

兼顾能量调度与电芯一致性的电化学储能系统优化应用

者文杰

国投电力(广西)有限公司 广西 南宁 530200

摘要: 电化学储能系统兼具调峰、频调及新能源消纳功能,其效益与安全取决于能量管理及电芯一致性。现有调度策略多侧重经济性与功率响应,忽视制造差异、温度不均及老化导致的电芯一致性劣化,引发“木桶效应”,加速容量衰减并累积安全隐患。本文针对能量调度与电芯一致性的双重需求,剖析二者在控制逻辑与时间尺度上的冲突机理,提出以“调度经济性-寿命损耗-安全裕度”为协同目标的能量管理框架。该框架涵盖动态老化成本建模、一致性约束嵌入、基于等效循环的充放电优化及主动均衡协同等关键技术,并从系统架构、状态感知、策略适配及运维管理等维度探讨工程应用路径,旨在为大规模储能系统的安全高效运行提供理论支撑与策略参考。

关键词: 电化学储能; 能量调度; 电芯一致性; 协同优化; 主动均衡

引言

电化学储能凭借快速响应、高精度调节及布置灵活等优势,成为新型电力系统关键支撑。在电源侧平抑波动,电网侧参与调峰调频,用户侧实现套利与需求响应。随着装机增长,经济性与安全性凸显,能量调度策略和电芯一致性管理成为决定长期效益的核心。能量调度决定充放电行为,影响市场收益;电芯一致性关乎容量、寿命及安全。理想状态下,二者需协同以最小化对一致性的负面影响,实现全生命周期价值最大化。然而实际工程中,两者分属不同层级与时间尺度:能量管理系统侧重经济性调度,电池管理系统侧重被动均衡保护,缺乏统筹。本文旨在从系统视角审视能量调度与电芯一致性的耦合关系,提出协同优化策略框架,并探讨工程实现路径,以提升储能系统整体运行效能。

1 能量调度与电芯一致性的耦合机理与矛盾分析

1.1 能量调度对电芯一致性的作用路径

电化学储能系统的能量调度通过控制各电芯的充放电电流、充放电深度(DOD)和充放电倍率(C-rate)来响应外部功率需求。该过程通过三条路径影响一致性:充放电深度分布不均——由于电池组内各电芯初始容量和内阻存在差异,在相同电流作用下,容量偏小的电芯实际经历更深的充放电循环,其老化速率更快,进一步拉大与正常电芯的差距;温度梯度加剧差异——调度过程中的大倍率充放电产热显著,而储能系统的热场分布不均,高温区域电芯老化加速,内阻增长快,导致该区域的电芯容量衰减更快;利用率频次偏差——在能量调度中,靠近功率变换器的电芯或内阻较小的电芯往往承担更多电流,长期作用下其累计通流量明显高于其他电芯,加速疲劳劣化。

1.2 一致性劣化对调度能力的反馈约束

电芯一致性下降对能量调度形成显著的反馈约束:一是可用容量缩减,部分电芯先放空或先充满,迫使系统提前终止充放电,降低了调度可调度的能量窗口;二是功率能力衰减,老化严重的电芯内阻增大,在大功率充放电时电压率先达到保护限值,限制了系统的峰值功率响应能力;三是安全风险升高,一致性差异导致的过充、过放和局部热失控概率上升,能量管理系统的调度边界被迫收缩以预留安全裕度^[1]。三者叠加形成恶性循环——越按照原有逻辑调度,一致性越劣化;一致性越差,调度空间越小。

1.3 现有管理架构下的分离困境

当前储能系统的功能分层结构中,能量管理系统(EMS)负责上层调度决策,电池管理系统(BMS)负责电芯监控与均衡,二者通过通信接口交换数据但不共享优化目标。EMS只关心“能否执行指令”,而不关心“执行指令后电芯状态会如何分化”;BMS只关心“当前偏差是否超限”,而不关心“超限是否由近期调度引起”。这种分离导致了系统性偏差:在追求调度经济性的同时缺乏对电芯老化代价的约束,在实施均衡时缺乏对后续调度需求的预测性。二者的优化目标缺乏统一协调层,难以形成全局最优。

2 协同优化策略的理论框架

2.1 优化目标体系的重构

打破分离困境的第一步是重构优化目标。本文将电化学储能系统的优化目标从单一的经济效益最大化扩展为三维目标构成的综合函数:调度经济性 F_E ——储能系统在参与能量市场和辅助服务市场中获得的总收益,减去充放电电费成本和设备折旧成本;一致性损耗代价 F_C ——

