熔盐储能系统优化设计及效率提升策略

张旭 贾浩然 赵志贺

济宁华源热电有限公司 山东 济宁 272000

摘要: 在全球能源清洁化、低碳化转型背景下,熔盐储能系统因具备高储能密度、长使用寿命等优势,成为能源领域研究热点。但问题是,其实际运行存在热量损失大、响应有限等问题。基于此,本文围绕熔盐储能系统,深入剖析其工作原理、系统构成与优势,提出系统结构、热管理、控制系统等优化设计策略,从新型熔盐材料研发、系统集成协同、运行维护策略优化等方面探讨效率提升路径。研究表明,多维度优化可有效改善系统性能,但目前仍面临技术、经济、安全与环保等挑战。未来需持续加大研发投入,强化产学研合作,完善政策支持,推动熔盐储能系统实现大规模推广应用,助力全球能源转型与可持续发展。

关键词: 熔盐; 储能系统优化设计; 效率提升

引言: 伴随着全球能源结构加速向清洁化、低碳化转型,可再生能源发展迅猛。但太阳能、风能等可再生能源具有间歇性和波动性特点,严重影响能源供应的稳定性与可靠性。储能技术作为解决能源供需时间不匹配、提升能源利用效率的关键手段,成为能源领域研究热点。熔盐储能系统凭借高储能密度、长储热时间、长使用寿命、成本优势及环保特性,在太阳能光热发电、火电灵活性改造、电网调峰、工业余热回收等众多领域展现出巨大应用潜力。然而,目前熔盐储能系统在实际运行中存在热量损失大、响应速度有限、设备腐蚀等问题,限制了其性能提升与大规模推广。因此,开展熔盐储能系统优化设计及效率提升策略研究,对推动能源可持续发展、实现“双碳”目标具有重要现实意义。

1 熔盐储能系统概述

1.1 工作原理

熔盐储能系统的运行基于熔盐独特的热物理性质。熔盐一般由多种无机盐混合而成,常温下呈固态,当吸收外部热量达到熔点后转变为液态。在储能阶段,外部热源如太阳能集热器、工业余热装置或电网低谷电转化的热能,将热量传递给熔盐^[1]。熔盐温度升高,以显热和部分潜热形式储存大量能量,高温熔盐被存储于高温储罐。而在释能阶段,高温熔盐通过热交换器,将热量传递给发电或供热系统的工作介质,如将水加热成蒸汽驱动汽轮机发电,自身温度降低后回流至低温储罐,如此循环往复,实现能量的存储与释放,有效调节能源供需在时间上的不平衡。

1.2 系统构成

熔盐储能系统主要由储热单元、换热单元、输送单元和控制系统四部分构成。首先,储热单元包括高温熔

盐储罐和低温熔盐储罐,是储存熔盐的核心设备。其中,储罐需具备良好保温性能和耐腐蚀能力,常采用多层保温材料包裹,如陶瓷纤维、气凝胶等,并选用耐腐蚀材料制造。其次,换热单元的核心是热交换器,负责熔盐与外部热源或需热设备间的热量传递,其性能直接决定着系统换热效率,常见类型有管壳式、板式、螺旋式等。此外,输送单元由熔盐泵、管道及阀门组成,熔盐泵需耐高温、耐腐蚀,确保熔盐稳定输送;管道要做好保温和防腐处理;阀门用于控制熔盐流量和流向。最后,控制系统通过传感器采集温度、压力、流量等参数,经控制器分析处理后,调节各设备运行,保障系统稳定高效运行。

1.3 优势分析

熔盐储能系统具有多方面显著优势。其中,高储能密度使其在有限空间内可储存大量能量,相比其他储能方式,能有效减少设备占地面积。长储热时间特性,通过合理设计储热罐容量,可满足长时间能量需求,尤其是在太阳能光热发电中,能保障电站夜间或阴天持续供电。其使用寿命长,基于显热储能原理,运行中无复杂化学变化,设备和材料磨损小,正常维护下使用寿命可达30年以上。成本方面,熔盐材料来源广泛、价格低廉,且系统结构相对简单,大幅度降低了设备制造和维护成本。除此之外,该系统运行无污染、零排放,无爆炸或火灾危险,对环境友好,符合可持续发展要求,适用于多种场景。

