

电化学储能参与电网调峰-调频联合运行策略研究

吴日卓

国投电力(广西)有限公司 广西 南宁 530200

摘要: 高比例可再生能源并网导致电力系统净负荷波动加剧,调峰与调频资源需求同步增长且时间尺度深度耦合,传统独立运行模式难以兼顾调节经济性与运行安全性。本文提出电化学储能参与电网调峰-调频联合运行策略,系统分析储能功率-能量响应特性与多时间尺度调节互补机理,构建基于动态分区和自适应控制框架的协调优化模型,重点讨论SOC健康管理、多层级安全约束、指令平滑衔接及市场信号交互等关键问题。研究表明,联合运行策略能够有效压缩调峰缺额与调频偏差,显著提升储能综合利用率与系统频率稳定性,为新型电力系统灵活调节资源优化配置提供系统性理论参考。

关键词: 电化学储能;调峰调频;联合运行;协调控制;动态分区

引言

在“双碳”目标驱动下,高比例新能源接入导致电力系统惯量下降、频率波动加剧,调峰调频需求呈现新特征。传统火电调节能力受限,抽水蓄能受地理制约,而电化学储能凭借毫秒级响应及灵活布局优势,成为解决协同难题的关键。然而,当前工程多采用独立控制或简单切换策略,忽视功率-能量-时间维度的耦合效应,造成容量浪费、寿命衰减及性能不达标。现有研究缺乏联合运行系统性理论框架,尤其在SOC动态恢复、安全约束与市场收益协同方面存在不足。本文立足电网调度实际,系统研究电化学储能参与调峰-调频联合运行策略,重点攻克多时间尺度功率耦合分配、SOC自适应区间管理、指令无扰切换及辅助服务市场衔接等核心问题,旨在为储能高效参与电力调节提供理论依据与策略支持。

1 电化学储能参与调峰与调频的技术特性与需求分析

1.1 调峰与调频的时间尺度差异与运行互补性

调峰旨在应对分钟至小时级的净负荷峰谷变化,属于慢速能量型大容量调节,要求储能具备长时间持续吞吐能力和充裕的可用容量;调频则针对秒至分钟级的瞬时功率不平衡,属于快速功率型精准调节,要求储能具备高响应速率、精确跟踪能力和极短时功率冲击承受能力。二者时间尺度相差约两个数量级,但并非完全解耦独立——调频功率指令的时间积分效应会在数分钟内累积不可忽视的能量偏差,直接影响储能SOC状态,进而改变后续调峰可调用容量;反之,调峰功率曲线中隐含的高频波动分量若不加以滤除,会额外加剧调频控制压力。因此,联合运行的理论基础在于充分利用储能功率密度与能量密度可独立设计的解耦特性,通过分层滤波与动态分配机制,使同一储能系统同时承载两类服务,

最终实现“大容量支撑长周期能量平衡、快速功率平滑短时波动”的相互增益效果。

1.2 电化学储能响应特性对联合运行策略的硬性约束

当前主流的锂离子电池、液流电池等电化学储能技术具有功率密度与能量密度灵活可调、循环效率较高(通常为85%~95%)等应用优势,但同时也存在SOC安全运行区间受限(一般被限定在20%~90%)、充放电倍率直接影响日历寿命与循环寿命、过充过放引发不可逆容量衰减等硬性约束条件。在联合运行场景下,频繁变化的调频指令会引起SOC出现小幅度高频往复波动,叠加调峰环节的大功率深度充放电,极可能使SOC运行轨迹频繁触及安全边界,触发电池管理系统(BMS)保护动作而导致储能单元被动退出运行^[1]。因此,联合运行策略的设计必须将SOC动态管理提升至与功率分配同等重要的核心地位,需要在功率分配环节前置引入SOC反馈修正系数,使得SOC偏高时调频指令优先倾向放电方向、SOC偏低时优先倾向充电方向,从而在无扰动状态下实现荷电状态的平滑自恢复。

2 调峰-调频联合运行策略的总体框架设计

2.1 动态分区与自适应协调控制四层架构

本文提出“动态分区-实时分配-安全校核-滚动修正”四层递阶联合运行框架。第一层(动态分区层)根据电网调度下发的调峰计划曲线和实时频率偏差测量值,将总调节需求清晰分解为调峰基础功率分量和调频微调功率分量;第二层(实时分配层)采用变系数高通滤波算法,将调峰指令中的高频波动成分有效分离并归入调频通道,同时依据储能当前SOC和健康状态(SOH)动态调整滤波时间常数,实现功率的柔性动态分配;第三层(安全校核层)设置SOC正常区、警戒

