

光热发电集热系统出口温度控制策略研究进展综述

路汇中

兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

光热发电(Concentrated Solar Power, CSP)作为一种兼具可再生能源特性与可调度能力的发电技术, 在全球能源结构转型中扮演着重要角色。其中, 集热系统传热流体(Heat Transfer Fluid, HTF)的出口温度控制是保障光热电站高效稳定运行的核心技术之一, 其控制性能直接影响系统的发电效率、储能特性及关键设备的寿命。在此背景下, 本文首先分析了出口温度控制的关键挑战, 包括太阳辐照波动、传热滞后性和多变量耦合等问题; 随后综述了集热系统温度控制策略的国内外应用现状; 最后探讨了当前光热发电的新趋势, 并对集热系统控制策略的未来发展方向提出展望, 以期光热发电集热系统出口工质温度的稳定跟踪控制提供参考。

关键词

光热发电, 集热系统, 出口温度控制策略

State-of-the-Art Review on Control Strategies for Solar Collector System Outlet Temperature in Concentrated Solar Power Plants

Huizhong Lu

Key Lab of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 10th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Concentrated Solar Power (CSP), as a renewable energy technology with dispatchable capabilities, plays a significant role in the global energy transition. Among its components, the outlet temperature control of the Heat Transfer Fluid (HTF) in the solar collector system represents a core technology for ensuring the efficient and stable operation of CSP plants. Its control performance directly impacts system power generation efficiency, energy storage characteristics, and the lifespan of critical equipment. Against this backdrop, this paper first analyzes the key challenges in outlet temperature control, including solar irradiance fluctuations, heat transfer hysteresis, and multivariable coupling. Subsequently, it reviews the current applications of temperature control strategies for solar collector systems both domestically and internationally. Finally, it explores emerging trends in CSP and proposes future directions for the development of collector system control strategies, aiming to provide insights for achieving stable tracking control of the outlet working fluid temperature in CSP collector systems.

Keywords

Concentrated Solar Power, Solar Collector System, Outlet Temperature Control Strategy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长期以来,我国以煤炭为主的能源结构带来了严重的环境问题,如空气污染和气候变暖,在全球能源结构低碳化转型的背景下,太阳能热发电技术因其优异的电网兼容性和可调度能力,正成为构建新型电力系统的重要组成部分。地球表面接收的太阳辐射能资源极为丰富,理论上仅需收集一小时内的太阳辐射量即可满足全球人类一年的能源需求[1],且因其具有广泛的地理分布特性,可在任何达到特定太阳辐射阈值的区域进行有效采集。根据国际可再生能源机构的最新预测,到2030年全球太阳能热发电装机容量将实现三倍增长,我国为实现“双碳”目标,也积极推动能源电力产业的转型。

光热发电技术通过聚光集热系统将太阳能转化为热能,并驱动发电机组输出电能。其中,传热流体(HTF)的出口温度是影响光热转换效率与系统安全的关键参数。若温度过高,可能导致吸热器材料热应力损伤;若温度过低,则降低热力循环效率。理论分析与工程实践表明,温度控制精度与系统效率呈显著正相关性,然而,实现精确的温度调控面临多重技术挑战:首先,太阳辐照的时变特性导致热源输入具有显著不确定性;其次,高温传热工质的热物理参数非线性变化增加了系统建模难度;再者,大规模集热场的多回路耦合特性使控制系统呈现强非线性特征。

当前,随着太阳能热发电技术向超高温、超临界方向发展,温度控制系统的设计指标日趋严格。为应对这一挑战,现代控制理论与智能算法的融合应用,正在推动控制策略从传统PID向自适应智能化方向演进。本文系统梳理集热系统出口温度传统控制方法、现代控制方法以及智能化控制方法的研究进展,并探讨光热电站面向大容量、高效率的新挑战在控制策略方面的研究趋势,以期提升太阳能热发电技术的经济性和可靠性提供理论支撑。

2. 光热发电原理及控制需求

2.1. 太阳能热发电原理

太阳能光热发电系统的工作原理是基于聚光集热技术实现太阳辐射能的高效转化。该系统通过大规模反射镜阵列对入射太阳辐射进行光学汇聚，将原本低能量密度的分散辐射集中到接收器表面，使其能流密度显著提升。进而加热集热系统内的传热工质，完成太阳能到热能的转化。经加热的高温传热介质通过热交换装置将热能传递给汽轮机内的工质，产生高温高压蒸汽，驱动朗肯循环热力发电机组运行，实现“太阳能－热能－机械能－电能”的连续转换[2]，基本原理如图 1 所示。