2 熔盐储能系统优化设计策略

2.1 系统结构优化

储罐结构优化对提升熔盐储能系统性能至关重要。一是在形状设计上,球形储罐因具有最小的表面积与体

积比,相比传统圆柱形储罐,能有效减少热量散失面积,降低热损失。并且,内部采用分层存储设计,利用熔盐不同温度下密度差异,设置隔板或导流装置,使高温熔盐在上、低温熔盐在下,减少混合,最终降低热扩散损失^[2]。二是换热网络优化需合理选型与布局热交换器,根据系统热负荷、介质流量及温度变化,选择合适类型。对于小温差、大流量场景,板式热交换器效率高;高温高压且耐腐蚀要求高时,管壳式热交换器更合适。还可采用多级换热设计,实现热量梯级利用,提高能源利用率。三是管道系统优化要综合考虑管径与流速,通过建立模型,选择经济流速下的管径,降低泵功耗和管道磨损;合理规划布局,减少管件数量,降低局部阻力损失,进而确保熔盐输送高效稳定。

2.2 热管理优化

热管理优化是减少熔盐储能系统热量损失、提高效率的关键所在。在保温材料选择上,陶瓷纤维、气凝胶等高性能材料因具有低热导率、高耐火度等特性,成为首选。另一方面,需优化保温结构设计,根据设备和管道形状、温度确定保温层厚度和层数,复杂管件采用定制结构,外部设置防水防潮层,防止水分侵入影响保温性能。而针对热量回收与利用方面,可设置余热回收装置,回收热交换器排出的低温工作介质余热及管道散热,重新用于预热等环节。还可在系统内实现热量梯级利用,按照不同用热环节温度需求,合理安排熔盐热量使用顺序,提高能源综合利用率。

2.3 控制系统优化

控制系统优化对熔盐储能系统稳定高效运行意义重大。智能控制算法应用方面,模型预测控制(MPC)基于系统数学模型,预测未来输出,优化控制输入,在应对电网负荷变化时,可提前调整熔盐循环流量和加热功率,提高系统响应速度和电能质量。而神经网络控制利用其强大的非线性映射和自学习能力,建立系统输入输出复杂关系模型,通过数据训练准确输出控制指令,提升系统运行性能。另外,分布式控制系统(DCS)优化需升级系统架构,提高数据处理和传输能力,实现各子系统间高效通信与协同工作。此过程中,需要注意的是,采用模块化设计,便于系统扩展和维护,同时加强网络安全防护,保障系统稳定运行,以提升整体控制水平。

3 熔盐储能系统效率提升策略

3.1 新型熔盐材料研发与应用

新型熔盐材料的研发是突破传统材料性能瓶颈的核心方向。现有熔盐材料在高温下易发生分解、相变不稳定等问题,限制了系统的工作温度区间和能量密度^[3]。研

发工作首先聚焦于拓宽熔盐材料的使用温度范围,通过引入多元复合组分,改变材料的晶体结构和分子间作用力,提升其在高温下的稳定性和低温下的流动性。拓宽温度区间可显著增大储能温差,使系统在相同体积下储存更多能量,直接提升储能密度。

与此同时,降低熔盐熔点是另一重要研发目标。较低的熔点意味着系统启动时无需消耗过多能量将固态熔盐转化为液态,可缩短启动时间,减少不必要的能量损耗。研究人员通过筛选不同阴离子和阳离子组合,开发新型低熔点熔盐配方。

并且,改善熔盐的热物理性能是提升传热效率的关键。通过添加高导热性纳米颗粒或优化材料分子排列,提高熔盐的导热系数,加快热量传递速度。增强比热容可使单位质量的熔盐携带更多热量,以提升储能和释能过程的能量转换效率。在研发过程中,借助分子动力学模拟和量子化学计算,从微观层面分析材料结构与热物理性能的关系,指导配方设计和优化。

另外,化学稳定性和抗腐蚀性是决定熔盐材料使用寿命的关键因素。在高温、高盐环境下,熔盐材料易与设备材料发生化学反应,导致设备腐蚀损坏。新型熔盐材料通过调整化学成分和添加缓蚀剂,增强材料的化学稳定性,抑制与金属、陶瓷等设备材料的化学反应。研发人员还应用表面改性技术,在设备表面形成耐腐蚀涂层,进一步提升设备的抗腐蚀能力,延长设备使用寿命,降低长期维护成本。

最后,新型熔盐材料的研发需经历严谨的实验研究和理论分析过程。在实验室中,利用热重分析、差示扫描量热等技术,测试材料的热稳定性、相变特性等性能参数。利用X射线衍射、扫描电镜等手段,分析材料的微观结构和成分分布。基于实验数据,结合分子动力学模拟和热力学计算,建立材料性能预测模型,指导配方优化。经过实验室验证后,在中试平台和实际系统中进行测试,评估材料在真实工况下的性能表现,逐步实现从实验室研发到工程应用的转化。