区和危险区三级预警区间，不同分区实施差异化控制策略——正常区严格按照目标分配执行，警戒区叠加SOC主动恢复偏置以引导荷电状态向中间区域回归，危险区则无条件执行强制充放电保护并降功率运行；第四层（滚动修正层）以每15分钟为滚动周期，结合超短期负荷预测结果和最新频率质量指标，对后续调峰计划进行前瞻性修正，有效避免系统累积性偏差。

2.2 功率-能量-SOC多维度耦合约束模型

设储能额定功率为 P_N ，额定容量为 E_N ，调峰指令功率为 $P_{peak}(t)$ ，调频指令功率为 $P_{freq}(t)$ ，则储能实际输出总功率满足 $P(t) = P_{peak}(t) + P_{freq}(t)$ ，且必须保证 $|P(t)| \leq P_N$ 。系统SOC动态演化方程可表示为：

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{E_N} \int_0^t \eta(\tau) P(\tau) d\tau$$

其中 η 为充放电效率系数。联合运行需同时满足的关键约束集合包括：SOC上下限约束 $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$ ，功率瞬时限幅约束 $|P(t)| \leq P_N$ ，以及功率变化率约束 $|dP/dt| \leq R_{ramp}$ （ R_{ramp} 为爬坡率限值）。引入综合性能评价指标 $J = \int_0^T [\alpha |P_{peak} - P_{peak}^{ref}|^2 + \beta |P_{freq} - P_{freq}^{ref}|^2 + \gamma (SOC - SOC_{ref})^2] dt$ ，通过设计动态权重系数 α, β, γ 随SOC偏差和频率越限程度自适应调整，以实现调峰跟踪精度、调频响应效果与SOC健康度三者之间的动态最优协调。

3 联合运行策略的关键技术环节深化

3.1 基于频率偏差分层处理的调频功率自适应调整

针对电网频率波动幅值的显著差异，本文将频率偏差划分为调频死区（ $\pm 0.033\text{Hz}$ ）、正常调节区和紧急越限区三个层次。在死区内将调频功率指令置零，有效避免储能系统因频繁动作而导致寿命无谓损耗；在正常调节区采用比例-微分控制，且控制增益随SOC线性调整——当SOC偏离理想中值越远，增益适度降低以防止加剧偏离；在紧急越限区则采用变增益快速响应模式，同时触发调峰计划的临时性紧急修正，即暂时降低或增加调峰功率输出以腾挪充裕的调节裕度^[2]。这种分层递进策略既保证了调频响应的快速性和准确性，又防止了调峰计划被高频扰动信号完全打乱。

3.2 SOC主动恢复与调峰计划的协同修正机制

SOC管理是联合运行策略最核心的技术难点。本文提出“超前预测-分级预警-协同回充”三阶段闭环协同法。超前预测阶段根据未来15分钟预测的调峰和调频功率时序，推演SOC变化趋势轨迹；分级预警阶段当预测结果显示SOC即将进入警戒区时，立即生成恢复性功率偏置量，该偏置量以柔性方式叠加至调峰指令中，引导

储能主动向中间荷电状态靠拢；协同回充阶段充分利用负荷低谷时段或新能源弃电窗口，安排小电流慢速深度恢复至理想中值。此过程需与电网调度部门保持信息交互，将修正量以“调峰偏移申报”形式上报，确保策略调整不违背并网调度协议。

3.3 多时间尺度滚动优化与指令无扰平滑衔接

为避免调峰指令与调频指令在时序切换点产生功率突变或跳跃现象，本文引入指令平滑预处理模块。该模块首先对调峰计划曲线实施低通数字滤波，保留其基波分量而滤除高频噪声；同时对调频指令执行限幅处理和斜率限制。滚动优化每5分钟执行一次，根据最新实测频率偏差和SOC状态，重新滚动计算未来5分钟内的优化功率指令序列，并采用模型预测控制（MPC）的滚动优化理念，但此处仅描述其策略逻辑而不涉及具体数值求解^[3]。平滑衔接还包括模式切换逻辑——当储能系统进入深度充放电阻滞区时，自动降低调频响应速率权重，将部分调节压力平滑转移至火电或需求侧响应资源，确保系统整体调节连续稳定。

