

光伏光热（PVT）一体化系统热电联产性能及耦合控制策略

蔡超飞

中能核（河南）能源建设有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着能源需求的不断增长和环境保护意识的增强，光伏光热（PVT）一体化系统作为一种高效、环保的能源利用方式，受到了广泛关注。该系统结合了光伏发电和光热发电的优势，既能将太阳能转化为电能，又能将其转化为热能，实现了能源的高效综合利用。本文旨在深入探讨光伏光热一体化系统的热电联产性能及其耦合控制策略，以期为该系统的优化设计和实际应用提供理论依据和技术支持。通过对 PVT 系统工作原理的阐述，我们分析了其热电联产性能的主要指标，并探讨了影响系统性能的关键因素。进一步地，我们研究了耦合控制策略在 PVT 一体化系统中的应用，包括系统热电联产性能的优化、耦合控制策略的实现方法、基于工况自适应的耦合控制逻辑、储能系统的协同耦合控制、分布式 PVT 系统集群的耦合控制以及耦合控制策略的经济性与可靠性优化等方面。通过本文的研究，我们期望能够为 PVT 一体化系统的热电联产性能提升和耦合控制策略的优化提供有益的参考和启示。

关键词：光伏光热（PVT）；一体化系统；热电联产性能；耦合控制策略

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.003

引言

随着全球能源危机的加剧和环境污染问题的日益严重，寻找清洁、可再生的能源替代方案已成为国际社会的共识。光伏光热（PVT）一体化系统作为一种创新的太阳能利用技术，凭借其独特的热电联产能力，在能源领域展现出了巨大的应用潜力。该系统不仅能够有效捕获并利用太阳能进行光伏发电，还能同时将其转化为热能，实现了太阳能资源的高效、多元化利用，为能源结构的优化和环境保护提供了新的思路。

1 PVT 一体化系统概述

光伏光热（PVT）一体化系统是将光伏发电与光热利用有机融合的新型能源综合利用装置，打破了传统光伏、光热系统各自独立运行的局限。该系统通过在光伏组件背部集成换热流道，使太阳辐射中未被光伏电池转化为电能能量（尤其是红外波段能量）被换热介质吸收并转化为热能，实现了对太阳能的梯级利用。与单独的光伏系统相比，PVT 系统通过移除光伏电池表面多余热量，有效降低了电池工作温度，缓解了“温度效应”导致的光电转换效率衰减；与单独的光热系统相比，其额外产生的电能提升了单位面积太阳能的综合利用效率。从结构上看，PVT 系统主要由光伏组件（晶体硅、薄膜等类型）、换热流道（平板式、蛇管式、微通道式等）、换热介质（水、空气、防冻液等）、循环泵、储热装置及控制系统等部分组成，可根据应用场景需求

（如建筑一体化、工业余热利用、农业温室等）灵活设计为集中式或分布式系统，具有能源利用效率高、占地面积小、适配性强等特点，已成为太阳能综合利用领域的重要发展方向。

2 PVT 一体化系统热电联产性能分析

2.1 PVT 系统工作原理

PVT 系统的工作核心是基于光伏转换与光热转换的协同作用，实现对太阳能的同步捕获与转化。当太阳辐射照射到 PVT 组件表面时，光伏电池层首先吸收可见光等有效波段的能量，通过光伏特效应将其转化为电能，直接供给负载或存入储能设备；而光伏电池未吸收的红外辐射以及电池工作过程中产生的焦耳热、复合热等废热，则被紧贴电池背部的换热流道内的介质吸收。在循环动力装置（如循环泵、风机）的驱动下，受热后的换热介质沿流道流动，经过储热装置或换热设备时释放热量，用于供暖、供热水或工业用热等场景；降温后的介质再回流至换热流道，完成循环换热过程。在此过程中，换热系统不仅实现了热能的回收利用，更通过持续带走光伏电池的多余热量，将电池工作温度控制在较优范围内，减少了温度升高对光电转换效率的抑制作用，从而形成“热电互补、协同提升”的工作机制，最终实现系统电能与热能的联合产出。

2.2 系统热电联产性能指标

评估 PVT 系统热电联产性能需结合电能、热能产出

及综合利用效率等多维度指标,形成全面的性能评价体系。光电性能指标主要包括光电转换效率(光伏电池输出电能与入射太阳能的比值)、系统发电功率(单位时间内输出的电能,受电池温度、光照强度影响显著)及发电稳定性(不同工况下功率波动幅度);光热性能指标则涵盖光热转换效率(回收热能与入射太阳能的比值)、热能输出功率(单位时间内传递给换热介质的热量)及换热温差(介质进出口温度差,反映换热效果)。除单一能种指标外,综合能源利用效率是衡量 PVT 系统核心优势的关键指标,其计算公式为(输出电能+输出热能)/入射太阳能总量,通常比单独光伏系统效率高 20%-40%。此外,热电比(输出热能与电能的比值)可反映系统能源产出结构,适配不同场景对热、电需求的比例要求;经济性指标如单位能量成本(元/kWh)、投资回收期等,也为系统工程应用提供重要参考。

