

新能源并网背景下抽水蓄能电站调峰填谷效能研究

李柯枰

中国水利水电第六工程局有限公司 辽宁丹东 118000

摘要: 随着新能源大规模的并网,导致电力系统面临着功率波动大、调峰困难等诸多问题。而抽水蓄能电站则凭借其储能与调峰的双重特性,则成为保障电网安全稳定运行的关键。基于此,本文通过聚焦新能源并网背景下抽水蓄能电站的调峰填谷效能,以此构建包含高比例风光电源的电力系统仿真模型,旨在为抽水蓄能电站的规划布局和运行优化提供理论依据,以更好地推动新能源的储能协同发展。

关键词: 新能源并网;抽水蓄能电站;效能

在抽水蓄能电站中,通过“抽水蓄能”以及“发电释能”的循环,可有效实现电能的时空转移,并有效填补新能源发电低谷期的电力缺口,这对实现“双碳”目标具有重要的参考价值。为此,构建含抽水蓄能电站的电力系统仿真模型,并对比不同新能源渗透率下的调峰填谷效果,能为抽水蓄能电站的高效利用提供参考借鉴。

一、新能源-抽水蓄能联合系统建模与仿真架构设计

在对新能源抽水蓄能联合系统建模与仿真架构的设计时,应全面覆盖新能源发电、储能调节、传统电源支撑以及负荷需求,才能构建出多能补充、动态平衡的复杂电力系统^[1]。而该系统以风电和光伏作为主要的新能源发电单元,通过模拟其出力的间歇性与随机性,能有效还原真实场景下新能源并网对电网造成的冲击。对于抽水蓄能电站而言,采用“抽水储能+发电释能”的双循环过程,可实现电能的时空转移,不仅能在新能源出力的低谷期利用富余电能抽水蓄能,还能在高峰时间段发电顶峰平抑电网功率波动。

同时,火电机组作为传统调峰电源,可为其提供基础负荷支撑,并且在新能源出力不足或者抽水蓄能电站调节能力受限时,可通过快速启停与负荷跟踪的方式以满足电网的时序实际需求。对于负荷模块,可用于模拟

用户侧的用电行为,并结合分时电价机制与弹性负荷响应模型,以更好地反映实际电网中负荷的时变特性与需求侧管理潜力。此外,在数据来源方面,历史气象数据中的风速、光照强度等都是驱动新能源出力模型的关键,并通过统计分析和机器学习算法等方式,以此生成具有高精度的风光功率预测曲线。这种通过新能源出力曲线而直接来源于实际电站的运行数据或基于仿真平台生成,可有效涵盖不同季节、气候等场景,并结合区域经济发展、产业结构等诸多因素,能够为联合系统的功率平衡分析以及调度策略优化提供有力的数据支撑。

二、新能源-抽水蓄能联合系统建模与仿真关键模型构建

(一) 基于统计特性的风光功率预测模型

在新能源并网背景下,出力模型是联合系统仿真的基础,其主要核心是通过历史数据和统计特性分析的方式,以此构建出具有高精度的风光功率预测模型。由于风电功率预测通常需要综合考虑到风速的时空分布规律,并采用韦布尔分布或混合分布模型以此描述风速概率的密度^[2]。因此,通过结合风机功率曲线下可实现对功率的右下转换,并引入数值天气预报数据。采取时间序列分析或者机器学习算法修正短期预测的误差值。而光伏功率预测则是以太阳能辐射的强度为主,并利用Beta分布或清空指数模型描述光照随机性等,以此结合光伏阵列的倾斜角、方位角以及温度系数等,可通过物理模型或数据驱动等多种不同方式,以此生成对应的功率曲线图。为了有效提升预测的精确度,模型还需融合多源数据,并采用集成徐谥西策略融合不同算法结果等方式,有助于实现输出分时段、分区域的风光功率预测,有助

作者简介: 李柯枰(1993--),男,汉族,辽宁丹东市,大学本科,中国水利水电第六工程局有限公司绵竹抽水蓄能电站工程项目部总经济师、工程师,研究方向:水利水电工程施工。

