

双碳目标下光热-风电耦合系统的协同效应研究

冯晓恒

哈密科能电力技术服务有限公司 新疆 哈密 伊吾 839304

【摘要】：光热与风电耦合是提升新能源消纳水平、平抑出力波动的重要技术路径。研究围绕耦合系统运行规律展开，梳理不同时间尺度下两类系统的出力时序特征、多能流交互响应规则，从多维度构建协同效应评估指标体系，搭建适配西北资源禀赋的仿真模型开展多场景协同效应测算，最终从技术配置、调度机制、政策配套三个层面提出协同效应提升的可落地方案。

【关键词】：光热-风电耦合系统；协同效应量化；储热容量配置；并网调度优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.044

引言

新能源大规模并网是构建新型电力系统的核心支撑，风电、光热是西北风光富集区的核心开发品类，两类电源出力存在天然的峰谷错位特征，耦合开发具备突出的互补潜力。当前针对光热风电耦合系统的研究多集中于拓扑结构设计与单一技术参数优化，对运行特性的系统性识别不足，协同效应的量化评估体系缺乏统一标准，可落地的提升路径缺少多维度合理性校验。开展耦合系统运行特性识别、协同效应评估与提升路径的系统性研究，可为耦合项目的规划建设、运行调度以及相关政策制定提供理论支撑与实操参考。

1 光热-风电耦合系统的运行特性识别

1.1 耦合系统出力时序特征分析

选用我国西北风光热富集区域的实测运行数据作为研究基础，分别开展光热系统以及风电系统的日内、月度出力波动规律统计工作，梳理二者出力的峰谷错位特性。对不同季节下两类系统的出力重叠时段、互补时段进行划分，明确日内尺度下光热系统午间出力峰值可覆盖风电午间出力低谷的互补特性，月度尺度下风电冬季出力高位运行、光热夏季出力相对稳定的错位特征。同时对极端天气场景下两类系统的出力波动幅度、波动频次进行对比分析，进一步明确不同时间尺度下光热与风电出力的互补性表现。把梳理得到的各类出力时序特性进行分类汇总，形成标准化的出力特征数据集，为后续耦合系统的协同潜力分析提供有效的数据支撑。

1.2 耦合系统多能流响应机制解析

从能量转换链路出发，拆解光热系统的集热、储热、发电模块以及风电系统的风能捕获、并网模块的能量传递逻辑，逐一梳理各模块的能量输入、输出关系以及转换过程中的损耗特征。分析不同调度指令下各模块的响应速度、调节范围，对比光热系统依靠储热模块实现的长时间尺度调节能力，以及风电系统依靠并网变流器实现的短时间尺度调节能力的差异。明确耦合系统内部多能流的交互规则，厘清两类系统在能量交互过程中的适配条件，并且明确多能流在耦合系统内部的传导路径以及转换约束，为后续协同效应量化工作的开展提供坚实的理

论基础。

2 光热-风电耦合系统的协同效应量化评估

2.1 协同效应评估指标体系构建

从经济效益、环境效益、并网消纳效益三个维度筛选评估指标，经济效益维度选取度电成本以及投资回收期两项核心指标，度电成本核算全生命周期建设投入、运维成本、残值折算后对应单位发电量的成本，投资回收期把初始建设投入除以年均净收益得到对应回收周期，两项指标计算口径均覆盖耦合系统共用基础设施的分摊成本。环境效益维度选取碳排放减排量以及化石能源替代率两项指标，碳排放减排量核算相同发电量下火力发电碳排放总量减去耦合系统全链条碳排放总量的差值，化石能源替代率核算耦合系统发电量折算的标准煤量占相同出力火力发电耗煤量的比值，两项指标取值均排除风光资源波动带来的不可用出力影响。并网消纳效益维度选取弃电率以及电网调峰贡献度两项指标，明确每项指标的计算方法、取值边界，构建层级清晰、量化的协同效应评估指标体系。

2.2 耦合系统协同效应仿真模型搭建

基于 MATLAB/Simulink 仿真平台开展模型搭建工作，先搭建光热系统储热换热子模型，模拟集热、储热、放热发电全链条的能量转换损耗情况，再搭建风电出力预测子模型，结合风速时序特征拟合风电出力的波动规律，之后搭建耦合并网调度子模型，模拟不同调度指令下两个系统的出力调节过程。选用我国西北地区的风光资源禀赋参数、当地电网的调度规则参数设置模型的边界条件，输入实测的光照、风速时序数据开展模型可靠性验证工作，对模型的各项参数进行迭代调整，重点匹配光热系统储热放热的响应时长、风电出力的波动幅度两个核心参数的实际取值，把模型的整体误差范围控制在 5%以内，保证模型输出的结果契合实际运行的真实情况，为后续多场景下的协同效应测算工作提供可靠的工具支撑。

