

风光储联合运行的电力调度优化

成桂洲

广东智博新能源有限公司 广东东莞 523808

摘要：随着“双碳”战略的持续推进以及新能源装机规模的快速增长，风能与太阳能发电在电力系统中的比重不断上升。但风光发电具有显著的间歇性与波动性，难以独立保障电网运行的安全与稳定。储能技术的引入，为风光资源的消纳和系统调度优化提供了有力支撑。本文系统梳理了风光储联合运行的电力调度理论基础、关键模型与优化方法，并通过算例分析与对比实验，验证了联合调度策略在削峰填谷、平抑波动、提升可再生能源消纳率及保障电力系统稳定性方面的优势。研究表明，基于风光储一体化的优化调度不仅具有显著的经济效益，也具备较高的应用推广价值，对我国能源结构转型与电力系统绿色低碳发展具有重要意义。

关键词：风光储；电力调度；优化运行；新能源消纳；储能系统

引言

我国风电与光伏发电装机容量已连续多年位居世界前列，但高比例新能源并网导致的功率波动与电网调控矛盾日益凸显。传统依赖火电机组调节的方式已难以满足新能源占比持续提升的需求。储能技术的兴起，尤其是电化学储能的快速发展，为新能源大规模接入与灵活调度提供了现实路径。风光储联合运行模式成为实现源网荷储协同优化的重要方向，其核心在于通过储能装置的充放电行为对风光发电的波动性进行平衡，从而提升电力系统的灵活性与可靠性。本文将围绕风光储联合运行的调度优化问题展开深入研究，结合数理模型、优化算法与工程应用，探讨该模式的技术路径与发展前景。

一、风光储联合运行的调度优化模型

1. 数学建模思路

风光储联合运行的电力调度优化模型，核心在于通过建立目标函数与约束条件，实现系统运行的经济性与安全性平衡。一般而言，目标函数主要包括三类：一是运行成本最小化，即在保证电力供需平衡的前提下，降低机组启停、燃料消耗、储能循环及运维成本；二是可再生能源消纳率最大化，通过合理配置储能充放电，减少弃风弃光电量，从而提升新能源利用水平；三是碳排放量最小化，以实现低碳运行与环境效益最大化。在这些目标之间往往存在冲突，因此需要多目标规划或加权求和的方法进行权衡。

约束条件则保证模型具备可行性和物理合理性。首

先是功率平衡约束，即系统在任一时刻总发电量与负荷需求相匹配，考虑到线路损耗后仍需满足平衡关系。其次是储能充放电约束，包括储能装置的容量限制、充放电效率及SOC（荷电状态）边界，确保储能运行的物理可行性。再次是电网安全约束，如电压稳定性、潮流分布和传输能力限制，以防止超载和电压越界。此外还需考虑机组启停逻辑、爬坡率限制及备用约束。通过这些建模要素，可以构建较为完整的风光储调度优化框架，为后续算法求解提供基础。

2. 风光储功率预测与不确定性处理

风光发电功率具有高度不确定性，因此预测技术在调度优化中至关重要。常见方法包括时间序列模型（如ARIMA）、机器学习模型（如支持向量机、随机森林）以及深度学习方法（如LSTM、CNN-LSTM混合模型），它们能够对风速、光照强度及温度等气象变量进行建模，从而得到发电功率的短期与超短期预测。随着气象大数据与卫星遥感的应用，预测精度正在不断提升。实践中即便预测水平提高，不确定性仍不可避免。因此，调度模型需具备处理随机性的能力。其一，场景生成方法通过对预测误差进行概率分布采样，形成多个可能的发电场景，再以场景树或蒙特卡洛模拟方式嵌入优化模型。其二，机会约束规划允许部分约束以一定概率被违反，从而在风险与成本之间寻求平衡，适用于大规模系统。其三，鲁棒优化方法通过设定不确定集，使得优化结果在最不利条件下仍保持可行性和较优性能。这些方法能够增强调度方案的适应性与抗风险能力，提升风光储联