于为联合调度提供可靠的依据。

(二) 考虑水头变化、效率损失的动态模型

在对抽水蓄能电站模型中,通过精准刻画能量转换过程中的动态特性,尤其是对水头变化和效率损失对储能效果的影响,可模拟出水库水位、流量为核心的状态变量。而通过质量守恒与能量守恒方程能计算出水平的水量平衡,在抽水工况下,上水库水位随抽水流量的增加而逐渐上升,下水库水位则会下降,对应的发电工况则恰好相反^[9]。同时,水头变化会直接影响到水泵水轮机的效率,当抽水效率和发电效率随着水头降低而衰减时,则需通过实验数据拟合效率的方式,以此引入机组转速、导叶开度等多种控制变量修正效率值。此外,对于模型,还应考虑管道水力的损失与组织机械损失,并通过经验系数法量化损耗率,可在动态仿真中,模拟以时间步长迭代计算水库水位、机组出力 and 效率变化情况,其输出抽水/发电功率、储能状态等关键性的参数,有助于为调度策略的优化提供动态性的约束。

(三) 分时负荷曲线与弹性负荷响应模型

电网负荷模型需系统表征负荷的时变特征与需求侧响应潜力,以支撑联合系统的功率平衡优化。而分时负荷曲线模型依托历史用电数据,通过聚类分析或时间序列分解识别典型日负荷模式,涵盖峰谷平各时段的负荷特性,并融合季节性变化、气象条件及节假日效应构建动态负荷模板。在此基础上引入温度-负荷敏感性系数,量化气温波动对居民空调负荷与工业冷却负荷的影响,生成高时空分辨率的分时负荷预测序列。弹性负荷响应模型则着重于需求侧资源的调节能力,将负荷区分为刚性负荷与弹性负荷,通过价格弹性矩阵或激励响应机制刻画用户对电价变动的响应行为,并采用博弈论框架或优化算法模拟用户负荷调整决策过程。最终模型输出分时负荷需求量及弹性负荷可调节区间,为联合调度提供需求侧灵活性资源的约束依据。

(四) 联合调度模型

新能源-抽水蓄能联合系统的决策核心在于联合调度模型,其核心功能是在确保电网功率平衡、设备运行边界条件及新能源消纳要求得到满足的前提下,实现多目标优化。该模型以新能源消纳效率最大化作为首要优化目标,通过优先配置新能源发电资源、降低弃风弃光率来达成^[4]。次级优化目标则聚焦于系统运行总成本最小化,涵盖火电机组燃料成本、抽水蓄能电站运维费用、新能源并网补偿支出以及需求响应激励成本等要素。约

束条件包括功率平衡约束、抽水蓄能电站运行约束、火电机组运行约束、新能源出力约束及弹性负荷约束。该模型基于多目标优化算法框架求解帕累托最优解集,通过权重分配机制或模糊决策理论确定最优调度方案。在仿真过程中,采用滚动优化策略动态调整调度策略,实时适应新能源出力波动与负荷变化特征,最终输出各时段火电机组出力计划、抽水蓄能电站充放电运行策略及弹性负荷调度指令,从而实现系统经济性与新能源消纳效率的协同优化。

三、新能源-抽水蓄能联合系统仿真平台与工具

(一) MATLAB/Simulink 环境搭建

MATLAB/Simulink 凭借其卓越的数值计算性能与可视化建模能力,已成为新能源-抽水蓄能联合系统仿真的关键支撑平台。系统建模采用模块化架构设计:新能源发电模块基于 Simscape Electrical 库构建,通过自定义函数或 S-Function 嵌入风光功率预测模型,可实现风速/光照强度至电功率的动态映射。而抽水蓄能电站模块整合 Simulink 液压系统库与自定义逻辑,精确模拟上下水库水位动态演变、水泵水轮机效率衰减特性及管道水力损失,并利用 Stateflow 状态机实现抽水/发电工况的自动切换^[5]。同时,火电模块采用一阶惯性模型表征机组爬坡特性,负荷模块通过 Time Series 对象导入分时负荷曲线,并嵌入基于电价信号的弹性负荷响应机制。各模块经由功率总线实现闭环互联。该平台支持多时间尺度仿真,并可通过 MATLAB 脚本调用优化工具箱实现调度策略优化。仿真输出通过 Scope 模块直观呈现功率波动、水库水位变化等关键指标,为系统模型验证与调度策略优化提供量化依据。