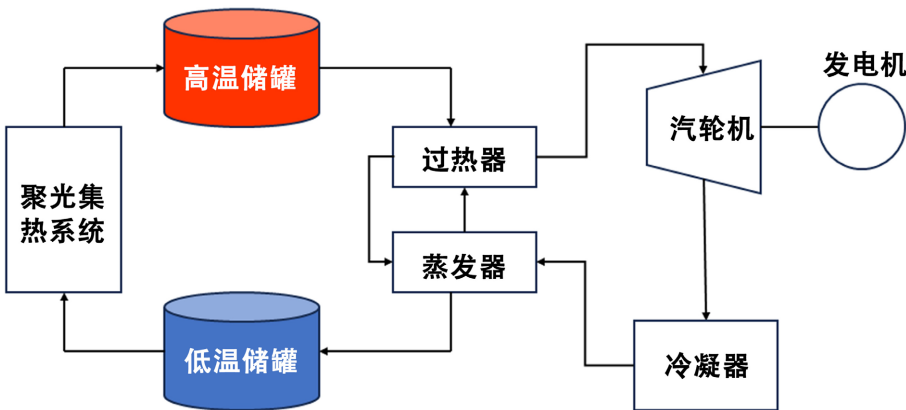


Figure 1. Schematic diagram of the fundamental principles of concentrated solar power (CSP)
图 1. 光热发电基本原理图

这种多级能量转换机制不仅实现了太阳能向电能的稳定输出，还通过集成储热系统有效解决了太阳能的间歇性问题，显著提升了电站的电网兼容性与调度能力。根据聚光方式与接收器配置的不同，主流光热发电技术可分为四类，其对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison of four major concentrated solar power (CSP) technologies
表 1. 四类光热发电技术对比

类型	槽式	塔式	线性菲涅尔式	碟式
聚光方式	线聚焦	点聚焦	线聚焦	点聚焦
聚光比	100~300	300~1500	50~100	1000 以上
效率(%)	15~20	20~25	10~15	25~30
占地面积	大	中	中	单个小、总体大
优点	技术成熟、结构简单、多场景适用	聚光比高、集热温度高、发电效率高	反射镜结构简单、成本低、土地利用率高	聚光比极高、光电转换率高、系统紧凑
缺点	占地面积大、聚光比和效率低	投资成本高、系统复杂、镜场占地面积大	聚光比和效率低、存在反射镜遮挡效应	单个系统功率小、维护成本高、技术成熟度低
应用场景	中低温太阳能热利用、小型热发电	大型太阳能热发电	太阳能热发电与工业余热回收	小型独立供电、分布式能源

2.2. 出口温度控制需求

集热系统出口温度对整个光热发电系统起着决定性作用，它直接关联着蒸汽参数，而蒸汽参数又与

热-电转换效率紧密挂钩，合适的温度能确保蒸汽处于最佳工作状态，促使热能高效转化为电能。一旦集热系统出口温度过高，可能导致集热系统或发电系统内部的零部件因承受超出耐受范围的高温而出现变形、材料性能劣化等状况，严重时甚至直接损坏设备，致使整个发电系统故障停机。反之，若出口温度过低，蒸汽无法达到理想的做功能力，做功过程中传递的能量不足，热-电转换效率便会大打折扣，发电量减少，发电成本变相增加，极大影响发电项目的经济效益。

此外，储热系统中不同的传储热工质有着不同的工作温度要求，以熔盐工质为例，其运行温度区间为 260℃~565℃，温度过低会导致熔盐凝固，丧失流动性，不仅阻碍熔盐在集、储热系统内正常循环流动，无法高效存储和吸收热量，还可能因凝固膨胀损坏集热管路及储罐；而温度过高，熔盐将面临分解风险，分解产生的物质可能具有腐蚀性，侵蚀设备内部结构，缩短设备使用寿命，同时导致熔盐储热性能大幅下降，极大影响储热系统的稳定性与可靠性，进而干扰整个光热发电系统的平稳运行。同时，考虑到光热电站并网发电和电网调度的需求，集热系统工质出口温度需能快速响应负荷的变化，因环境因素导致的温度波动会降低发电稳定性，从而影响到整体发电的效率。

