光-热-电联合利用系统的能量转换效率优化研究

李海林

中国联合工程有限公司 浙江 杭州 310052

摘要: 本论文聚焦光-热-电联合利用系统能量转换效率优化,系统阐述其光-热、热-电、光-电转换基础原理,深入剖析在材料性能、设备结构、系统集成、环境因素等方面存在的效率瓶颈。基于问题导向,提出包括新型材料研发、设备创新设计、智能系统协同优化等多维度的效率提升策略与技术路径,旨在为提高该系统能量转换效率提供理论依据与实践指导,助力可再生能源高效利用与能源结构绿色转型。

关键词: 光-热-电联合利用系统; 能量转换效率; 效率瓶颈; 优化策略; 可再生能源

引言: 在全球能源需求攀升与“双碳”目标的双重推动下,可再生能源的高效开发利用已成为保障能源安全、应对气候变化的核心路径。太阳能凭借其储量丰富、清洁无污染的特性,成为能源领域的关注焦点。光-热-电联合利用系统能够将太阳能通过光热、光电等方式,实现热能与电能的综合梯级转化,在可再生能源技术领域极具发展潜力。但目前该系统能量转换效率普遍较低,大多在12%~30%,远不及传统能源发电效率,严重阻碍其商业化推广。因此,开展效率优化研究,对推动太阳能利用、加速能源转型意义重大。

1 光-热-电联合利用系统基础原理

1.1 光-热转换原理

光-热转换是光-热-电联合利用系统实现能量转化的基础环节,主要通过太阳能聚光集热器实现。太阳辐射包含丰富的能量,其光谱覆盖紫外、可见光和红外波段。太阳能聚光集热器依据不同的结构和材料特性,将太阳辐射能转化为热能。常见的太阳能集热器有平板型和真空管型。(1)平板型集热器由透明盖板、吸热板、保温层和外壳组成。透明盖板采用低铁超白玻璃,具有高透光率,可让太阳辐射顺利进入;吸热板表面涂覆选择性吸收涂层,对太阳辐射吸收率高,而自身红外发射率低,能高效吸收太阳辐射并减少热量散失;传热流体(如水或导热油)在吸热板流道中循环,吸收热量后温度升高,实现光能到热能的转换。(2)真空管型集热器利用真空环境减少热传导和对流散热,其真空管内的吸热体涂覆高性能吸收涂层,真空管内流动的传热介质二元硝酸熔融盐(60%硝酸钠和40%硝酸钾的熔融态混合物)温度可升至560℃左右,为后续发电提供高温热源。在高温环境下仍能保持良好的集热性能,尤其适用于太阳能热发电、太阳能采暖、低温热水供应等场景^[1]。

1.2 热-电转换原理

热-电转换是将光-热转换产生的热能进一步转化为电能的过程,主要有朗肯循环发电和温差发电两种方式。

(1)朗肯循环发电系统广泛应用于大型太阳能热电站。太阳能集热器吸收转换为热能,再通过热能转换产生的高温高压蒸汽推动汽轮机旋转,将热能转化为机械能;汽轮机带动发电机发电,实现机械能向电能的转换;做功后的蒸汽在冷凝器中冷却凝结为水,再通过给水泵送回换热器,完成热力循环。光学聚光比是指聚集到吸热器采光口平面上的平均辐射功率密度(kW/m^2)与进入聚光场采光口的太阳法向直射辐照度之比(kW/m^2)。光学聚光比是影响集热温度和集热效率的最主要指标,聚光集热场的聚光比越大,太阳能热发电系统可实现的集热效率就越高,整个系统的发电效率也就越高。热力循环的驱动力来自太阳能集热介质的温度,其既关系到光热转换效率,又关系到热电转换效率。优化集热场的布置、协同提高聚光比与介质温度、提高蒸汽参数和优化汽轮机设计,可提升发电效率。(2)温差发电基于塞贝克效应,利用半导体材料在温差下产生电动势实现发电。目前商用的半导体温差发电材料热电优值较低,限制了其转换效率,科研人员正致力于研发新型材料以提升性能。

1.3 光-电转换原理

光-电转换依靠太阳能光伏电池,核心原理基于半导体光电效应。光子能量高于半导体禁带宽度时,半导体吸收光子产生电子-空穴对,在PN结内建电场作用下,电子与空穴分离并定向移动,在电池两端形成电势差,外接负载产生电流,实现光能到电能转化。晶体硅光伏电池是市场主导,单晶硅电池经PERC、TOPCon等技术改进,实验室效率超26%,量产效率约23%;多晶硅电池因成本低,在分布式光伏等领域应用广泛。薄膜光伏电池如碲化镉、铜铟镓硒,有柔性、弱光性能好等优点,但

