

风力发电与储能系统协同控制策略及经济性分析

王新元

沙电投资（上海）有限公司 上海

【摘要】本文围绕风力发电与储能系统的协同控制策略及其经济性展开研究。针对风电出力波动大、并网稳定性差等问题，建立了包含风力发电、储能设备及电网的综合模型，提出基于预测控制与能量优化分配的协同控制方法。通过对风电功率预测、储能调度及实时负荷平衡的多目标优化，提升系统运行的稳定性和能效。在此基础上，引入全寿命周期成本分析方法，评估储能配置方案对整体经济性的影响。仿真结果表明，所提策略能够有效降低弃风率、改善并网质量，并在投资成本与运行收益之间实现最佳平衡，为风电大规模并网及清洁能源消纳提供参考。

【关键词】风力发电；储能系统；协同控制；经济性分析；能量优化

【收稿日期】2025 年 11 月 5 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 6 日 **【DOI】**10.12208/j.jeee.20250223

Coordinated control strategy and economic analysis of wind power generation and energy storage system

Xinyuan Wang

ACWA Power, Shanghai

【Abstract】This study investigates coordinated control strategies and economic efficiency in wind power generation with energy storage systems. To address challenges such as significant output fluctuations and poor grid stability, we developed an integrated model encompassing wind turbines, energy storage devices, and the power grid. The proposed method combines predictive control with energy optimization allocation to enhance system stability and energy efficiency through multi-objective optimization of wind power forecasting, energy storage scheduling, and real-time load balancing. Furthermore, a full life cycle cost analysis is introduced to evaluate the economic impact of energy storage configurations. Simulation results demonstrate that the proposed strategy effectively reduces wind curtailment rates, improves grid-connected performance, and achieves optimal balance between investment costs and operational returns. These findings provide valuable insights for large-scale wind power integration and clean energy utilization.

【Keywords】Wind power generation; Energy storage systems; Coordinated control; Economic analysis; Energy optimization

引言

随着能源结构向低碳化转型，风力发电在全球能源体系中占据越来越重要的地位。风电功率的随机性与间歇性使电网面临频率波动、调度压力增大等挑战。储能系统作为柔性资源，为平滑风电输出、提升并网稳定性提供了新的技术路径。如何实现风电与储能的高效协同控制，同时兼顾系统运行的经济性，成为电力系统研究的关键问题。本文在协同优化与成本评估的基础上提出控制策略，为风电并网运行提供更具可行性的技术支撑。

1 风力发电并网特性与波动性问题研究

风力发电作为可再生能源的重要形式，在推动能

源结构转型和实现低碳发展目标方面发挥着关键作用。风力发电在并网运行中存在功率波动性强、可预测性差等固有特性，这对电力系统的安全稳定运行提出了严峻挑战。风速受气象条件、地形等多因素影响，表现出显著的随机性与间歇性，导致风电输出功率呈现剧烈波动^[1]。当风力发电大规模接入电网时，功率不确定性会引发频率波动、电压失稳和功率潮流反向变化等问题，增加调度难度和系统运行风险。

在风力发电并网过程中，风电机组的控制策略与电网特性密切相关。双馈感应发电机（DFIG）和永磁同步发电机（PMSG）等主流机组类型在功率控制、无功调节和故障穿越能力上存在差异，影响了风电场整

体并网性能。对于高比例风电接入的系统而言，频率支撑能力不足、惯量减弱等问题尤为突出，传统的电网调频手段已难以满足需求^[2]。风电功率的预测精度直接决定了电网运行的可控性，若预测偏差过大，易导致备用容量不足或调峰压力过高，增加系统成本与运行风险。

在这一背景下，风力发电并网问题不仅涉及电气特性和控制策略，还与电网结构、市场机制和能源政策密切相关。随着风电装机规模的不断提升，风电消纳能力成为制约可再生能源发展的核心因素。通过研究风电功率波动对系统惯量、频率调节和电压稳定的影响，可为储能系统的配置提供理论依据。储能装置能够在风功率过剩时吸收多余能量，在风功率不足时释放补偿，实现对风电波动的有效平滑和削峰填谷。只有在充分理解风力发电并网特性的基础上，结合风电出力预测技术与储能优化配置，才能为后续协同控制策略的设计奠定坚实的理论和实践基础。