当前调度周期内因充放电行为导致的电芯一致性劣化,折算为容量损失成本和维护成本;安全裕度约束 F_s ——电芯的电压、温度、SOC偏差等安全相关状态量,以约束函数形式纳入,确保在极端工况下系统运行在安全区间。三维目标的集成优化可表述为: $\max J = F_E(P(t)) - \lambda_c \cdot F_C(P(t), SOC_i(t)), s.t. F_s \leq F_{s,max}$ 。其中 $P(t)$ 为充放电功率计划, $SOC_i(t)$ 为各电芯的荷电状态, λ_c 为一致性代价权重系数,该系数可根据电池组老化阶段动态调整——运行初期 λ_c 较小侧重收益,运行后期 λ_c 增大加强一致性保护。

2.2 动态老化成本建模

为实现对一致性损耗代价的量化评估,需要建立电芯老化成本的实时估算模型。以电芯容量衰减率作为老化指标,基于现场运行数据和厂家提供的加速老化试验结果,建立经验老化模型: $\Delta Q_i(t) = f(DOD_i(t), T_i, C-rate_i(t))$,式中 ΔQ_i 为容量衰减量, DOD_i 、 T_i 和 $C-rate_i$ 分别是第 i 个电芯的充放电深度、工作温度和充放电倍率。模型参数可借助电化学机理模型与数据驱动相结合的方法进行初始标定,并随运行数据积累持续更新^[2]。每一调度周期内,根据各电芯的预期运行状态,可计算出该周期内各电芯的容量衰减增量及其离散度增量,即为该调度策略对一致性的边际损耗。该边际损耗值以容量损失成本的形式计入总成本函数,引导调度算法在方案寻优时自发避开对一致性损伤最大的运行区间。

2.3 一致性约束嵌入调度优化

将一致性状态作为调度优化中的动态约束条件,而非仅仅作为监控指标。具体方法如下:定义一致性裕度指标 $M = \min(SOC_i)/\max(SOC_i)$ 和容量离散度 $\sigma_Q = \text{std}(Q_i)/\text{mean}(Q_i)$,当前 M 低于设定下限或 σ_Q 超过上限时,触发电量调度模式切换——从“经济最优”模式进入“一致性恢复”模式,在该模式下减少充放电深度、降低充放电倍率,并将充放电截止条件从系统整体电压限值修正为最弱电芯的电压限值,以保护性能最差电芯,防止其进一步加速劣化。同时,模式切换应具有延迟返回和滞环特性,避免频繁切换引起的系统振荡。

2.4 基于等效循环次数的充放电策略优化

电芯的衰老速率与等效循环次数直接相关。本文引入“等效满充满放次数”作为调度策略优劣的衡量指标,将外部功率曲线转化为电池组内部的等效循环累计值,该值越小则表明相同的调度收益所付出的老化代价越低。基于这一指标,可在满足功率响应时间要求的前提下优化充放电曲线的形状——用缓坡代替陡峭阶跃、用分段充电代替持续恒流、在功率指令允许范围内将大倍率调度分散到多段中等倍率调度。此类优化虽然可能

略微降低单次调度的瞬时响应速度,但在不超出调度响应时间窗的前提下,可显著降低等效循环数,延长电池组整体寿命。

3 关键技术支持与实现路径

3.1 高精度状态感知与SOC/SOH在线估计

协同优化的精度高度依赖于电芯级状态估计的准确度。需要部署基于扩展卡尔曼滤波或无迹卡尔曼滤波的SOC估计器,以及基于容量增量分析法或阻抗谱在线辨识的SOH估计器。对于电芯间温度分布,应在模组关键位置布置温度传感器阵列,并结合热模型进行空间插值,获取温度场的连续分布估计。所有状态估计结果应在储能系统控制器中以统一的数据结构汇总,作为优化算法的输入,状态估计的时间分辨率不低于1s。

3.2 主动均衡与调度策略的协同设计

传统的被动均衡仅在充电末端通过电阻耗散多余电量,效率低且无法在放电过程中纠正偏差。为实现与上层调度策略的有效协同,储能系统应采用主动均衡拓扑(如基于变压器的能量搬移式均衡或基于开关电容的电荷穿梭式均衡),其均衡电流和均衡方向应具备可控性^[3]。协同逻辑为:在调度计划生成阶段,优化算法将各电芯的预测SOC轨迹输出给均衡控制器,均衡控制器据此预判可能出现偏差的电芯和时间点,提前启动均衡动作,使电芯状态在调度执行前达到更为一致的状态。这种“预均衡”模式与“调度中均衡”相结合,可有效降低调度过程中因一致性问题引起的功率受限概率。

