化过程需统筹快充效率、极化抑制、电池寿命与安全性等多重核心目标,搭建多目标协同快充策略成为提升整体性能的核心路径,依托多目标优化理论框架,该策略将快充时间最短化、极化程度最小化、寿命损耗最低化列为核心优化导向,构建多目标优化数学模型,解析各目标间的耦合关联特性,采用权重赋值策略协调不同目标的优先层级,充电初期侧重保障快充效率,充电后期侧重抑制极化、筑牢安全防线。运用智能优化算法对模型进行求解,获取适配性最优的充电电流-电压动态曲线,纳入电池全生命周期特性指标,依据电池老化演进状态动态适配优化目标权重与充电参数,使快充策略契合电池不同生命周期阶段的性能表现,达成长期维度上的多目标

协同适配,增强高压快充系统的综合运行效能。

4 极化抑制与充电策略协同优化机制

4.1 协同优化的核心逻辑与框架

极化抑制与充电策略的协同优化,核心逻辑在于破除两者各自独立的调控范式,构建极化状态感知-充电参数动态适配-抑制技术协同响应的闭环调控机制,达成二者深度耦合与协同增益的效果,协同优化框架的搭建需厘清三大核心模块——状态感知模块、决策调控模块及执行响应模块。状态感知模块依托传感器与专用算法,精准捕获电池极化状态、SOC、温度、内阻等多维度特征参数,决策调控模块以感知数据为基础,融合极化抑制技术特性与充电核心目标,借助优化算法输出最优充电参数与抑制技术调控方案,执行响应模块同步落实充电参数适配与极化抑制技术的协同运作,达成极化现象的精准管控与快充效率的高效保障,这一框架依靠各模块的协同联动,让极化抑制技术与充电策略形成相互适配、彼此支撑的良性互动,强化整体调控效能。

4.2 协同优化的关键耦合节点

极化抑制与充电策略的协同优化应紧扣关键耦合节点,达成调控资源的精准适配与高效调配,温度-电流耦合节点是核心环节,温度波动既为极化产生的伴生现象,也是左右极化程度的关键要素,协同调控热管理系统与充电电流,能够促成温度控制-极化抑制-电流优化的良性循环。SOC-极化耦合节点应依据电池SOC阶段特征,动态适配极化抑制力度与充电参数,SOC低阶段,极化抑制技术以提升离子传输效率为核心导向,充电策略侧重大电流快充,SOC高阶段,极化抑制技术聚焦强化散热与界面稳定性,充电策略以小电流抑制极化为核心诉求,电池老化状态-协同参数耦合节

点需关联电池老化演进状态,适配极化抑制技术的调控强度与充电策略的优化导向,保障协同优化效能覆盖电池全生命周期。

4.3 协同优化系统的验证与适配

协同优化系统的实用效能需依托多场景验证与动态适配完成落地推广,构建多维度验证体系涵盖实验室模拟验证与实车应用验证,实验室验证环节通过搭建高压快充模拟平台,复现不同温度、SOC水平及老化程度对应的充电场景,检测协同优化系统在极化抑制、快充效率、寿命损耗等方面的调控效能,实车验证通过新能源汽车搭载协同优化系统开展路试,收集实际行驶与充电过程中的相关数据,核验系统在复杂实际场景下的稳定性能与可靠性能。动态适配机制的搭建围绕协同优化参数展开,针对不同电池类型的极化特性差异,适配协同优化算法与调控参数设置,结合不同应用场景的充电诉求,优化目标权重分配与调控逻辑设计,赋予协同优化系统广泛适配能力,助力其规模化落地推广。

5 结语

高压快充技术是新能源汽车产业发展的关键,极化抑制与充电策略的协同优化是提升其性能的核心,本文解析高压快充下动力电池极化的特性与诱发机制,探析电极材料优化、电解液改良、热管理调控等极化抑制路径,构建基于极化反馈的动态与多目标协同快充策略,搭建二者协同优化机制。研究证实,深度协同可有效平衡快充效率与极化抑制,提升电池充电安全性与寿命,未来随智能算法与材料技术发展,需深化协同优化理论研究,提升状态感知精准度与调控智能化,推动高压快充技术向更高效安全可靠迈进,为新能源产业高质量发展提供坚实技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨阳.充电桩:高压快充带来发展新机遇[J].股市动态分析,2022,(09):54-55.
- [2] 李书国,艾亮,贾明,等.基于电化学热耦合模型的锂离子动力电池极化特性[J].中国有色金属学报,2018,28(01):142-149.
- [3] 左小勇.基于模糊控制的锂离子动力电池快速充电法研究[J].襄阳职业技术学院学报,2024,23(05):84-89.
- [4] 徐柏兴,路高磊,王景松,等.电动汽车低压蓄电池自充电策略优化[J].汽车电器,2021,(01):23-24.
- [5] 杨帆.新能源汽车高压快充解决方案探索[J].汽车维护与修理,2025,(08):120-122.

作者简介: 徐群杰(1990.09—),男,汉,江苏宿迁人,硕士,副教授,主要研究方向为新能源汽车技术、智能网联汽车技术。

通讯作者: 李娜娜(1992.03—),女,汉,山东诸城人,大学本科,讲师,主要研究方向为新能源汽车技术。