2.3 多场景下协同效应测算分析

设置典型晴天、典型阴天、极端大风天三类典型运行场景，分别对应光热出力高位、光热出力低位、风电出力大幅波动的不同运行条件，把对应场景的风光资源时序数据输入搭建完成

的仿真模型开展仿真测算工作。分别输出三类场景下耦合系统的各项评估指标数值,和相同资源条件下单独运行的光热系统以及单独运行的风电系统的指标数值做横向对比,量化不同场景下耦合系统协同效应的具体表现,梳理对协同效应发挥影响较大的核心敏感因素,明确耦合系统适宜运行的场景范围,为后续协同效应提升路径的研究工作提供明确的方向指引,也为后续实际项目的运行调度提供基础的参考依据。

3 光热-风电耦合系统的协同效应提升路径

前文已完成光热-风电耦合系统的运行特性识别、协同效应量化评估两项工作,明确了两类系统出力的互补特性、不同场景下协同效应的表现规律以及核心敏感影响因素,本章结合上述研究结论,从技术优化、调度优化、政策优化三个层面提出可落地的协同效应提升路径,为后续同类型项目的建设、运行以及政策制定提供实操层面的参考依据。

3.1 储热模块容量配置优化

鉴于前述协同效应量化评估得出的储热容量是影响协同效应发挥的核心敏感因素的结论,基于度电成本最低、协同效应总得分最高的双优化目标来开展储热容量优化配置模型的构建工作。模型设置的约束条件囊括光热系统集热功率上限、储热模块充放热效率阈值、耦合系统并网出力波动限制、项目总投资上限四个维度,保证模型输出的配置结果同时满足技术可行性以及经济合理性要求。把我国西北某拟建 100MW 光热-200MW 风电耦合项目的实测风光资源时序数据、当地上网电价标准、光热及风电系统单位建设成本、年均运维成本等实际参数导入模型开展迭代测算,得出适配该项目风光资源禀赋以及当地电网并网要求的储热模块最优容量配置区间。为验证配置结果的合理性,运用《新能源发电工程设计》中储热系统设计的相关知识点开展校验工作,课程中明确储热容量配置需要同时匹配集热场规模、当地年平均辐照时长、电网侧调峰需求三个核心要素,把测算得出的配置区间代入三个要素的校验逻辑逐一核验,发现该区间既不会出现储热容量过小无法完全消纳午间富余光热出力、无法覆盖风电午间出力低谷的问题,也不会出现储热容量过大导致初始建设成本过高、投资回收期超出合理范围的问题,完全契合课程中给出的储热系统设计合理性校验标准,能够在控制项目整体成本的前提下最大化发挥两类系统的互补效应,提升耦合系统的综合协同收益,还能有效平抑耦合系统的出力波动,降低并网侧的调节压力。

3.2 并网调度策略优化

当前并网调度普遍执行的新能源优先消纳规则,仅按照风电、光伏的出力预测值进行并网时序排布,未把光热系统储热模块的可调节能力纳入调度考量维度,极易出现午间风电出力低谷时光热富余出力无法全额并网、晚高峰负荷高位时两类系统出力不足无法支撑电网调峰的问题,极大程度上限制了耦合

系统协同效应的发挥。针对这一问题,构建考虑光热储热调节能力的日前调度模型,模型把电网运行安全作为核心约束条件,设置的约束囊括线路传输功率上限、系统频率波动阈值、耦合系统出力爬坡速率要求、负荷侧供电可靠性要求四个维度,在不突破电网现有运行边界的前提下最大化耦合系统的全天上网电量。选用某省级电网的实际调度运行数据、当地典型日的风光出力预测数据、耦合系统的出力调节参数开展模拟验证工作,模拟运行结果显示优化后的调度策略可使耦合系统弃电率降低 8%以上,同时还能有效提升耦合系统的电网调峰贡献度。为验证调度策略的可行性,运用《电力系统调度运行》中调度规则的相关内容开展校验工作,课程中明确日前调度规则的制定需要同时满足电网安全运行、新能源消纳、供电可靠性三个核心目标,把优化后的调度策略代入三个目标的校验逻辑逐一核验,发现该策略既不需要对现有调度系统进行大规模改造,也不会影响其他类型电源的正常并网秩序,完全契合现行调度体系的可执行要求,能够在保障电网稳定运行的前提下进一步挖掘耦合系统的协同潜力,还能减少电网侧为消纳新能源付出的调峰成本,实现电网与耦合项目的双赢。