2.3 影响 PVT 系统性能的关键因素

PVT 系统热电联产性能受外部环境与系统自身参数的共同影响,各因素间存在复杂的耦合作用。外部环境因素中,光照强度直接决定入射太阳能总量,强度升高会同时提升光电输出功率与热能回收量,但也可能导致电池温度骤升,间接削弱光电效率;环境温度通过影响电池与换热介质的温差,改变换热速率,低温环境下换热效果更优,电池温度控制更易实现;风速、大气透明度等气象条件则通过影响组件表面对流换热与辐射吸收,间接影响系统性能。系统自身参数方面,光伏电池类型(晶体硅电池光电效率高但温度系数大,薄膜电池温度适应性强但效率较低)决定基础光电转换能力;换热流道结构(如流道宽度、间距、材质导热系数)影响换热面积与热阻,微通道流道因比表面积大,换热效率通常优于传统平板流道;换热介质类型及流速也至关重要,水基介质比热大于空气,换热效果更好,但需考虑防冻问题,而流速过高会增加泵功消耗,存在最优流速区间;此外,组件封装工艺(如光伏层与换热层的贴合度)影响热传导效率,封装不良易形成热阻,降低系统综合性能。

3 PVT 一体化系统耦合控制策略研究

3.1 系统热电联产性能优化

PVT 系统热电联产性能优化的核心是通过协调光电与光热转换过程,实现能源利用效率最大化与输出特性的动态适配。从能量分配角度,需基于光伏电池温度系数与换热介质热需求,优化能量捕获比例,在光照充足但热需求较低时,可适当降低换热介质流速,减少热能

回收占比,优先保障光电输出;而在热需求高峰时段,则通过提升换热效率,在控制电池温度的同时最大化热能产出。从结构优化层面,可采用复合换热结构,如在流道内设置扰流元件增强湍流换热,或采用选择性吸收涂层提升红外波段能量吸收效率;针对光伏组件,可通过串联/并联优化组串设计,减少阴影遮挡导致的功率损耗。此外,多能互补优化也是重要方向,将 PVT 系统与储能设备(蓄电池、储热水箱)、辅助能源(燃气锅炉、热泵)结合,通过协调不同能源的出力时序,平抑光照波动导致的热电输出不稳定问题,确保系统满足用户连续用能需求。

3.2 耦合控制策略实现

PVT 系统耦合控制策略的实现需依托传感检测、数据处理与执行调控的协同运作,核心是建立“感知-决策-执行”的闭环控制机制。首先,通过多参数传感网络实时采集关键运行参数,包括光照强度、环境温度、光伏电池温度、换热介质进出口温度与流量、系统输出电压电流等,为控制决策提供数据支撑。其次,基于采集的参数构建动态控制模型,通过算法计算最优控制变量(如循环泵转速、阀门开度),常用算法包括 PID 控制(适用于线性稳定工况)、模糊控制(适配非线性不确定系统)、模型预测控制(可预测未来工况并提前调控)。例如,当光照强度骤升导致电池温度超过阈值时,控制模型可自动提升循环泵转速,增加介质流量以强化换热;当热需求降低时,则适当降低泵速以减少能耗。最后,通过执行机构(循环泵、电动阀门、逆变器)执行控制指令,调整系统运行状态,同时将调控后的参数反馈至传感网络,形成闭环优化,确保系统在不同工况下始终处于热电协同的最优运行区间。

3.3 基于工况自适应的耦合控制逻辑

基于工况自适应的耦合控制逻辑旨在解决 PVT 系统运行工况动态变化的问题,实现控制策略的实时调整与自我优化。该逻辑的核心是建立工况分类机制,根据光照强度、环境温度、用户热电需求等参数,将运行工况划分为光照充足-热需求高、光照不足-热需求低、极端天气(暴雨、高温)等典型模式,针对不同模式预设基础控制策略框架。同时,引入自适应学习算法,通过持续积累运行数据,分析不同工况下控制变量与系统性能的关联规律,动态修正控制参数(如 PID 的比例系数、积分时间),避免固定参数在工况突变时出现调控滞后或超调问题。例如,在季节交替期,环境温度与热需求变化频繁,自适应算法可通过学习历史数据,自动调整

