

太阳能光热发电系统应用与可持续发展研究

李 超

天津崇德企业管理咨询有限公司 甘肃 敦煌 736200

摘 要：本研究围绕太阳能光热发电系统的技术特性与可持续发展价值展开梳理，明确其“太阳能-热能-机械能-电能”的核心能量转化路径，系统对比槽式、塔式、线形菲涅尔式三类主流技术的适配场景与应用边界。结合我国西北光资源富集区域的能源转型需求，从能源结构优化、生态负荷降低两个维度量化分析其对可持续发展的支撑作用，针对当前系统全链路能效损耗、设备退役固废处置等现存问题，提出运行能效优化与全生命周期绿色改造的针对性技术路径，为光热发电产业规模化落地提供理论参考。

关键词：太阳能光热发电；储热系统；能效优化；可持续发展

引言：在全球能源低碳转型的刚性趋势下，高比例间歇性新能源并网带来的电网稳定性矛盾逐步凸显，具备长时储热属性的太阳能光热发电成为破解新能源消纳难题的核心技术方向。我国西北陕甘宁青等区域拥有大面积高年辐照量的未利用土地，为光热发电规模化布局提供了天然资源基础。当前产业落地过程中仍存在能量利用效率待提升、全链条绿色管控体系不完善等现实瓶颈，亟需结合技术特性开展系统性研究，充分释放光热发电在能源保供与生态保护层面的双重价值，助力区域能源体系的长期可持续运转。

1 太阳能光热发电系统基本原理与核心组成

太阳能光热发电的核心能量转化路径为：太阳能辐射能→热能→机械能→电能，整套系统依靠多个功能单元协同运行完成能量的收集、转换、存储与输出。系统主要由聚光集热子系统、传热换热子系统、高温储热子系统、热力发电子系统四部分构成。

聚光集热子系统通过各类聚光装置将分散的太阳辐射聚集到吸热装置表面，提升受热面能量密度，以此获得高温热能，是整个系统能量输入的核心单元。传热换热子系统依靠导热油、熔融盐等换热介质将集热装置收集的高温热能输送至蒸汽发生器，加热水工质产生高温高压蒸汽。储热子系统分为高温储热罐与低温储热罐，在光照充足时段将富余热能储存，无光照时段释放热能维持蒸汽供给，保障发电稳定性。热力发电子系统以汽轮机、发电机、冷凝器为主要设备，依托高温蒸汽推动汽轮机旋转，将热能转化为机械能，最终通过发电机完成电能输出，冷凝后的水工质循环回到换热环节重复利用^[1]。

整套系统运行阶段仅消耗少量电能用于驱动追踪装置、循环泵等辅助设备，能量来源以太阳能为主，能量转换过程无硫化物、氮氧化物、粉尘等常规大气污染物

排放，从能量源头具备绿色低碳的属性，契合可持续发展对于清洁用能的基本要求。

2 太阳能光热发电主流技术类型及应用特征

2.1 槽式太阳能光热发电技术

槽式光热发电系统采用抛物面槽型反射镜作为核心聚光设备，通过单轴太阳追踪机构实时采集太阳方位参数，动态调整镜面俯仰角度，将太阳直射辐射精准聚集于槽体焦线位置的真空集热管表面。（1）该类系统常规工况下的工作温度区间稳定维持在300℃~400℃，早期工程多选用合成导热油作为循环传热介质，新一代技术已逐步替换为硝酸盐混合熔盐，可将运行温度上限提升至550℃以上，显著提升换热效率。系统配套规模化双罐熔盐储热装置，可实现数小时至十余小时的高品质热能存储，在无日照时段仍能维持稳定热力输出。（2）该技术的核心特征为设备模块化程度较高，单套集热单元可通过标准化批量组装实现灵活扩建，对建设场地的地形平整度要求相对宽松，场地适配性较强，既可以集中连片布局建设百兆瓦级大型并网电站，也可拆分适配于工业园区、偏远矿区等中小型综合能源供给场景。在多元能源应用层面，除常规并网发电外，槽式系统产出的中高温热能可直接对接工业生产工艺的蒸汽需求，实现电、热联供，大幅提升太阳能资源的综合利用效率，有效替代工业领域传统燃煤锅炉的热能供给，降低生产端化石能源消耗与碳排放强度。

2.2 塔式太阳能光热发电技术

塔式光热发电系统以大面积分布式定日镜场为核心聚光单元，依托全闭环分布式控制体系驱动场内数千至数万台定日镜同步完成双轴高精度太阳追踪，将太阳直射辐射能量精准反射至位于中心塔顶的高温吸热器表面，可稳定实现500℃以上的高温集热工况，当前主流