综上所述，光热电站集热系统出口温度的稳定控制存在以下挑战：首先，环境因素(太阳辐照强度、温度、风速)的波动导致的辐射能量吸收量及集热过程热损失的非线性变化；其次，集热温度需时刻保持在传热工质的物理特性限制之内，避免工质物性发生改变；第三，由于集热回路本身的长度及集热工质的热容，出口温度的响应存在明显的滞后性；最后，集热系统内多个参数的时变性和耦合进一步加大了出口温度稳定跟踪控制的难度。以上挑战带来的关键控制需求如表 2 所示。

Table 2. Outlet temperature control requirements
表 2. 出口温度控制需求

控制目标	控制需求
温度稳定性	降低出口温度的超调及波动范围，避免频繁调节
动态响应性能	辐照强度突变导致温度波动时，可在短时间内快速恢复温度
抗干扰能力	可平稳应对环境温度、风速等因素带来的扰动
多参数协调	各参数协调控制，降低参数时变带来的影响，避免多参数耦合振荡
安全约束	温度不得超过材料及设备的安全运行极限，降低故障风险

为解决集热系统出口温度控制这一非线性的滞后性动态过程控制问题，国内外学者参考了众多成熟控制策略，开展了大量研究探索，以期实现集热温度的稳定控制，同时为光热发电系统的全局自动化控制提供理论支撑。

3. 出口温度控制策略国内外进展

3.1. 国外研究进展

国外对于太阳能集热器场温度控制的研究开始较早，早在 1986 年就已学者设计实现了一些原始的数字控制器对此进行初步探索[3] [4]，1990~2000 年随着太阳能利用的产业化出现了大批相关研究内容，学者们将在其他工业过程控制中所使用的经典方法应用于槽式光热发电领域。这些方法以自适应控制策略与增益调度方法为主，自适应方法能够根据系统自身动态特性自动调整参数，非常适合集热系统出口温度控制这一变工况问题，与自适应方法不同的是增益调度方法通过预设参数表来应对变工况问题，实现方法较自适应方法简单：1992 年，西班牙学者 Camacho 等设计了一种基于极点分配方法的自整定比例积分控制器，并将其用于太阳能分布式集热器场系统，该控制器采用串联补偿结构以抑制可测外部干扰

的影响,为验证控制性能,研究团队进行了仿真分析,并与传统并行前馈控制策略进行了对比评估,结果表明串联方法补偿效果更明显[5]。1994年,该团队又提出两种方法,一种在计算过程中纳入电厂的频率响应基于增益调度的广义 CARIMA 模型预测控制策略[6],另一种应用反应曲线法建模的自适应广义预测控制策略[7],并将两方法在光热电站进行性能验证,结果表现出良好的性能;同年,Meaburn 等为分布式集热场提出了一种考虑低频谐振特性的自适应控制方法,提高了系统的控制响应性能[8]。虽然这类方法能很好适应变工况过程,但在实际应用中发现,由于这一时间对集热系统的模型描述并不完善,导致自适应这种对模型精度要求较高的方法未能取得很好的效果,增益调度方法也因预设参数表的机制而缺乏一定的灵活性。因此,学者们把目光聚集于经典 PID 控制这一有着强大的工业实用性及易于实现性的方法展开广泛研究。Henriques 等设计了基于 PID 控制器监控开关的分层控制策略,并使用 c-Means 聚类方法简化了此过程,该策略同时创新性地 在光热电站的多个工作点分别设计不同的 PID 控制器,根据监控策略实现不同测量条件下控制器的切换[9],这种在不同工况点设计不同控制器的方法为后来多模型思想在这一方向的发展提供了研究方向。

然而,学者们在研究的过程中发现针对集热系统温度这一非线性对象,使用线性方法难以取得良好的控制效果,尽管上述研究在被控对象模型建立中采用了部分非线性的方法改善此问题,依旧未能达到满意的效果。2000 年以后,非线性方法被大量应用在槽式中低温集热系统温度控制策略中。非线性的核心优势体现在对集热管中导热油随温度变化的物性参数以及太阳辐照强度与集热效率之间的复杂非线性特性的精确描述能力。这类方法通过反馈线性化或直接非线性控制策略,有效避免了传统线性方法在工作点附近线性化带来的模型误差,显著提升了系统在宽工况范围内的控制精度。Pickhard 为已投入使用的光热电站设计了非线性控制器,根据集热管内导热油工质不同温度下的物性关系,设计出不同的非线性模型,使用集热器的数学模型选定控制器输出,同时使预测成本函数最小,以求稳定控制集热系统的集热温度,此方法同样引入了多模型的思想[10];Johansen 等以集热系统内能为受控变量设计了基于能量的非线性控制器,辐照强度和入口处油温作为前馈变量,建立被控对象的分布式参数非线性模型,并在试运行电站中测试了方法的有效性[11];Barão 等关注集热场的自适应非线性温度控制,为了处理光热电站的非线性特征和外部干扰,对可测变量进行非线性变换,变换过程中设计了基于李雅普诺夫函数的自适应律来优化系统整体状态,使变换后系统呈现积分器特性,从而使之可应用线性控制方法[12]。