有光致衰减、稳定性差等问题。钙钛矿电池实验室效率超33%，却因离子迁移等问题，距大规模商用尚远。

1.4 联合利用系统集成原理

光-热-电联合利用系统并非各单元简单组合，而是通过能量流和信息流的协同集成，实现太阳能的综合利用。系统中，光-热转换产生的热能优先满足热-电转换需求，多余热能用于供热或储存；光-电转换产生的电能与热-电转换电能可并网或直接供用户使用。智能控制系统是系统集成的核心，通过传感器实时监测太阳能辐射、设备运行参数和用户用能需求，运用优化算法动态调节各单元运行，实现能量的合理分配与高效利用。同时，能量储存装置如相变储能材料、锂电池等，在能源供需不平衡时发挥调节作用，保证系统稳定运行。

1.5 系统运行模式

(1) 光热优先模式适用于北方冬季供暖等供热需求旺盛区域，系统优先进行光-热转换保障供暖，剩余热能再用于发电，供热效率达70%~80%，可有效解决民生供暖。(2) 光电优先模式针对电力需求主导的工商业场景，优先启动光-电转换，发电不足时热-电转换单元补充，整体发电效率35%~40%，契合工商业用电特点。

(3) 综合优化模式借助人工智能算法，依据实时监测的太阳能辐射强度、设备参数和用户负荷数据，动态调节各单元运行参数，打破固定策略，使系统整体效率较传统模式提升5~8个百分点，是未来发展方向，能实现复杂工况下能源高效利用。

2 系统能量转换效率瓶颈分析

2.1 材料性能限制

在光-热-电联合利用系统中，材料性能是制约能量转换效率的关键因素。(1) 光-热转换材料在高温环境下稳定性欠佳，目前广泛应用的选择性吸收涂层，在超过300℃的长期运行过程中，会因原子扩散和氧化作用出现老化、剥落现象。美国Sandia国家实验室数据显示，常规涂层使用2年后，太阳吸收率可从初始的95%降至85%，热发射率从5%升至15%，致使集热效率大幅下滑。(2) 热-电转换材料的热电优值(ZT)偏低成为效率提升的主要障碍。当前商用的碲化铋基材料ZT值仅约1.0，而理论上ZT值需达到3.0以上才能实现高效发电。尽管科研团队在拓扑绝缘体等新型材料研发上取得进展，实验室中部分材料ZT值已突破2.0，但纳米级材料的规模化制备工艺复杂，导致生产成本高达传统材料的5-8倍，难以实现产业化应用。(3) 储能介质温度是太阳能热发电能效和成本最重要的因素，其研究的速度和成败影响着太阳能热发电的商业化及推广。第一代利用水或导热油作为介

质，温度在230~430℃，效率12%。目前大多数太阳能热发电均采用第二代利用二元熔盐(60%硝酸钠和40%硝酸钾)作为介质，温度在375~560℃，效率20%。示范第三代以空气、超临界二氧化碳或固体粒子作为介质的布雷登循环系统，温度在650~950℃，效率30%。实验室研究的第四代以碳酸、氯化熔盐、颗粒为吸热介质，以超临界二氧化碳为发电工质，温度在800~1100℃，效率35%。

(4) 光-电转换材料同样面临发展瓶颈。晶体硅电池转换效率已逼近29.43%的Shockley-Queisser理论极限，进一步提升需攻克载流子复合难题；碲化镉等薄膜电池存在光致衰减现象，初始效率18%~20%在运行1年后可能降至15%~17%；钙钛矿电池虽实验室效率突破33%，但有机-无机杂化结构易受湿度、温度影响，1000小时连续光照后效率衰减可达20%，严重阻碍商业化进程。

2.2 设备结构不合理

太阳能聚光集热器结构设计存在缺陷。太阳追踪控制系统复杂不完善，环境恶劣设备容易出现故障。使聚光集热器无法及时随太阳位置变化调整，导致光线反射损失增加；聚光系统无法一次全部吸收太阳能，部分集热器内部流道设计不合理，传热流体流动阻力大，流体没有满管且速率不匹配，致使传热介质不能达到预定的温度，降低热传递效率。热-电转换设备效率有待提高。汽轮机叶片气动设计不佳，增加蒸汽流动损失；温差发电模块散热结构不良，缩小冷热端温差，降低发电效率^[2]。光伏组件电池片排列和封装结构不合理，造成阴影遮挡和散热问题，影响发电功率。

2.3 光-热-电联合利用系统其他挑战

(1) 系统集成与协同方面，不同能量转换单元接口不匹配，像太阳能集热器与热-电系统热能参数不合，光电与热-电系统电能并网困难，且智能控制系统不完善，多单元难以精准协同，复杂工况下效率低。(2) 环境因素影响大，阴雨天太阳辐射弱、污染物附着组件，都降低转换效率；环境温度也制约系统性能。(3) 能量损失环节多，光-热、热-电、光-电转换及传输储存过程均有能量损耗，降低综合效率。(4) 还存在成本与效率的矛盾，提高效率需投入高额成本，而市场对能源价格敏感，这使系统在与传统能源竞争中处于劣势，限制了其推广应用。