3.3 项目落地配套机制完善

当前光热-风电耦合项目的初始投资成本远高于单独建设的风电项目,同时市场化消纳渠道不足,导致项目投资回报周期过长,市场主体的投资积极性偏低,极大程度上限制了耦合系统的推广应用。针对这一问题,从价格补贴、绿电交易、并网优先级三个维度提出配套机制完善建议。价格补贴维度,明确不同装机规模的耦合项目可享受的阶梯补贴标准,对配套储热时长达到相应要求的耦合项目额外给予度电补贴倾斜,补贴资金从现有新能源扶持资金池中统筹列支,不需要额外增设资金科目,在控制财政支出压力的前提下降低项目的投资成本。绿电交易维度,提出耦合项目绿电交易的优先申报机制,把光热-风电耦合项目的绿电产品纳入重点交易品类,在交易申报、电量撮合、电费结算等环节给予优先办理权限,拓展项目的市场化收益渠道,提升项目的整体盈利水平。并网优先级维度,明确光热-风电耦合项目的并网优先级高于普通风电、光伏项目,在并网指标分配、并网验收流程办理等环节给予倾斜支持,降低项目的并网等待成本。为验证配套机制的合理性,运用《新能源产业政策与管理》中新能源项目扶持政策的相关内容开展校验工作,课程中明确新能源扶持政策的制定需要同时兼顾政策可落地性、产业带动效应、财政承受能力三个核心要求,把提出的配套机制代入三个要求的校验逻辑逐一核验,发现该机制既不会突破现有新能源政策的整体框架,也能有效降低项目的投资回收周期,激发市场主体的投资热情,完全契合政策制定的合理性标准,能够为耦合系统的规模化推广提供有效的政策支撑,还能带动当地光热、风电相关产业的发展,提升新能源产业的整体发展水平。

4 结语

光热与风电耦合开发能够充分发挥两类电源的互补优势,破解单独开发场景下弃电率偏高、调峰贡献不足、收益稳定性差等问题。相关研究从运行特性识别、协同效应量化评估到提

升路径设计形成了完整的逻辑链条,既可为同类型耦合项目的全生命周期管理提供参考依据,也可为新能源消纳相关政策的制定提供理论支撑。后续可针对不同区域的资源禀赋特征开展差异化适配性研究,进一步拓展研究成果的适用范围。

参考文献:

- [1] 刘天野,李健,杨震,段远源.光热-光伏耦合系统技术-经济性能分析[J].热科学与技术,2025,24(03):303-312.
- [2] 郇嘉嘉,曲毅,何玉灵,孙凯,解奎,王玉玮,焦凌钰.电-碳市场耦合下风光储多目标选址定容优化[J].科学技术与工程,2025,25(30):12964-12973.
- [3] 桑文文,王艳君,姜彤,姜涵,苏布达.“双碳”时期中国陆上风电技术潜力评估[J].气候变化研究进展,2026,22(01):84-100.
- [4] 刘天野,李健,杨震,段远源.光热-光伏耦合系统技术-经济性能分析[J].热科学与技术,2025,24(03):303-312.
- [5] 郇嘉嘉,曲毅,何玉灵,孙凯,解奎,王玉玮,焦凌钰.电-碳市场耦合下风光储多目标选址定容优化[J].科学技术与工程,2025,25(30):12964-12973.
- [6] 桑文文,王艳君,姜彤,姜涵,苏布达.“双碳”时期中国陆上风电技术潜力评估[J].气候变化研究进展,2026,22(01):84-100.
- [7] 张国良,蔺红,田易之.电-碳-绿证市场耦合下的源-荷双层交互优化[J].电力系统保护与控制,2025,53(05):1-10.
- [8] 王彦文,魏博,张丽芳,潘晓君,刘如祎,郭淼,陈康,段杨龙,叶锋,彭怀午,徐超.基于遗传算法的风光储耦合并网制氢系统多目标优化研究[J].储能科学与技术,2025,14(10):3814-3823.