合运行的稳定性与可靠性。

3. 优化方法与求解策略

在模型构建与预测完成后，如何高效求解成为关键。传统数学规划方法，如线性规划（LP）、混合整数线性规划（MILP）和二次规划（QP），具有理论基础坚实、收敛性好等优势，尤其在规模适中或线性化处理后效果显著。但对于高度非线性、非凸性的风光储调度问题，这些方法往往计算复杂度较高，难以满足实时性要求。因此，智能算法逐渐被引入，如遗传算法（GA）、粒子群优化（PSO）、蚁群算法（ACO）等。这类算法具有全局搜索能力强、对非线性问题适应性高的特点，能够在复杂的约束条件下寻找近似最优解。近年来，深度强化学习（DRL）等人工智能方法也被广泛应用，通过与仿真环境不断交互，学习储能在不同负荷与新能源输出条件下的最优调度策略，具备较强的自适应性及实时优化能力。而随着电力系统规模的不断扩大，分布式优化与分解协调方法逐渐受到关注。如基于交替方向乘子法（ADMM）的分布式优化框架，能够将大规模系统拆解为多个子问题并行计算，再通过迭代协调实现全局最优。这类方法尤其适用于多区域、多主体的风光储调度场景，既提高了计算效率，又增强了模型的可扩展性。综合来看，传统数学规划方法适合用于基准问题与规划研究，而智能算法与分布式方法更适合动态性强、实时性高的复杂电力系统。

二、风光储联合运行的关键技术路径

1. 数字孪生与电力系统建模

在风光储联合运行的调度优化过程中，精确的系统建模是实现优化控制的前提。传统电力系统建模多依赖静态参数与简化的潮流计算模型，难以应对新能源出力的动态波动。近年来，数字孪生（Digital Twin）技术逐渐应用于电力系统，能够在虚拟空间中实时映射风电、光伏与储能装置的运行状态，实现物理实体与虚拟模型的交互迭代。通过对气象、负荷、发电与储能的全量数据采集，数字孪生模型不仅可以进行实时预测，还能够在调度决策前模拟不同工况下的运行结果，为调度优化提供科学依据。其优势在于一是提升预测的准确性；二是降低实际操作的风险；三是为智能算法提供虚拟实验环境，从而加快优化策略的迭代与收敛。

2. 边缘—云协同的调度架构

随着新能源场站规模的扩大，数据量与调度复杂度显著增加。仅依赖云端集中优化，可能导致调度响应不及时，而单一边缘计算又难以进行全局优化。因此，边

缘—云协同架构成为风光储联合运行的重要方向。在该架构中，场站侧部署边缘计算单元，对风光出力与储能充放电进行实时控制，实现秒级响应；云端则进行跨区域的全局优化与长期调度，兼顾经济性与系统安全。两者通过高速通信实现数据交互与策略下发，形成多层次协同优化体系。

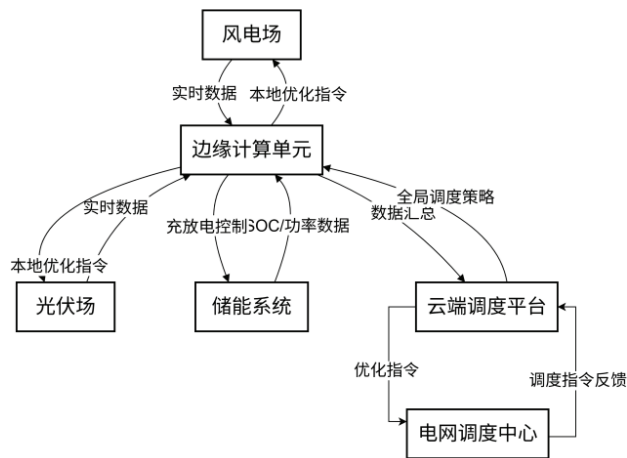


图1 协同模式架构示例图

该架构图1实现了“场站自治—云端统筹”的协同模式，使风光储联合调度既具备实时性，又具备全局最优性。

3. AI驱动的智能优化与自适应控制

人工智能技术的快速发展，使其在风光储联合运行中的作用愈发突出。传统优化方法往往依赖静态模型和预设参数，而AI能够在动态环境下通过学习与迭代，逐步形成自适应的调度策略。深度强化学习（DRL）是其中的典型方法，通过与仿真环境不断交互，DRL智能体能够在面对新能源波动与负荷变化时，自主学习最优的储能充放电策略，从而实现削峰填谷与经济运行的双重目标。而AI在预测环节同样发挥重要作用。通过卷积神经网络（CNN）、长短期记忆网络（LSTM）以及混合模型，可以对风速、光照与负荷曲线进行高精度预测，显著降低调度模型的不确定性。同时，AI还能够实现自适应控制，例如在突发天气导致风光出力骤降时，智能调度系统能够在毫秒级别内启动储能快速补偿，避免电网频率与电压异常。