上述控制方案大部分已趋于成熟且已有在光热电站应用的实例,然而,这些策略大多需依赖前馈补偿机制,以有效抑制被控信号中的扰动效应,同时这类方法通常需要精确的系统数学模型,而集热系统的精确建模本身就是一个技术难题,特别是在处理太阳辐照随机波动、云层遮挡等不确定因素时,模型失配会导致控制性能下降。其次,非线性控制器的设计复杂度显著高于线性控制器,也对控制器的计算能力提出了较高要求。近年来智能控制技术的发展为克服这些局限提供了新思路,这使得基于模型的高阶非线性智能控制策略开始快速发展,逐渐成为当下集热系统温度控制的主流方案。

21 世纪初,许多学者对这类方法进行了初步探索,Luk 等为西班牙槽式光热电站 Plataforma Solar de Almería (PSA)开发了一种模糊逻辑控制系统,系统基于遗传算法(GA),优化了电厂输入温度,即集热系统出口温度控制的响应时间,与电站既有的方法对比发现该策略性能更优[13];Henriques 等运用神经网络优化 PID 控制,神经网络由电站的运行数据训练而成,同时构建基于 Takahashi 规则的多组 PID 控制器调度机制,为集热系统温度控制策略提供了智能化思路[14]。

2010 年至今,这类方法开始趋于成熟且在光热电站大规模应用。Henriques 等提出一种间接自适应的非线性控制策略,该策略基于递归式神经网络实现,离线训练神经模型后再通过在线的学习进一步改进算法,最后在集热场验证了方法的有效性[15];Gallego 等为槽式光热集热器设计了一种模型预测控制策略,基于观测器理论实现,同时将算法与增益调度的广义预测控制方法[6]作对比验证了方法的性能[16];

Juuso 等为减轻阴雨天气对光热发电效率的影响,设计了一个带预定义适应模型的非线性语言方程(LE)控制器、避免极端运行工况的智能功能的多级控制系统,延长了集热场的运行时间,同时对该方法进行了智能化的改善,新的智能 LE 控制器将运行工况进一步扩展,同时增强了抗干扰性能,智能方法通过基于模型的预定义适应技术实现[17]; Karamali 等为提升控制性能做出的研究是在传统的带有 PID 控制器的前馈控制方法中引入迭代扩展卡尔曼滤波器来估计系统运行中的温度,以大幅消除设备运行过程中的噪声干扰,为出口工质温度的鲁棒性预测控制提供了另一种解决方法[18]; Alsharkawi 等根据已有研究,提出改进的增益调度预测控制策略,该研究在预测模型的建立中纳入前馈思想,这很大程度上减轻了 2010 年以前各类算法对前馈补偿机制的依赖[19]; Camacho 等为线性菲涅尔式集热系统设计了增量式无偏移状态空间模型预测控制器,采用 Luenberge 观测器估计系统的不可测状态变量,所提算法性能优于增益调度广义预测控制方法[20]; Sánchez 等提出自适应状态空间模型预测控制策略来控制集热系统出口油温,与常规调节集热系统工质流速不同,该方法通过调节集热镜场的聚焦程度来实现对温度的安全性控制[21]; Frejo 等通过对比研究集中式与分布式模型预测控制方法发现,虽然两种方法在集热功率提升方面表现相近,但分布式方法具有显著的计算效率优势[22]; Ruiz-Moreno 等创新性地将深度学习优化技术应用于模型预测控制,其研究结果表明,该方法在保证控制精度的前提下(输出功率波动小于 0.02 kW),可减少 3% 的计算数据量,有效提升了控制系统的运行效率[23]。这些方法成为当前国外光热电站普遍使用的温度控制策略,也为国内智能化算法研究的发展奠定了基础。