3.3 多尺度分层优化架构

构建“长期规划层-中期优化层-实时执行层”三层架构。长期规划层以周或月为周期,根据电芯老化趋势和预期市场收益曲线,制定原则性的调度策略和一致性管理目标。中期优化层以小时或日为周期,基于超短期电价预测、负荷预测和电芯健康状态,求解兼顾经济性和一致性约束的能量调度方案。实时执行层以秒级周期响应调度指令,根据当前SOC分布和温度状态对中期方案进行微调,并管理主动均衡的执行。三层架构通过时间尺度解耦,使各层算法复杂度可控,同时保证从长期战略到瞬时响应的连贯性。

3.4 信息物理融合的系统集成

将能量调度与一致性管理的协同在系统集成层面落地,需要在储能电站的控制系统中增设“协同优化模块”,该模块位于EMS与BMS之间,作为二者的信息交互和决策协调中枢。该模块接收EMS的调度指令请求和BMS提供的电芯级状态数据,经过协同优化计算后,向EMS返回修正后的可执行功率区间和推荐充放电曲线,

向BMS发送预均衡指令和均衡目标参考值。该模块的引入不改变EMS和BMS的基本功能框架,是一种“软协同”集成方式,便于在已有储能系统上进行升级改造。

4 应用要点与运维保障

4.1 不同应用场景下的策略适配

电化学储能的典型应用场景包括新能源配套储能、电网独立调频储能、用户侧峰谷套利储能等,不同场景对能量调度和电芯一致性的权衡关系各有侧重。新能源配套储能充放电频次低、但放电深度大,应重点优化DOD分配策略,避免部分电芯长期处于深度放电区间;电网独立调频储能响应频繁、倍率高,应优先约束充放电倍率分布,并强化热管理协同;用户侧套利储能充放电时段集中、周期规律,可根据电芯老化状态动态微调充放电时刻^[4]。协同优化策略在各场景的应用需进行针对性参数整定和约束权重调整。

4.2 运行维护制度的协同配套

协同优化策略的有效实施离不开运维层面的制度配合。定期(建议每季度)对电池组进行离线容量标定,校准在线的SOH估计结果;对协同优化模块的权重系数和老化模型参数进行回顾性分析,根据实际运行数据修正模型偏差;制定基于电芯一致性状态的分级维护制度——当一致性指标处于健康区间时以在线调度优化为主,当进入关注区间时安排离线维护,当进入危险区间时降低调度上限并准备更换问题模组。

4.3 数据积累与持续优化

协同优化策略的有效性依赖于运行数据的持续积累。应建立储能系统全生命周期运行数据库,系统记录

每一次充放电的电芯级电压、电流、温度变化曲线,以及SOC/SOH估计结果、均衡动作记录和调度指令执行情况。通过对历史数据的回放和分析,可不断优化老化模型参数、修正权重系数取值、改进主动均衡策略的预判精度,实现协同优化策略的自适应进化。

5 结语

电化学储能系统的能量调度与电芯一致性管理紧密耦合:调度塑造一致性演化,一致性制约调度边界。本文提出以“调度经济性-寿命损耗-安全裕度”三维协同为目标的优化策略,涵盖动态老化成本建模、一致性约束嵌入、主动均衡及多尺度分层优化等关键技术,并探讨了工程应用路径。核心理念在于统筹当前收益与长期可用性,将电芯健康状态纳入调度效用函数,而非孤立追求单次经济收益。这一协同优化理念推动储能电站从“容量驱动”向“价值驱动”转型。未来,随着电芯级感知精度提升和AI技术深化,能量调度与电芯管理将迈向精准、自适应和预测性新阶段,有力支撑电化学储能系统的安全高效发展。

参考文献

- [1]陈海生,李泓,马文涛.电化学储能技术发展现状与趋势展望[J].储能科学与技术,2023,12(1):1-11.
- [2]慈松,石祥,刘爽.大规模储能系统中电池一致性问题研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(22):8099-8112.
- [3]张宇,周杨,李春光.计及老化成本的储能电站多目标优化调度策略[J].电力系统自动化,2023,47(15):78-86.
- [4]杨水丽,惠东,李建林.基于等效循环寿命的储能电池充放电优化策略[J].电网技术,2022,46(10):3891-3899.