

储能型变电站协调控制与优化运行策略研究

解金矿

中能建建筑集团有限公司 安徽 亳州 230000

摘要：随着新型电力系统的发展，储能型变电站在提升电网灵活性、平衡供需矛盾方面发挥着关键作用。然而，储能系统与变电站之间的协调控制仍面临响应不匹配、容量配置不合理、充放电频繁导致寿命衰减以及控制策略适应性不足等问题。本文围绕储能型变电站的协调控制与优化运行展开研究，构建多时间尺度协同控制架构，提出基于场景的容量优化配置方法，设计兼顾负荷平滑与寿命均衡的充放电管理策略，并融合人工智能技术实现自适应实时优化控制。研究成果有助于提升储能系统运行效率与经济性，为智能电网发展提供技术支持。

关键词：储能型变电站；协调控制；优化运行

1 引言

在“双碳”目标推动下，可再生能源接入比例持续提高，电力系统对灵活调节资源的需求日益迫切。储能型变电站作为集成电能存储、电压调节与负荷管理功能的新型基础设施，成为支撑电网安全稳定运行的重要手段。其通过在变电站内配置储能系统，实现对电能的时空转移，有效缓解峰谷差、抑制功率波动并提升供电可靠性。然而，当前储能系统与变电站主设备之间缺乏高效协同机制，导致运行效率受限。因此，开展储能型变电站的协调控制与优化运行策略研究，对于提升系统整体性能、延长设备寿命、降低运维成本具有重要意义，是构建新型电力系统的关键环节之一。

2 相关概念和理论概述

储能型变电站是指在传统变电站基础上集成电化学储能、超级电容或飞轮等储能装置，具备能量双向流动能力的智能化变电设施。其核心功能包括削峰填谷、频率调节、电压支撑及应急备用等。协调控制理论旨在实现多设备、多目标间的动态配合，通常涉及分层控制结构，涵盖调度层、协调层与执行层。优化运行则依托数学规划方法，如线性规划、动态规划与模型预测控制，结合电网运行状态进行决策。此外，现代控制理论中的鲁棒控制、模糊控制及人工智能算法也为复杂工况下的自适应调控提供了技术支持，为储能与变电站一体化运行奠定了理论基础。

3 问题分析

3.1 储能系统与变电站间动态响应不协调问题

储能系统与变电站主设备在控制周期、响应速度和控制目标上存在差异，导致动态响应不协调。例如，变压器调压响应较慢，而储能系统可实现毫秒级功率调节，二者在电压波动调节中易出现动作冲突或滞后现象。此外，现有控制系

统多采用独立运行模式，缺乏统一的信息交互机制，难以实现功率分配与状态反馈的实时同步。这种不协调不仅降低了系统调节精度，还可能引发振荡或过补偿现象，影响供电质量与设备安全，制约了储能效益的充分发挥。

3.2 多源储能容量配置不合理导致利用率偏低问题

当前储能型变电站常采用混合储能配置，如锂离子电池与超级电容组合，以兼顾能量密度与功率密度优势。但在实际工程中，容量配置多依赖经验或静态负荷预测，未充分考虑不同储能单元的技术特性与运行场景需求，导致部分储能长期处于低负载或闲置状态。同时，缺乏对全生命周期成本与收益的综合评估，造成投资浪费。容量配置失衡使得高成本储能单元频繁启停而低成本单元未能充分利用，整体系统利用率偏低，削弱了经济性与可持续性。

3.3 变电站负荷波动下储能充放电频繁引发寿命衰减问题

变电站负荷具有明显的时序波动特征，尤其在工业区或城市中心区域，日负荷变化剧烈且不可预测。在此背景下，储能系统需频繁进行充放电操作以维持功率平衡，导致电池循环次数急剧增加。频繁的深度充放电加速了电极材料老化与电解液分解，显著缩短电池使用寿命。此外，温度波动与SOC（荷电状态）管理不当进一步加剧衰减过程。寿命衰减不仅提高更换频率与运维成本，也影响系统长期运行的可靠性，成为制约储能经济性的重要瓶颈。