3.2. 国内发展现状

国内对聚光集热系统出口温度的控制策略研究起步较晚,大量的相关研究从“十三五”规划期间开始逐步出现,2016 年国家能源局首批 20 个光热示范项目(总计 1.35 GW)带动了技术发展。中国香港学者 Tang 等的研究内容较其他团队稍早,他提出一种基于模糊 PID 结构的最优控制器设计方法,该控制器在离散时间域内保持了传统 PID 控制器的线性框架,但采用了自适应调节的控制增益机制,引入 GA 算法对参数进行协同优化,最终实现性能最优的自整定模糊 PID 控制器[24]。郭苏研究团队针对槽式集热器的动态特性,创新性地提出了多模型切换受限增量广义预测控制策略,该控制方法通过建立多个局部模型并设计智能切换机制,在保证系统稳定性的同时,显著提升了控制性能,实验数据显示其具有输出波动小、响应速度快、稳态偏差小等突出优势[25];潘楚云等以塔式集热系统为研究对象,采用多面性预测控制方法实现了集热过程中系统换热的稳定控制,降低了集热蒸汽温度的波动幅度[26];华北电力大学耿直等针对槽式太阳能发电的储热系统,在加入阶跃扰动的情況下对比了 P 控制、PI 控制以及 PID 控制方法各自的跟踪响应性能,发现 PID 控制能够有效避免外界扰动对储热系统带来的影响[27]。尽管国内学者在控制策略上创新不很丰富,但在集热系统动态特性上研究更加深入,更注重方法在实际复杂工况下的应用。

2020 年以来,为响应国家能源绿色转型,光热发电集热系统的控制技术在我国快速蓬勃发展。虽然国外研究在理论体系完整性、控制策略多样性等方面仍保持领先。但国内学者在抗干扰控制方面大量创新,开始形成针对特定集热系统(如线性菲涅尔式系统)的专用控制方案。徐蕙等研究人员基于集热系统集总参数模型,将其在选取的工作点处线性化,之后分别选用 PID 控制与内模控制展开了对比探究,研究结果证实内模控制在面对外界干扰时较 PID 控制展现出了更好的抗扰动能力[28]。2021 年,中国兰州大成科技公司建成熔盐线性菲涅尔式光热电站,电站装机容量 50 MW,集热温度高达 550℃,是世界上首座商业化运行的高温熔盐线性菲涅尔式光热电站,这意味着我国在高温光热发电领域领先于世界。因此,国内研究目前以针对特定集热系统的高温控制策略为主。针对聚光集热系统普遍存在的不确定性问题, Lu 等提出了滑模预测控制(SMPC)方法,该方法在线性菲涅尔式集热系统的实际应用中表现出的跟踪控

制性能明显优于传统的 MPC 和 SMC 方法[29]; Lu 等设计了稳态卡尔曼滤波 - 动态矩阵控制组合策略, 在控制算法上选择基于模型的矩阵控制理论实现预测控制, 同时对高频波动参数进行滤波处理, 实验结果表明该方法在集热场温度控制方面, 性能显著优于传统方法[30]; 丁坤等为光热发电集热系统设计了一种多模型加权预测控制器, 该控制器预测模型参数通过对光热电站发电数据模糊聚类得出, 经仿真对比发现多模型方法较单一模型有更好的控制精度[31]。

在控制算法优化层面, 也涌现出诸多亮眼成果。汤建方等科研人员经过大量实验, 验证了阶梯式预测控制应用于槽式聚光系统时, 相较于传统的 PID 控制, 不仅动态响应更为迅速, 系统稳定性也得到了大幅提升[32]; 张志勇等运用 K-means-RBF 神经网络构建温度预测模型, 为线性菲涅尔系统的熔盐温度预测难题提供了切实有效的解决方案[33]。

这些丰富多元的研究成果, 从不同角度为我国太阳能热利用系统的智能控制筑牢了坚实的理论根基, 提供了强有力的技术支撑, 推动着该领域不断向前发展。

4. 光热电站温度控制策略发展趋势

虽然光热电站集热系统控制技术已取得显著进展, 从传统 PID、简单自适应的算法逐步发展为融合智能算法、多参数耦合和实时预测优化的先进控制系统。然而, 随着我国能源结构向清洁无污染、高效多元化等新型体系的加速转型, 光热发电面向高精度、高参数、大容量的发展趋势也为集热温度控制策略甚至整个光热发电系统控制的发展带来了新的机遇。现有控制策略在高参数工况、多能协同优化和大范围变工况适应性等方面仍面临严峻挑战。特别是在高比例可再生能源并网背景下, 对光热电站的快速调频能力和运行灵活性提出了更高要求。基于当前技术瓶颈和发展需求, 未来光热电站温度控制将呈现向智能化、协同化和高可靠性的发展趋势。