3.2 系统集成与协同优化

3.2.1 在与太阳能光热发电系统集成时,面临着太阳辐照强度不稳定、昼夜温差大等挑战。优化太阳能集热器与熔盐储能系统的匹配,需建立太阳辐照强度预测模型,结合天气预报和历史数据,提前预测太阳辐照变化趋势。根据预测结果,实时调整熔盐流量和温度,在太阳辐照充足时加大熔盐循环量,充分吸收太阳能;在辐照不足时,合理控制熔盐温度,保证储能系统稳定运行,提高太阳能利用率。

3.2.2 与火电系统耦合时,熔盐储能系统可实现热电解耦。传统火电机组受限于最小技术出力 and 爬坡速率,难以快速响应电网负荷变化。熔盐储能系统通过在电网负荷低谷时储存热量,在负荷高峰时释放热量,帮助火电机组摆脱对蒸汽参数的依赖,实现灵活调峰。优化耦合过程需建立火电-熔盐储能联合运行模型,分析不同工况下的能量流动和转换关系,确定最佳的储热、释热策略,使火电机组在满足电网调度要求的同时,提高能源利用效率。

3.2.3 在熔盐储能系统内部,各单元的协同工作不可忽视。储热单元、换热单元和输送单元的性能相互关联,任何一个单元的效率低下都会影响整个系统的运行。为此,应建立统一的控制系统,整合各单元的运行数据和控制信号,实现信息共享和协同控制。采取先进的控制算法,如模型预测控制、智能优化控制,根据系统实时运行状态和能量需求,动态调整各单元的工作参数。

3.2.4 系统集成与协同优化还需考虑与其他能源系统和电网的交互。在微电网和分布式能源系统中,熔盐储能系统需与风电、光伏、储能电池等多种能源协同运行,实现能量的互补和优化配置。与大电网连接时,需满足电网的安全稳定运行要求,参与电网的调频、调压等辅助服务。通过建立多能源协同运行模型和电网互动模型,分析不同场景下的能量流动和控制策略,实现熔盐储能系统与外部系统的高效协同,提升整体能源系统的运行效率和稳定性。

3.3 运行维护策略优化

3.3.1 制定运行操作规程

制定运行操作规程需结合系统设计参数、设备特性和实际运行经验,明确各设备启动、停止、切换等操作流程和参数设置^[4]。操作规程应涵盖正常运行、异常工况和紧急情况处理等多种场景,确保操作人员在任何情况下都能规范操作,避免因操作不当导致系统故障或效率下降。并且,定期对操作规程进行修订和完善,根据设备更新、技术升级和运行经验反馈,优化操作流程和参数设置。

3.3.2 建立完善的设备监测体系

建立完善的设备监测体系是实现预知性维护的关

键。在系统关键部位安装温度、压力、流量、振动等传感器,实时采集设备运行数据。在此基础上,利用物联网和大数据技术,将采集的数据传输至监控中心,通过数据分析和处理,实现设备运行状态的实时监测和故障预警。当监测到设备异常时,及时发出预警信号,并提供故障诊断和处理建议,指导运维人员采取相应措施。

3.3.3 定期维护保养

定期维护保养是保持设备性能的重要措施。针对熔盐泵,制定详细的检修计划,定期检查泵的密封性能、轴承磨损情况和电机运行状态,及时更换磨损部件,保证泵的正常运转。热交换器容易因熔盐结垢和腐蚀导致换热效率下降,需定期进行清洗和防腐处理。采用化学清洗、机械清洗等方法去除结垢,通过表面涂层、缓蚀剂添加等措施防止腐蚀。并且,对熔盐储罐进行定期检查,包括罐体结构完整性、保温性能和防泄漏措施,确保储罐安全可靠运行。

结语:熔盐储能系统作为一种极具潜力的储能技术,在能源领域发挥着重要作用。通过对其优化设计及效率提升策略的研究可知,从系统结构、热管理、控制系统等方面进行优化,研发新型熔盐材料,加强系统集成与协同,优化运行维护策略,可有效提升系统性能和效率。未来,随着技术创新持续推进、应用领域不断拓展和产业协同发展加强,熔盐储能系统有望克服现有难题,实现大规模推广应用,为全球能源转型和可持续发展做出更大贡献。因此,应加大研发投入,加强产学研合作,完善政策支持,推动熔盐储能系统不断发展进步。

参考文献

- [1]左芳菲,韩伟,姚明宇.熔盐储能在新型电力系统中应用现状与发展趋势[J].热力发电,2023,52(2):1-9
- [2]马汀山,王伟,王东晔,等.基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J].热力发电,2023,52(7):113-118.
- [3]罗海华,沈强,林俊光,等.新型低熔点混合熔盐储热材料的开发[J].储能科学与技术,2020,9(6):1755-1759.
- [4]王汶海,管丹丹,金富强等.塔式光热发电熔盐储换热及汽轮机热力系统研究[J].中国新技术新产品,2023(04):54-56.