3 能量转换效率优化策略与技术路径

3.1 新型材料研发与应用

(1) 研发耐高温、高稳定的光-热转换材料。采用纳米结构涂层技术，制备多层纳米复合膜，提高太阳吸收率，降低热发射率，增强涂层抗老化和抗腐蚀性能。

(2) 探索高热电优值的热-电转换材料。研究新型纳米复合材料、拓扑绝缘体材料, 优化材料晶体结构和电子能带结构, 提高热电性能, 并降低制备成本^[3]。(3) 推动前沿方向以空气、超临界二氧化碳或固体粒子作为介质的布雷登循环系统和碳酸、氯化熔盐、颗粒为吸热介质, 以超临界二氧化碳为发电工质的研究创新, 提高转换效率降低成本。(4) 推动光-电转换材料创新。继续改进晶体硅电池制备工艺, 提高转换效率; 解决薄膜电池稳定性问题; 突破钙钛矿电池寿命瓶颈, 实现高效、稳定的光-电转换。

3.2 设备结构优化设计

(1) 改进太阳能聚光集热器结构。设计自动跟踪太阳的集热器支架系统, 提高采光角度准确性; 设置二次聚光反射装置, 提高太阳能吸收效率。优化集热器内部流道, 降低传热流体流动阻力, 控制好流体速度并且使流体充满整个集热器真空管道, 确保流体介质在管道出口时能达到预定的温度。设置电动操作机构, 完善自动化控制系统, 提升热交换效率。(2) 优化热-电转换设备。运用计算流体力学技术优化汽轮机叶片形状, 减少蒸汽流动损失; 改进温差发电模块散热结构, 提高散热效率, 维持较大温差。(3) 完善光伏组件设计。优化电池片排列方式, 减少阴影遮挡; 改进封装工艺, 提高透光率和散热性能, 降低电池工作温度。

3.3 系统集成与协同优化

(1) 设计标准化能量接口, 实现光-热、热-电、光-电单元高效对接。开发智能能量路由器, 优化能量传输和分配。采用数字孪生技术构建系统虚拟模型, 实时模拟能量流动, 优化调度策略。(2) 开发基于人工智能的智能控制系统。利用深度学习算法分析系统运行数据, 预测太阳能变化和用户负荷需求, 提前优化各单元运行参数, 实现全局协同控制。

3.4 环境适应性技术

研发自清洁材料和装置。在聚光集热器和光伏组件表面涂覆超疏水、超亲油涂层, 结合纳米光催化材料, 实现自动清洁; 安装智能清扫机器人, 定期清除灰尘污

垢。采用温控技术提高系统环境适应性^[4]。在光伏组件集成相变材料, 控制电池工作温度; 为热-电系统设计智能冷却系统, 根据环境温度调节冷却水量, 保证温差稳定。

3.5 减少能量损失措施

在光-热转换环节, 优化聚光集热场的布置、采用真空绝热技术降低集热器散热损失, 采用新型高温的储能介质减少储热损失; 热-电转换中, 优化朗肯循环, 采用再热、回热技术提高发电效率; 光-电转换方面, 优化电池内部结构, 降低串联电阻^[5]。同时, 采用超导材料或低电阻电缆降低输电损耗, 优化储能系统设计, 提高充放电效率。

3.6 成本控制与效率平衡

通过规模化生产降低新型材料和设备成本, 规范化新材料熔盐的储存、运输和管理, 降低风险和建设成本。采用模块化设计理念, 简化系统安装和维护流程, 降低建设和运营成本。探索政策支持和商业模式创新, 提高光-热-电联合利用系统的经济可行性。

结语

光-热-电联合利用系统在可再生能源领域具有重要发展潜力, 但能量转换效率问题制约其推广应用。本研究通过系统分析系统基础原理、效率瓶颈, 提出涵盖材料、设备、系统集成等多方面的优化策略与技术路径。未来, 随着技术创新和产业发展, 光-热-电联合利用系统有望突破效率和成本瓶颈, 在全球能源转型中发挥重要作用, 为实现可持续能源发展目标提供有力支撑。

参考文献

- [1]张明远,李华强.高效光伏-热电耦合系统设计与优化[J].可再生能源,2022,40(3):456-463.
- [2]刘德民.水风光多能互补关键技术研究[J].水电与抽水蓄能, 2021, 7(5): 2-5.
- [3]刘伟东,赵静.光伏系统热转换技术研究进展[J].太阳能学报,2021,42(7):1234-1242.
- [4]高洁.抽水蓄能-光伏-风电联合优化运行研究[J].水电与抽水蓄能, 2020, 6(5): 25-29.
- [5]2024中国太阳能热发电行业蓝皮书。