4.1. 智能化

集热系统出口温度智能化控制在于将先进控制理论与人工智能技术相结合, 通过数据驱动和模型优化的方式实现控制系统的自主决策。

在光热电站温度控制中, 模型预测控制(MPC)作为智能化控制的基础理论, 目前已有相关研究。MPC 通过建立集热系统的动态数学模型, 基于当前状态和未来输入预测温度变化趋势, 并滚动优化控制指令, 使系统在满足约束条件的同时达到最优性能。此方法能够处理多变量耦合、大惯性延迟等非线性问题, 更适合光热电站这类具有强时变特性的系统, 在未来的发展趋势中, 多种人工智能技术与 MPC 的结合应用可为集热系统的温度控制带来更快的响应速度、更高精度的环境参数预测性能。

其次, 机器学习与数据驱动方法为智能化控制提供了自适应能力。通过深度神经网络、强化学习等算法, 控制系统可以从历史运行数据中学习最优控制策略, 并实时调整参数以适应辐照波动、云层遮挡等不确定因素。例如, 强化学习通过“状态 - 动作 - 奖励”的交互机制, 使控制器在长期运行中逐步优化温度调节策略, 通过优化聚光场调度和传热介质流量控制, 有效应对太阳辐照波动, 实现能效最大化。此外, 数字孪生技术可建立入射光、热力学及电气的高保真仿真模型, 将模型与传感器网络采集的实时数据融合, 更新孪生体状态, 可实现对集热系统运行工况的持续性预测, 此外也可以为控制策略的智能化决策提供虚拟的测试环境, 便于优化控制策略, 提高控制精度。

这些理论方法的综合应用, 使得光热电站温度控制系统能够实现从被动响应到主动预测、从局部优化到全局协同的跨越, 为电站的高效稳定运行提供了坚实的技术支撑。

4.2. 协同化

光热电站的协同控制代表了新一代太阳能热发电系统的智能化发展方向, 其核心在于实现全电站的

有机整合与动态优化。通过聚光集热系统、储热系统、发电系统三大系统的实时数据交互与协同决策,使得电站不仅能够有效应对太阳能固有的间歇性波动,更能主动参与电网调频,提升电力系统的灵活性,进一步实现“光热-光伏-风电”的协同发电性能。

从实现角度看,协同化控制融合了分布式优化、多智能系统等前沿理论,构建了“集中优化-分布执行”的新型控制架构。这种技术组合不仅解决了光热系统固有的非线性、大滞后等控制难题,更大幅提升了电站的经济性和可靠性。

随着可再生能源占比的持续提升,光热电站协同化控制的价值将进一步凸显。针对协同性控制的研究,可将控制系统框架模块化、标准化,这将进一步提高“风能-光能”大规模组合电网的扩充性,降低电网构建的成本。

4.3. 高可靠性

集热系统中集热工质的物性决定了整个系统的标准集热温度。近几年随着更多集热工质的研发,系统温度控制也将进一步得到发展。

面对中低温系统,传统控制策略即可在满足安全生产的条件下实现稳定跟踪控制,但高温熔盐(550℃)、超临界 CO₂ (700℃) 此类新型高温运行工质对光热电站运行参数的敏感度更高,为系统运行中高精度检测网络的性能提出更大挑战,传统控制策略面对高参数特性整体稳态偏差较大,动态响应较慢,同时受环境参数波动影响也更为明显。以高温熔盐线性菲涅尔式集热系统为例,其集热回路全长 1100 米,工质流速约束范围为 0.5~2.5 m/s,需要 9~36 分钟才能通过集热回路全程。当集热工况发生改变,流速发生较大波动时,系统的动态响应特性参数如时间常数、对象增益、纯滞后时间等具有显著的不确定性。在集热过程中,集热系统的峰值集热功率和最小稳态集热功率相差 6 倍,云遮时集热功率瞬间为零,太阳辐照等天象扰动对系统的冲击更加强烈,熔盐温度和温升速率波动超限的可能性大幅增加,熔盐物性、吸收涂层热稳定性、机械结构强度面临巨大的风险。因此,设计出能同时兼顾材料抗损、智能容错、快速响应、极端适用的可靠性出口温度控制策略也成为新的发展趋势。此类策略的有效实施能降低光热电站的停机时间,大幅提升光热电站集热温度,进而提高光热电站整体的发电效率。