商业化项目已普遍采用二元或三元熔融盐直接作为吸热环节的传热介质与后续储热环节的储能介质,省去传统换热回路的热损失,进一步提升系统全链路热能利用效率。该技术聚光倍数与集热温度上限显著高于槽式系统,动力循环侧的能量转化效率上限更高,天然适配百兆瓦级以上大规模集中式电站建设,配套大容量熔盐储热系统可实现6小时以上的连续稳定放热,机组出力曲线平滑度远高于间歇性可再生能源,电网负荷支撑性优势突出。其产出的高品质高温热能除常规用于汽轮发电机组发电之外,还可直接适配高温工业冶炼、化工原料热解制备等超高温用热需求场景,大幅拓宽太阳能替代化石能源的应用边界。但该技术对建设场地的地形平整度、镜场全域协同控制精度要求较高,初期设备布局与系统调试的集成化难度高于槽式系统,单位占地面积内的太阳能能量集约化利用程度处于行业领先水平^[2]。

2.3 线形菲涅尔式太阳能光热发电技术

线形菲涅尔式光热发电系统依托多组线性微反射镜阵列构成聚光单元,借助单轴跟踪机构同步调整阵列倾角,将太阳直射辐射汇聚至装置上方固定架设的线性真空吸热管道,依靠分段式菲涅尔光学聚光结构弱化场地地形约束,聚光结构布设无需复杂曲面构件,设备加工与现场安装成本具备显著优势。系统常规运行温度区间覆盖 250℃~500℃,可适配导热油、低熔点混合熔盐等多类换热介质,搭配中小型分体式储热罐即可实现 4~8 小时热能存储,具备日内持续平稳供热发电能力。该技术核心优势为占地规划灵活、土建施工难度低,镜面阵列模块化拆分特性突出,无需大面积平整连片场地,平缓浅丘陵、山前缓坡(坡度 < 5°)、缓坡、工矿闲置空地均可适配,既可配套中小型分布式热电联供站,也可规模化集成建设集中式并网电站。相较于槽式、塔式技术,线形菲涅尔式聚光构件轻量化特征明显,运输、运维、检修操作门槛更低,系统初始投资与全周期运维成本更具经济性。系统产出中温热能可广泛匹配纺织、食品加工、建材烘干等中低温工业热负荷,同步完成并网发电,多能耦合利用模式能够有效削减工业煤炭消耗;但受线性聚光光学机理限制,聚光倍率与集热峰值温度不及塔式系统,大规模超高温工业供热场景适配性存在一定局限,更适配中低温综合能源供给工程。

3 太阳能光热发电对可持续发展的价值体现

3.1 优化能源消耗结构,缓解不可再生资源消耗压力

传统电力供给体系长期高度依赖煤炭、天然气等化石能源,此类资源地质形成周期漫长,属于典型不可再生资源,持续规模化开采会直接造成国内矿产资源可采

储量持续衰减,资源对外依存度长期处于高位。太阳能属于永续可再生能源,在光照资源条件达标的区域即可稳定开展商业化开发,光热发电的规模化落地可逐步替代存量火电装机的运行份额,直接降低全社会化石能源的年度消费总量,延缓矿产资源开采速率,实现不可再生资源的保护性开发利用。同时光热发电配套的长时储热能力,可平抑风电、光伏的间歇性与波动性缺陷,大幅提升清洁能源在整体电力供给结构中的稳定占比,降低能源系统对化石能源的刚性依赖,支撑能源供给体系长期安全可持续运转^[3]。

3.2 降低能源利用全流程环境负荷,维护区域生态稳态

化石能源燃烧发电会释放大量二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物,不仅加剧温室效应,还会诱发酸雨、大气颗粒物污染等环境问题,火电配套的矿山开采、水资源消耗、固废堆放也会对地表植被、水土环境造成破坏。太阳能光热发电运行阶段无燃料燃烧过程,不存在废气、废渣、废水的持续性排放;电站建设期土地经过平整改造后可采用耐旱植被覆绿,镜场区域不破坏原有土层结构,可实现土地二次生态修复。系统运行过程消耗的水工质可闭环循环复用,水资源重复利用率较高,能够大幅降低传统火电高耗水带来的区域水资源压力,从大气、水土、地表植被多维度减轻能源开发对生态系统的扰动,维持区域生态环境稳定可持续。

4 太阳能光热发电系统制约可持续发展的现存问题及技术优化路径

4.1 系统存在的主要制约问题

(1) 光热能量多级转换全链路损耗偏高,太阳直射辐射能量经镜面光学反射、集热管光热转换、传热介质跨回路输送、汽轮机热力循环等多个串联环节,普遍存在沿程散热、表面辐射热损失等不可逆损耗,大量 20℃ 至 70℃ 区间的中低温余热直接通过空冷或水冷冷凝器排入周边大气或水体,未建立定向回收利用通道,直接造成太阳能资源全链路综合利用率长期处于偏低水平,当前在运项目的年均光电转换效率普遍低于 18%。(2) 聚光镜面、真空集热管、高温熔盐等核心设备与换热介质存在自然周期性老化损耗,达到设计服役年限后需批量更换,设备拆解过程会产生大量废弃玻璃、合金构件与失效熔盐,若未建立标准化闭环回收处理体系,随意堆存或处置会形成工业固体废弃物,大幅增加区域危废与固废的环境处置压力。(3) 储热系统长期处于 500℃ 以上高温工况下,罐体保温层存在持续静态散热损耗,现有热能调度体系仅覆盖发电侧单一场景,富余热能无法实现跨时