(二) Python 搭建仿真环境

Python 依托其开源生态与机器学习库优势,已成为新能源-抽水蓄能联合系统轻量级仿真的重要技术。该平台基于 NumPy 与 Pandas 实现数据预处理流程,涵盖风光功率预测误差修正及负荷曲线聚类分析。通过 PyTorch 或 TensorFlow 构建深度学习模型,或利用 Scikit-learn 集成传统机器学习算法。系统核心模型采用面向对象架构实现,新能源模块以类封装,通过属性与方法表征发电特性。抽水蓄能模块引入水头-效率曲线与水量平衡方程,结合 DEAP 库实现遗传算法驱动的充放电策略优化。火电与负荷模块通过字典结构或 DataFrame 存储参数与状态变量,支持动态参数更新。平台集成 Matplotlib 与 Seaborn 完成数据可视化,借助 Plotly 实现交互式三维仿

真。为提升计算效率，关键算法可调用Cython或Numba进行加速处理，或通过多进程/多线程架构并行执行多场景仿真任务。该平台的模块化设计显著提升模型迭代效率，尤其适用于研究初期快速验证调度策略的可行性与有效性。

四、新能源-抽水蓄能联合系统引入机器学习算法优化调度策略

(一) 强化学习应用

强化学习通过智能体与环境的持续交互实现最优调度策略的自主学习，在新能源出力波动性显著、系统状态空间维度高的场景中展现出显著优势。在联合系统仿真框架下，智能体以系统状态向量为输入，经由深度Q网络或策略梯度算法生成控制指令，环境依据动作执行结果反馈优化奖励信号^[6]。针对连续状态-动作空间的优化问题，模型采用Actor-Critic双网络架构，协同经验回放机制与目标网络策略以提升训练稳定性。仿真过程中，智能体基于探索-利用平衡机制持续优化决策策略，最终形成可适应不同新能源渗透率水平与负荷特性分布的调度规则集。例如，当风光出力出现过剩时，智能体优先调度抽水蓄能电站进入储能工况，在负荷高峰时段且新能源出力不足时，动态协调火电机组出力调整与弹性负荷响应策略。强化学习模型需基于历史运行数据完成预训练，并在仿真平台中实施在线迭代更新机制，以有效应对新能源出力的非线性波动特性及系统运行约束的动态演化需求。

(二) 遗传算法应用

遗传算法基于自然选择机制的进化搜索原理，适用于多目标、非线性及含离散变量的复杂优化问题。在新能源-抽水蓄能联合系统调度中，该算法采用基因编码方案将调度策略转化为染色体序列，构建多目标综合评估函数，其适应度值融合新能源消纳率、系统运行成本及设备约束违反度等核心指标。通过选择、交叉、变异等进化操作迭代优化种群结构，针对调度问题特性实施定制化改进。而采用实数编码策略提升连续变量优化效率，引入精英保留机制防止优质解流失，结合罚函数法等约束处理技术确保解集可行性。算法与仿真平台实现

深度耦合，可通过API接口实时评估个体适应度，或借助并行计算框架加速大规模场景优化。例如，针对多日调度问题，算法生成多组候选策略集，经仿真平台验证其在新能源出力波动下的鲁棒性指标，最终择优确定兼顾经济性与可靠性的最优调度方案。该算法的核心优势在于其全局搜索能力，有效规避传统优化方法陷入局部最优的缺陷，尤其适用于处理新能源-抽水蓄能系统中非凸约束与多目标冲突的复杂优化场景。

结语

随着新能源渗透率的提高，其调峰填谷作用也愈发凸显，而通过优化调度策略，则可进一步降低系统的运行成本，以更好地促进新能源的消纳。在对抽水蓄能电站的规划布局时，通过容量配置和运行优化依据，可有效推动储能设施与新能源的协同发展，这对保障能源安全以及实现碳中和的目标具有重要的意义。

参考文献

- [1] 谢正义, 王义民, 畅建霞, 等. 新能源并网下混合式抽水蓄能电站竞价策略[J]. 水力发电学报, 2023, 42(12): 14-26.
- [2] 钟文, 张志浩, 管鑫, 等. 基于斑点鬣狗算法的风/光/抽水蓄能联合运行系统优化调度研究[J]. 电力学报, 2020, 35(02): 113-122.
- [3] 于钦盛. 抽水蓄能电站建设过程中的低碳施工技术与管理期碳减排路径分析[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(11): 225-227.
- [4] 公馨凝, 任威. 抽水蓄能电站在新能源消纳中的作用及市场化机制研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(31): 88-91.
- [5] 王贵, 高洪军, 李德友, 等. 大型抽水蓄能电站关键技术研究现状及发展趋势[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(10): 3-13.
- [6] 刘宗林. 新型电力系统下抽水蓄能电站经济性优化与可持续发展路径研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2025, 11(05): 94-98.