4 联合运行策略与电网调度及电力市场的协同机制

4.1 与自动发电控制（AGC）信号的深度交互策略

当前电网AGC指令通常将调峰基点和调频调节量打包下发，储能接入后需快速解耦并合理响应。本文策略采用“AGC信号解析-分量分离-动态优先级判定”三步骤处理流程：首先通过数字滤波器将AGC指令有效分解为低频调峰分量与高频调频分量；然后根据实时SOC状态和电网频率质量指标进行优先级动态排序——当频率越限时调频优先级无条件高于调峰，当SOC越限时荷电恢复优先级升至最高；最后将综合控制量打包反馈至调度主站，形成“下发-执行-反馈-修正”的闭环信息流。该交互机制特别强调信息流与功率流的严格同步，并针对通信延迟设置了预测补偿环节，有效规避因时延导致的控制失效风险。

4.2 辅助服务市场竞争环境下的策略适配与收益优化

随着电力现货市场和调频辅助服务市场的逐步完善，储能联合运行策略必须兼顾技术性能与经济收益的双重目标。本文提出“容量弹性预留-动态风险报价-收益分项结算”的适配方案：根据调峰和调频的实时市场价格信号，动态调整储能容量在两类服务间的预留比例，实现有限容量资源的价值最大化；报价策略中引入SOC风险因子，当SOC偏离理想区间时自动提高报价门槛或适度降低投标量，以覆盖潜在的寿命折损成本；收益分配机制则按照实际贡献功率的积分值分别结算调峰收益和调频收益，形成清晰的经济激励导向，引导储能运营商主动参与联合运行模式。

5 策略实施的工程可行性条件与综合保障措施

5.1 信息感知精度与通信实时性硬性要求

联合运行策略的有效实施高度依赖高精度SOC/SOH在线估算、高分辨率频率测量（精度需优于0.01Hz）以及调度指令的快速可靠接收。工程现场需配置高性能BMS与能量管理系统（EMS）之间的高速冗余通信链路，数据传输周期原则上不大于100ms。针对可能出现的通信中断或数据跳变异常，策略内部预先植入容错降级模式——若短时失联则按最后一次有效指令保持输出并逐步降功率；若长时间失联则自动无扰切换至调峰保底运行模式，主动退出调频服务，确保储能系统本体安全和电网运行安全不受威胁。

5.2 储能寿命折损量化与运维策略动态平衡

频繁的调频响应必然加剧电池电极材料的循环老化，联合运行策略必须将寿命折损成本内化为控制决策的考量因素。本文建议引入等效循环寿命折算模型，将每次充放电深度和倍率折算为等效标准循环次数，当累计等效次数接近设计阈值时，策略自动执行以下动作：适度增大调频死区宽度、降低调频响应增益系数，并主动向上级调度机构申请减少后续调频中标容量^[4]。运维层面需定期开展SOC在线校准和容量保持率测试，动态修正模型参数，确保策略在全生命周期内的长期有效性和经济合理性。

6 结语

电化学储能参与调峰-调频联合运行是提升新型电力

系统灵活性、保障高比例新能源消纳及电网安全的关键路径。本文深入剖析调峰与调频的时间尺度互补机理及储能运行约束，系统提出“动态分区-自适应协调控制”的四层联合运行总体框架。重点阐述了功率-能量-SOC多维度耦合模型、频率分层调频策略、SOC三阶段主动恢复机制、滚动优化平滑衔接方案以及与AGC/电力市场的协同交互机制。研究表明，该策略能有效兼顾调节精度、荷电健康度、设备寿命和经济收益等多重目标，为储能从单一辅助服务向多品种价值叠加利用转型提供了理论参考。未来研究可进一步拓展至多类型混合储能协同、云边端分布式控制以及源网荷储不确定环境下的鲁棒优化等领域。

参考文献

- [1]张华,李明,王强.高比例新能源电力系统储能调峰调频协同控制综述[J].电力系统自动化,2023,47(5):1-15.
- [2]陈思远,赵振宇,刘洋.考虑SOC恢复的电池储能参与电网二次调频策略[J].电网技术,2022,46(12):4820-4829.
- [3]刘志刚,孙宏斌,郭庆来.面向调峰调频联合服务的储能系统功率分配方法[J].中国电机工程学报,2024,44(3):987-998.
- [4]王建华,周孝信,吴鸣.电化学储能参与电力辅助服务市场的优化运行模型[J].电力系统保护与控制,2023,51(18):112-121.