三、案例分析与仿真研究

1. 系统构建与参数设定

为了验证风光储联合运行调度优化的有效性，本文选取某典型区域电力系统作为研究对象，构建仿真模型。系统由风电场、光伏场、储能电池组及常规火电机组组

成，总装机容量约为500 MW，其中风电150 MW，光伏150 MW，储能功率容量为50 MW/200 MWh，其余为火电机组补充。负荷曲线取自典型夏季工作日，峰值负荷约为420 MW，谷值负荷约为180 MW，昼夜负荷波动显著。储能系统设定充放电效率为92%，最大充放电功率为其额定容量，SOC初始值设为50%。风光发电出力曲线由实测气象数据结合预测模型生成，考虑短期预测误差和波动特征。调度周期为15分钟，优化时段为24小时，采用多目标优化模型，权重系数分别为：经济性0.5、消纳率0.3、低碳性0.2。该设定既符合现实电网运行特征，也便于验证不同调度策略的效果。

2. 对比实验设计

为了突出风光储联合运行在电力系统调度中的优势，本文设计了三种典型实验场景以进行对比分析。第一种场景为风光独立并网模式，即风电与光伏直接接入电网运行，不考虑储能的调节作用。在该模式下，新能源出力的波动性和间歇性直接作用于系统运行，极易引发弃风弃光现象，同时加大电网调频与安全控制的压力。第二种场景为风光与储能联合运行模式，在系统中引入储能装置，通过合理的充放电实现削峰填谷和平抑功率波动，从而提升新能源出力的可利用水平，并缓解电力系统的调度压力。第三种场景则在前一模式的基础上进一步引入人工智能优化方法，采用深度强化学习与场景生成技术相结合的算法，对风光出力与负荷波动进行高精度预测与自适应调控，从而实现更优的经济性和更高水平的系统安全性。实验设计综合考虑了弃风弃光率、系统运行成本、碳排放量以及电网频率偏差四个关键指标，分别从新能源消纳水平、经济效益、环境效益与运行稳定性四个维度进行对比分析。通过这种方式，不同调度策略在现实电网运行环境中的优劣得以系统揭示，为风光储联合调度的实际推广提供了量化依据与参考价值。仿真结果如下表所示。

表1 三种调度模式对比结果

指标	场景A 风光独立 并网	场景B 风光+储能 联合运行	场景C 风光储+AI 优化调度
弃风弃光率	12.60%	4.80%	2.10%
系统运行成本(万元/天)	85.3	78.6	74.2
碳排放量(吨/天)	312	281	266
频率偏差(Hz)	±0.22	±0.15	±0.09

从表1可以看出，场景A下弃风弃光率较高，新能源利用率不足；场景B中储能系统有效吸收波动电量，使弃电率降低至4.8%，系统运行成本下降8%左右，碳排放减少约10%；场景C中引入AI优化后，不仅弃电率进一步降低，系统运行成本下降幅度扩大至13%，且频率偏差显著减小，电网运行稳定性显著提升。结果表明储能的引入能够有效提升风光电的消纳水平，而结合AI优化的智能调度在经济性与安全性上均优于传统方案。该研究验证了风光储联合运行在削峰填谷、降低成本、减排降碳及提高电网稳定性方面的综合优势。从表4-1可以看出，场景A下弃风弃光率较高，新能源利用率不足；场景B中储能系统有效吸收波动电量，使弃电率降低至4.8%，系统运行成本下降8%左右，碳排放减少约10%；场景C中引入AI优化后，不仅弃电率进一步降低，系统运行成本下降幅度扩大至13%，且频率偏差显著减小，电网运行稳定性显著提升。结果表明储能的引入能够有效提升风光电的消纳水平，而结合AI优化的智能调度在经济性与安全性上均优于传统方案。该研究验证了风光储联合运行在削峰填谷、降低成本、减排降碳及提高电网稳定性方面的综合优势。

结束语

风光储联合运行是解决新能源消纳与电力系统稳定运行的重要路径。通过构建合理的调度优化模型，结合AI与数字孪生等先进技术，可以实现经济性与安全性的双重提升。如今随着储能技术成本下降与电力市场机制的完善，风光储调度将在更大范围内得到应用，为“双碳”目标的实现和能源转型提供有力支撑。

参考文献

- [1] 刘浩杰.风光储联合削峰的电力系统协调优化调度[D].陕西:西安理工大学,2016.
- [2] 鲍禄山.电力系统中风光储联合优化调度方法研究[J].电站辅机,2025,46(2):22-25.
- [3] 张子涵.基于MPC的风光储联合发电系统优化调度研究[D].华北电力大学,华北电力大学(北京),2023.