2 储能系统在风力发电中的调节作用机理

在风力发电并网运行中，储能系统通过能量的双向调节在平衡风电功率波动方面发挥关键作用。由于风速的不确定性导致风电出力频繁波动，电网频率和电压容易受到冲击，储能系统通过在高风速阶段吸收多余电能，在低风速阶段释放储备电能，实现对风电功率的平滑处理。通过快速响应特性，储能系统能够有效降低弃风率，提高风电场的有功功率稳定性和无功电压支撑能力^[3]。不同储能技术在响应速度、容量密度和循环效率方面各具特点，其中锂电池、钠硫电池和超级电容在风电场应用中最为广泛，能够满足从毫秒级到分钟级的动态调节需求，为提升风电并网质量提供了重要支撑。

在风力发电与电网交互过程中，储能系统不仅起到削峰填谷的作用，还在一次调频、二次调频及无功补偿中发挥核心功能。当风电场大规模接入电网时，传统发电机组的惯量支撑能力不足，储能系统可通过虚拟惯量控制和快速功率补偿机制，显著增强电网的动态稳定性。储能系统还能与风电功率预测技术相结合，通过基于模型预测控制（MPC）的优化调度，实现对风电波动趋势的提前响应，降低备用容量需求和电网频率偏差。通过引入分布式储能与集中式储能相结合的多层次控制架构，可以提高风电场的运行灵活性，实现区域电网内部功率波动的局部消化，减轻主网调度压力，提升可再生能源的整体利用率。

储能系统在风电应用中的作用机理还体现在对电网经济性和运行效率的综合影响上。通过优化储能系

统的容量配置与控制策略，可以在保障风电并网安全的同时，实现全寿命周期的成本最优。高效的能量管理策略可使储能系统在电价高峰期释放能量、低谷期充电，不仅降低风电场的弃风损失，还提高整体收益。随着智能电网和电力市场的逐步完善，储能系统能够在辅助服务市场中发挥更大作用，通过提供调频、调压和备用容量等服务实现多元价值收益^[4]。储能系统在风力发电中的调节作用不仅局限于技术层面，还涉及经济性与系统性优化，为风电与储能的深度协同控制提供了坚实的理论支撑和应用基础。

3 风电与储能系统协同控制策略优化设计

风电与储能系统的协同控制策略是解决风力发电功率波动、提高并网稳定性的重要技术途径。由于风速变化导致的发电不确定性，单纯依靠风电机组的功率控制已难以满足电网对电能质量和供电可靠性的要求，通过引入储能系统参与功率调节，可以显著提升系统的动态响应能力。协同控制策略的核心在于实现风电场输出与储能设备功率的优化分配，通过实时监测风速、负荷和电网状态，采用多目标优化方法协调风电与储能的功率指令，实现有功功率平衡与无功电压支撑的双重目标^[5]。利用预测控制技术结合风电功率预测模型，可以提前对储能充放电策略进行优化，使风电输出更加平稳，减少对电网频率和电压的冲击，提高并网运行的安全性和可靠性。

在具体的控制策略设计中，常采用分层分布式控制架构来实现风电与储能系统的协同优化。上层控制通过能量管理系统（EMS）进行全局优化，综合考虑风电预测出力、储能荷电状态、负荷需求及电价信号，生成风电与储能功率分配计划。中层控制侧重于实时调度，基于模型预测控制（MPC）方法动态调整储能的充放电功率，使其快速响应风功率波动，弥补预测误差。底层控制则主要实现储能系统的电流环控制与风机的有功、无功控制协调，保证实际功率输出与上层调度指令的一致性。通过多层次协同控制，风电出力波动可以被有效平抑，电网频率稳定性与电压质量得以显著提升，避免因风电功率突变引发的系统不稳定问题。

在协同控制策略的优化过程中，经济性分析同样至关重要。通过引入多目标优化算法，将运行成本、储能寿命、风电消纳率等因素纳入统一的优化框架，可实现技术性指标与经济性指标的平衡。在实际应用中，可结合动态电价机制与储能寿命预测模型，确定最优的储能容量配置和功率调节策略，在降低弃风率的同时最大化风电场与储能系统的综合收益^[6]。基于大数据和