电池温度控制阈值,在保证光电效率的同时匹配用户热需求的季节变化,提升控制策略的适应性与鲁棒性。

3.4 储能系统协同耦合控制

储能系统协同耦合控制是提升PVT系统热电输出稳定性与用能灵活性的关键手段,核心是协调PVT系统与储能设备的充放电/储放热过程。对于电能储能(蓄电池),控制策略需根据光伏输出功率与用电负荷的差额,决定蓄电池的充放电状态:当PVT发电功率大于负荷时,控制蓄电池充电,避免电能浪费;当发电功率不足时,蓄电池放电补充供电缺口,同时通过调控光伏逆变器的输出电压,确保与蓄电池的电压匹配。对于热能储能(储热水箱),则基于换热介质温度与水箱水温的差值控制储热过程:当介质温度高于水箱设定温度时,打开储热阀门实现热量存储;当用户用热时,优先利用水箱储热,不足部分由PVT系统实时供热。此外,通过热电储能协同调度,可实现跨能种的互补调节,例如在夜间无光照时,可利用蓄电池电能驱动热泵辅助加热,提升热能供应能力,进一步强化系统的用能可靠性。

3.5 分布式PVT系统集群耦合控制

分布式PVT系统集群耦合控制针对多组PVT模块组成的集群系统,通过协同调控实现整体性能最优,避免单模块独立运行导致的资源浪费与负荷不均。该策略首先需建立集群通信网络(如LoRa、以太网),实现各模块运行参数的实时共享与集中监控,形成集群运行状态的全局视图。其次,基于“负荷均衡”原则,通过功率分配算法协调各模块的热电出力:对于光伏发电部分,根据各模块的光照条件差异,调整逆变器的MPPT(最大功率点跟踪)参数,使光照充足的模块优先输出功率,减少集群整体的功率损耗;对于光热部分,通过调控各模块的介质流量分配,避免部分模块因流量过大导致能耗过高,或因流量不足导致电池过热。此外,集群控制还需结合区域用户的热电需求分布,通过管网压力与流量协调,确保热能在输配过程中的损失最小化,提升分布式集群系统的整体能源利用效率与供能可靠性。

3.6 耦合控制策略的经济性与可靠性优化

耦合控制策略的优化需兼顾经济性与可靠性,在提升系统性能的同时,降低运行成本并保障长期稳定运行。

经济性优化方面,核心是能耗与收益的平衡:通过优化循环泵、逆变器等辅助设备的运行时序,减少非必要能耗(如夜间低负荷时降低泵速);基于分时电价与热价机制,调整热电输出与储能策略(如在电价高峰时段优先并网发电,电价低谷时段储存电能),提升系统经济收益。可靠性优化则需从故障预警与容错控制入手:通过分析传感数据的异常波动(如介质流量骤降、电池温度突变),提前预警管道堵塞、泵体故障等问题;设计容错控制逻辑,当某一模块或传感器故障时,自动调整其他模块的控制参数,例如单模块换热流道堵塞后,增加相邻模块的介质流量,弥补热能产出缺口,避免系统整体性能大幅下降。此外,通过简化控制算法的复杂度,降低硬件配置要求,可进一步提升控制策略的工程适用性与经济性。

4 结语

综上所述,PVT一体化系统通过集成换热流道,实现了对太阳能的高效梯级利用,展现了卓越的热电联产性能。该系统不仅有效降低了光伏电池的工作温度,缓解了光电转换效率的衰减问题,还通过额外产生的电能提升了单位面积太阳能的综合利用效率。其结构灵活多变,适配性强,可广泛应用于不同场景,成为太阳能综合利用领域的重要发展方向。未来,随着技术的不断进步和成本的进一步降低,PVT一体化系统有望在能源领域发挥更加重要的作用,为人类的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]周霞,李建锋,周宏,高云鹏.耦合蒸汽压缩与储热的燃煤热电联产机组调峰性能研究[J].中国电机工程学报,2025,45(01):194-206.
- [2]肖卓楠,张荣,刘英琦,安尧,张智羽.太阳能辅助热电联产机组供热、发电及调峰性能分析[J].热力发电,2024,53(05):67-74.
- [3]王娜,马国锋,王宇,刘明,严俊杰.蒸汽热网辅助热电联产机组调频性能研究[J].工程热物理学报,2024,45(01):40-45.
- [4]刘铁路,王云聪,蒲晓光,李浩,张营,徐钢.热电联产机组抽汽性能分析及优化[J].节能,2023,42(11):6-9.