5. 结束语

光热电站集热系统温度控制策略的发展正经历从传统调节向智能协同的深刻变革,随着新型传热介质、智能算法、高精度传感等技术的突破,温度控制已不再局限于单一系统的优化,而是向着光-储-电协同、多能互补、数字孪生等系统级控制演进。未来,随着可再生能源占比的提升和新型电力系统的构建,光热电站温度控制将进一步向自主决策、广域协同和极端环境适应的方向发展,不仅为光热发电的经济性提升提供技术支撑,更将为全球能源转型贡献重要力量。这一研究领域的持续创新,必将推动光热技术成为未来低碳能源体系的关键组成部分。

参考文献

- [1] Jahangiri, S., Alhamzawi, A., Esfajani, P., *et al.* (2024) Impact of Double-Axis Tracking on Thermal Performance of the Linear Fresnel Collector: An experimental Study. *Solar Energy*, **272**, Article 112483. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112483>
- [2] Boerema, N., Morrison, G., Taylor, R. and Rosengarten, G. (2013) High Temperature Solar Thermal Central-Receiver Bill-board Design. *Solar Energy*, **97**, 356-368. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.008>
- [3] Carotenuto, L., La Cava, M., Muraca, P., *et al.* (1986) Feedforward Control for the Distributed Parameter Model of a Solar Power Plant. *Large Scale Systems*, **11**, 233-241.
- [4] Contreras, R.C. (1986) Análisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento

- en un eje. Ph.D. Thesis, Universidad de Sevilla.
- [5] Camacho, E.F., Rubio, F.R. and Hughes, F.M. (1992) Self-Tuning Control of a Solar Power Plant with a Distributed Collector Field. *IEEE Control Systems Magazine*, **12**, 72-78. <https://doi.org/10.1109/37.126858>
 - [6] Camacho, E.F., Berenguel, M. and Rubio, F.R. (1994) Application of a Gain Scheduling Generalized Predictive Controller to a Solar Power Plant. *Control Engineering Practice*, **2**, 227-238. [https://doi.org/10.1016/0967-0661\(94\)90202-x](https://doi.org/10.1016/0967-0661(94)90202-x)
 - [7] Camacho, E.F., Berenguel, M. and Bordons, C. (1994) Adaptive Generalized Predictive Control of a Distributed Collector Field. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **2**, 462-467. <https://doi.org/10.1109/87.338667>
 - [8] Meaburn, A. and Hughes, F.M. (1994) Prescheduled Adaptive Control Scheme for Resonance Cancellation of a Distributed Solar Collector Field. *Solar Energy*, **52**, 155-166. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0038-092x(94)90065-5)
 - [9] Henriques, J., Cardoso, A. and Dourado, A. (1999) Supervision and C-Means Clustering of PID Controllers for a Solar Power Plant. *International Journal of Approximate Reasoning*, **22**, 73-91. [https://doi.org/10.1016/s0888-613x\(99\)00017-1](https://doi.org/10.1016/s0888-613x(99)00017-1)
 - [10] Pickhardt, R. (2000) Nonlinear Modelling and Adaptive Predictive Control of a Solar Power Plant. *Control Engineering Practice*, **8**, 937-947. [https://doi.org/10.1016/s0967-0661\(00\)00009-5](https://doi.org/10.1016/s0967-0661(00)00009-5)
 - [11] Johansen, T.A. and Storaas, C. (2002) Energy-Based Control of a Distributed Solar Collector Field. *Automatica*, **38**, 1191-1199. [https://doi.org/10.1016/s0005-1098\(02\)00008-0](https://doi.org/10.1016/s0005-1098(02)00008-0)
 - [12] Barão, M., Lemos, J.M. and Silva, R.N. (2002) Reduced Complexity Adaptive Nonlinear Control of a Distributed Collector Solar Field. *Journal of Process Control*, **12**, 131-141. [https://doi.org/10.1016/s0959-1524\(01\)00003-8](https://doi.org/10.1016/s0959-1524(01)00003-8)
 - [13] Luk, P.C.K., Low, K.C. and Sayiah, A. (1999) GA-Based Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant Using Distributed Collector Fields. *Renewable Energy*, **16**, 765-768. [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(98\)00275-4](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(98)00275-4)
 - [14] Henriques, J., Gil, P., Cardoso, A. and Dourado, A. (2002) Scheduling of PID Controllers by Means of a Neural Network with Application to a Solar Power Plant. *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks*, Honolulu, 12-17 May 2002, 311-316.
 - [15] Henriques, J., Gil, P., Cardoso, A., Carvalho, P. and Dourado, A. (2010) Adaptive Neural Output Regulation Control of a Solar Power Plant. *Control Engineering Practice*, **18**, 1183-1196. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.06.001>
 - [16] Gallego, A.J., Fele, F., Camacho, E.F. and Yebra, L. (2013) Observer-Based Model Predictive Control of a Parabolic-Trough Field. *Solar Energy*, **97**, 426-435. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.002>
 - [17] Juuso, E.K. and Yebra, L.J. (2014) Smart Adaptive Control of a Solar Collector Field. *IFAC Proceedings Volumes*, **47**, 2564-2569. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.02759>
 - [18] Karamali, M. and Khodabandeh, M. (2017) A Distributed Solar Collector Field Temperature Profile Control and Estimation Using Inlet Oil Temperature and Radiation Estimates Based on Iterative Extended Kalman Filter. *Renewable Energy*, **101**, 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.049>
 - [19] Alsharkawi, A. and Rossiter, J.A. (2017) Towards an Improved Gain Scheduling Predictive Control Strategy for a Solar Thermal Power Plant. *IET Control Theory & Applications*, **11**, 1938-1947. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.1319>
 - [20] Camacho, E.F., Gallego, A.J., Sanchez, A.J. and Berenguel, M. (2018) Incremental State-Space Model Predictive Control of a Fresnel Solar Collector Field. *Energies*, **12**, Article 3. <https://doi.org/10.3390/en12010003>
 - [21] Sánchez, A.J., Gallego, A.J., Escaño, J.M. and Camacho, E.F. (2019) Adaptive Incremental State Space MPC for Collector Defocusing of a Parabolic Trough Plant. *Solar Energy*, **184**, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.094>
 - [22] Frejo, J.R.D. and Camacho, E.F. (2020) Centralized and Distributed Model Predictive Control for the Maximization of the Thermal Power of Solar Parabolic-Trough Plants. *Solar Energy*, **204**, 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.033>
 - [23] Ruiz-Moreno, S., Frejo, J.R.D. and Camacho, E.F. (2021) Model Predictive Control Based on Deep Learning for Solar Parabolic-Trough Plants. *Renewable Energy*, **180**, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.058>
 - [24] Tang, K.S., Man, K.F. and Chen, G. (2000) Solar Plant Control Using Genetic Fuzzy PID Controller. *Proceedings of the 2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nagoya, 22-28 October 2000, 1686-1691.
 - [25] 郭苏, 刘德有, 张耀明, 等. 循环模式 DSG 槽式太阳能集热器出口蒸汽温度控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 62-68+140.
 - [26] 潘楚芸, 刘涵. 塔式太阳能聚热发电换热系统过热蒸汽温度多模型预测控制[J]. 中国科技论文, 2015, 10(8): 952-956.
 - [27] 耿直, 顾煜炯, 余裕璞, 等. 槽式太阳能热发电储热系统控制策略研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(10): 32-37.
 - [28] 徐蕙, 李鑫, 徐二树. 槽式太阳能集热场温度控制研究[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 83-91.
 - [29] Lu, X., Sun, P. and Fan, D. (2023) Application of Sliding Mode Predictive Control in Solar Thermal Power Generation Collector Subsystem. *Journal of Applied Science and Engineering*, **26**, 1481-1489.

-
- [30] Lu, X. and Liang, Z. (2021) Application of Model Predictive Control Based on Kalman Filter in Solar Collector Field of Solar Thermal Power Generation. *Energy Engineering*, **118**, 1171-1183. <https://doi.org/10.32604/ee.2021.014724>
- [31] 丁坤, 孙亚璐, 杨昌海, 等. 太阳能热发电系统多模型加权预测控制研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(6): 43-49.
- [32] 汤建方, 董军, 梁璐, 等. 基于阶梯式预测控制的槽式太阳能集热场温度控制研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 181-189.
- [33] 张志勇, 路小娟, 孔令刚, 等. K-means 结合 RBF 神经网络预测线性菲涅尔集热回路出口熔盐温度[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 213-222.