3.4 现有控制策略难以适应复杂运行工况的实时优化需求问题

传统储能控制策略多基于固定规则或离线优化模型，如恒功率控制、分时电价策略等，难以应对高比例新能源接入带来的强不确定性与快速变化的运行工况。这些策略缺乏对电网实时状态的感知能力，无法根据负荷、电价、光伏出力等多维变量动态调整控制参数。面对突发故障、极端天气或市场电价波动，系统响应迟缓甚至失效。同时，多数控制算法计算复杂度高，难以满足在线实时优化的要求，限制了其在实际工程中的应用广度与深度。

4 对策建议

4.1 构建基于多时间尺度的储能-变电站协同控制架构

为解决动态响应不协调问题，应构建覆盖“日前-日内-实时”多时间尺度的协同控制架构。日前阶段依据负荷与新能源预测结果制定储能充放电计划；日内阶段结合滚动预测修正调度指令；实时阶段通过快速通信网络实现储能与变压器、无功补偿装置等设备的联动控制。该架构采用分层分区设计，上层负责全局优化决策，下层执行本地快速响应，确保各设备在不同时间尺度下协同运作。通过引入统一数据平台与标准接口协议，增强信息共享与控制一致性，提升系统整体调节能力与稳定性。

4.2 提出考虑运行场景的多源储能容量优化配置方法

针对容量配置不合理问题，提出一种基于典型运行场景聚类分析的多源储能容量优化模型。首先利用历史数据提取典型负荷与新能源出力场景，采用 K-means 等聚类算法划分运行工况；随后建立以全寿命周期成本最小、系统可靠性最高为目标的混合整数非线性规划模型，综合考虑各类储能的能量/功率成本、效率、循环寿命及退化特性。通过场景概率加权求解最优容量组合，确保在不同工况下各类储能均能高效参与调节，避免资源闲置或过度使用，实现经济性与技术性的平衡。

4.3 设计平滑负荷波动的储能充放电管理与寿命均衡策略

为缓解频繁充放电对寿命的影响，设计一种融合滤波算法与 SOC 区间调控的充放电管理策略。采用小波变换或二阶低通滤波器分离负荷信号中的高频波动成分，由超级电容等高功率储能承担瞬时功率补偿，锂电池主要应对中低频能量调度，从而减少电池循环次数。同时，设定动态 SOC 运行区间，避免长期处于过高或过低状态，并引入温度补偿机制。结合健康状态（SOH）监测数据，实施多电池簇间的轮换充放与均衡控制，延缓整体衰减速率，延长系统服役周期。

4.4 开发融合人工智能的自适应实时优化控制算法

为提升控制策略的适应性与实时性，开发融合深度强化学习（DRL）与模型预测控制（MPC）的自适应优化算法。利用 DRL 框架（如 DDPG、PPO）构建智能体，在模拟环境中学习最优控制策略，自动识别运行模式并调整动作输出；结合 MPC 进行滚动优化，提高短期预测精度与约束处理能力。算法嵌入边缘计算终端，实现实时数据采集、状态估计与决策生成。通过在线训练与迁移学习机制，使系统具备自我进化能力，能够适应负荷变化、设备老化及外部环境扰动，显著提升控制灵活性与鲁棒性。

5 结论

本文围绕储能型变电站协调控制与优化运行中的关键问题展开系统研究，识别了动态响应不协调、容量配置不合理、充放电寿命衰减及控制策略适应性不足四大挑战。针对这些问题，提出了多时间尺度协同控制架构、基于场景的容量优化配置方法、负荷平滑与寿命均衡管理策略以及融合人工智能的自适应控制算法。研究从系统架构、资源配置、运行管理和智能决策四个维度构建了完整的优化体系，有效提升了储能系统的运行效率、经济性与可靠性。成果可为新型电力系统中储能型变电站的规划与运行提供理论支持与技术路径，助力能源转型与电网智能化升级。

参考文献

- [1] 郭标, 杜宏飞, 沈阳. 智能变电站中混合储能系统的快速充放电优化[J]. 电力设备管理, 2025, (3): 72-74.
- [2] 唐谦. 储能技术在变电站测控系统故障保护与恢复中的应用研究[J]. 光源与照明, 2024, (7): 147-149.
- [3] 张中丹, 皮霞, 杨德州, 等. 电池储能电站替代变电站升级的优化决策配置方法

[J]. 电力建设, 2023, 44 (7) :41-49.

[4] 吕亚霖, 尹常永, 李奇峰. 变电站储能研究现状及储能优化控制技术分析[J]. 电子世界, 2020, (22) :20-21.