人工智能的预测分析方法也在协同控制优化中发挥越来越重要的作用，通过对风速、负荷及电网状态的高精度预测，能够进一步提升控制策略的前瞻性和适应性。通过这种多维度、多目标的优化设计，风电与储能系统的协同运行能力得以全面增强，为高比例可再生能源电网的稳定运行提供可靠技术保障。

4 协同控制下风电储能系统经济性综合分析

在风电与储能系统协同控制的运行框架下，经济性分析是评估策略可行性与优化配置的核心环节。风力发电具有随机性和波动性特征，储能系统的引入在提升并网稳定性的同时，也会带来显著的投资成本和运维费用。通过建立基于全寿命周期成本（LCC）的经济性评估模型，可以综合考虑设备投资、能量损耗、维护支出及系统寿命等因素，对储能配置方案进行量化分析^[7]。协同控制策略在平衡风电功率与储能充放电的基础上，能够显著降低弃风率，提高可再生能源利用率，从而在降低调度成本的同时提升系统收益，为风电场投资决策提供数据支持。

在经济性分析中，需要结合动态电价机制与风电功率预测技术，优化储能的充放电策略以实现收益最大化。当电价处于高峰时段，储能系统释放电能以提高电量收益，而在低谷时段则充电以降低成本。通过引入多目标优化算法，将风电消纳率、储能利用率、调频收益及系统损耗等多维指标纳入统一分析框架，可以实现运行成本与发电收益之间的动态平衡。不同类型储能技术在寿命、效率和单位容量成本上的差异，也会直接影响经济性评估结果，因此需要针对不同应用场景选择最优配置方案，实现投资回报率与系统稳定性的双重优化。

协同控制策略下的经济性不仅体现在单一风电场的收益提升，还涉及电力系统整体的资源配置优化。通过区域级的风储联合调度，储能系统可以有效分担电网调峰压力，减少备用容量需求，提高电能市场交易的灵活性与收益空间。在辅助服务市场中，储能装置能够通过提供调频、无功补偿和备用服务实现多元化盈利模式，从而进一步提升系统的整体经济价值^[8]。通过结合实时数据驱动的控制策略与高精度经济建模，可在保障电网安全的前提下，实现风电与储能系统的协同

高效运行，为可再生能源的大规模消纳奠定坚实基础。

5 结语

风力发电与储能系统的协同控制在提升电网稳定性、提高可再生能源利用率和优化运行经济性方面展现出显著优势。基于风电功率预测与储能优化配置的综合控制策略，不仅能够有效缓解风电出力波动对电网造成的冲击，还实现了能量的高效分配与调度。将技术性能与经济性分析相结合，为风储系统的规划和设计提供了可行的理论依据与实践指导。该协同控制方法为大规模风电并网提供可靠支撑，对推动能源结构转型和促进绿色低碳发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 牟志国,吕游,梁庚,等. 燃煤发电机组灵活性改造中熔盐储能系统的建模与性能分析[J/OL]. 动力工程学报,1-8[2025-08-30].
- [2] 李煜鑫,何志琴,范强,等. 风光微电网中混合储能系统功率配置及预测控制改进策略[J/OL]. 南方电网技术,1-13[2025-08-30].
- [3] 贾腾飞,王昆,周道亮,等. 新型储能系统在高速铁路中的供能研究[J/OL]. 铁道车辆,1-8[2025-08-30].
- [4] 覃仲文. 基于光纤通信的智能照明系统储能协同优化[J]. 灯与照明,2025,49(04):94-96.
- [5] 李佳敏,刘宇会. 基于因子分析法的风力发电行业财务绩效评价[J]. 中国农业会计,2025,35(16):33-35.
- [6] 郑衍森,苏黄盛,梁业盈,等. 风力发电用储能电池技术的发展现状及展望[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(04):1-12.
- [7] 郑先锐. 新能源光伏发电与风力发电技术分析[J]. 低碳世界,2025,15(08):70-72.
- [8] 张帆,欧阳章智,牟征辉,等. 基于模糊层次分析法的斜坡式重力储能系统选址策略[J/OL]. 南方能源建设,1-10[2025-08-30].

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