段、跨用能主体的高效调配,部分存储的高品质热能出现无效耗散,进一步降低了能源综合利用效率^[4]。

4.2 系统运行能效优化设计

针对光热发电全链路中存在的多级能量损耗问题,对换热网络与动力热力循环系统开展系统性工艺优化,采用适配光热机组工况的多级回热循环模式,通过汽轮机不同压力级的分级抽汽,将不同品位的抽汽依次通入各级表面式加热器逐级预热锅炉给水,大幅提升给水进入蒸汽发生系统前的初始焓值,直接降低锅炉侧的燃料补燃与熔盐放热消耗。(1)在冷凝器末端增设耐腐蚀型冷凝器余热回收装置,将原本直接通过冷却系统排放的30-50℃低温余热进行定向提取,回收的低品位热能可用于场区建筑采暖、绿植灌溉水体预热、辅助系统工艺伴热等场景,构建全温区热能梯级利用体系,避免低品位热能直接散失。(2)同步对聚光追踪控制系统开展精度优化,通过动态误差校准算法将镜面角度控制偏差控制在0.1°以内,降低角度偏移造成的太阳辐射能量漏损,选用高反射率、户外长期服役低衰减的纳米陶瓷镜面涂层材料,减少光学路径上的反射损耗,从集热端源头提升太阳辐射能量捕获效率。通过全链条能效协同优化,最终实现单位发电量对应的太阳能资源消耗量显著降低,机组整体运行能效可提升8%以上。

4.3 设备全生命周期绿色化优化改造

(1)核心设备制造环节,优先选用耐高温熔盐腐蚀、抗高原强紫外线老化的新型镍基合金与特种复合钢材制备真空集热管、大容量储热罐体等关键部件,通过材料成分改性 with 结构应力优化,将核心设备设计服役周期从常规20年延长至30年以上,大幅减少全生命周期内的设备更换频次,直接降低废弃工业构件的产生总量。针对电站退役阶段的报废反射镜面、金属管路、熔盐换热介质,建立覆盖“回收-拆解-提纯-再制造”的全闭环回收工艺体系,对铝合金边框、高硼硅玻璃构件、特种金属材料开展精细化分类拆解与定向提纯再加工,实现

92%以上的材料资源化再生利用,从源头避免工业固废随意处置带来的土壤与水体环境压力。(2)系统运行侧,优化储热罐体的多层复合保温层结构,采用气凝胶绝热毡与耐高温反射层组合的高性能保温材料,将高温储热环节的静态日散热损耗控制在2%以内。同步搭建适配不同用能需求的分布式热能输送管网,将电站富余的中高温热能定向输送至周边工业园区、民生供暖等外部用能单元,构建电、热多联供的综合能源供给模式,最大化挖掘太阳能资源的梯级利用潜力,从设备全生命周期管控与跨场景能量调度两个核心维度,全面提升光热发电系统的绿色可持续属性^[5]。

结束语

太阳能光热发电凭借自带长时储热的技术禀赋,正在成为支撑高比例新能源电力系统稳定运行的核心载体,其价值早已超越单一的清洁发电范畴,延伸至多能互补、工业减碳、生态协同等多个可持续发展场景。未来随着材料技术与系统集成工艺的持续迭代,光热发电的度电成本将进一步下探,全链条绿色管控体系也将逐步完善,最终实现与风光新能源的协同规模化发展,为我国构建新型电力系统、完成双碳目标提供坚实的技术支撑,推动能源开发与生态保护形成长期良性互动。

参考文献

- [1]施卫华,阮宁毅.太阳能光热发电系统应用与可持续发展研究[J].电工技术,2026(2):60-65.
- [2]胡楠.塔式太阳能光热发电系统性能分析与评价[J].石油石化节能与计量,2026,16(1):89-94.
- [3]王鹏.太阳能光伏发电系统在农业温室大棚中的应用[J].中国农机装备,2026(2):114-116.
- [4]张鹏,徐小芳,于明双.太阳能发电熔盐储能系统关键技术研究[J].自动化应用,2026,67(1):145-152.
- [5]冒慧,张丽娜,张改景.太阳能光伏光热系统技术研究进展[J].绿色建筑,2026,18(1):44-51.