

储能系统的热管理技术与安全性评估研究

焦海云 罗 伟

宁夏国储新能源科技有限公司 宁夏 银川 750002

摘 要：储能系统作为能源存储与转换的核心环节，其热管理技术与安全性评估对系统性能、寿命及可靠性至关重要。空气冷却、液体冷却、相变材料及热管等热管理技术通过不同传热机制实现温度调控，有效缓解电池热失控风险。安全性评估则从热失控、温度一致性、系统可靠性及标准规范等维度，构建起全面的风险防控体系。深入研究这些技术与评估方法，可为储能系统优化设计提供理论支撑，助力推动储能行业安全、高效发展。

关键词：储能系统；热管理技术；安全性评估

引言

随着全球能源结构向可再生能源转型，储能系统成为解决间歇性电源波动问题的关键。然而，储能系统运行过程中产生的热量积累易引发热失控等安全隐患，严重制约其应用与发展。因此，热管理技术与安全性评估研究成为行业关注焦点。本文系统梳理空气冷却、液体冷却等主流热管理技术的工作原理与应用特点，深入探讨热失控风险、温度一致性等安全性评估维度，旨在为储能系统的安全高效运行提供理论依据与技术参考。

1 储能系统概述

储能系统作为现代能源体系的关键组成部分，通过能量的存储与释放实现对能源的时空调节，有效解决可再生能源间歇性、波动性与用户侧用能连续性需求间的矛盾。其核心架构涵盖能量存储单元、能量转换系统、电池管理系统（BMS）及监控调度平台，各模块协同运作保障储能系统安全高效运行。从技术类型划分，电化学储能凭借响应速度快、转换效率高、环境适应性强的优势，在锂电池、钠电池等新型材料推动下，成为当前应用最广泛的储能形式；机械储能中的抽水蓄能因规模大、成本低、寿命长，仍是全球储能装机容量占比最高的技术；压缩空气储能、飞轮储能等凭借独特的物理储能原理，在特定场景中发挥着不可替代的作用。在运行机制层面，储能系统通过双向变流器实现电能与化学能、势能等能量形态的动态转换。充电阶段，电网或可再生能源发电装置输出的电能经变流器转化为适合存储的形式；放电时，储能介质释放能量并通过变流设备逆变为符合电网标准的交流电。电池管理系统实时监测电池组的电压、温度、荷电状态（SOC），通过均衡控制、热管理等技术手段，确保储能单元在安全区间内运行，延长设备使用寿命。在能源网络中，储能系统具备多重应用价值。于发电侧，可平滑风光电站功率输出，

提升新能源消纳能力；在电网侧，通过调峰调频、备用容量储备等功能优化电力资源配置，增强电网稳定性；在用户侧，储能系统实现峰谷电价套利、提升供电可靠性，为工商业及居民用户提供灵活的用能解决方案。随着能源转型的深入推进，储能技术将持续向高能量密度、长循环寿命、低成本方向发展，成为构建新型电力系统的核心支撑。

2 储能系统的热管理技术

2.1 空气冷却技术

空气冷却技术基于对流换热原理，通过空气与储能系统发热部件表面的接触，将热量带走实现温度调控。该技术利用风机或自然对流驱动空气流动，形成强制对流或自然对流散热机制。强制对流方式下，风机产生的气流可精准控制流速与流量，有效提升散热效率，在锂离子电池储能系统中，能够将电池组表面温度维持在合理区间，保障电池性能稳定。自然对流则依靠空气密度差驱动，无需额外动力设备，结构简单且无噪音，适用于对散热需求不高、空间有限的小型储能装置。空气冷却技术具备显著的成本优势与维护便捷性。其设备组成主要为风机、风道及散热片，相较其他冷却技术，系统结构简单，安装与维护成本低。然而，空气的热导率较低，仅为 $0.026\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右，导致其散热效率相对有限。在高功率密度储能系统中，空气冷却难以满足快速散热需求，容易造成局部温度过高，引发电池组温度不均，进而影响储能系统整体性能与使用寿命。该技术多应用于对成本敏感、散热要求不苛刻的低功率储能场景，如小型分布式储能电站、家用储能设备等^[1]。

2.2 液体冷却技术

液体冷却技术以冷却液为媒介，凭借其较高的比热容和热导率实现高效散热。常用冷却液包括水、乙二醇水溶液等，通过循环管路与储能系统发热部件紧密接

触,吸收热量后经换热器将热量散发至外界环境。在锂离子电池储能系统中,液体冷却可采用直接冷却或间接冷却方式。直接冷却将电池浸没于绝缘冷却液中,实现全方位高效散热,但对冷却液的绝缘性与化学稳定性要求极高;间接冷却则通过冷却板与电池表面贴合,冷却液在冷却板内循环,这种方式安全性高,在大规模储能电站中应用广泛。相较于空气冷却,液体冷却技术散热效率提升显著,水的比热容高达 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,热导率约 $0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,能够快速带走大量热量,有效控制储能系统温度波动,确保电池组温度均匀性。然而,该技术系统结构复杂,涉及循环泵、换热器、密封管路等部件,成本较高,且存在冷却液泄漏风险,一旦发生泄漏可能腐蚀设备、影响系统安全运行。冷却液的维护与更换也增加了运行成本。尽管如此,液体冷却技术凭借其出色的散热性能,仍是高功率、大容量储能系统热管理的主流技术之一。

2.3 相变材料(PCM)技术

相变材料(PCM)技术利用材料在固-液相变过程中吸收或释放大潜热的特性实现热量存储与调控。当储能系统温度升高时,PCM吸收热量由固态转变为液态,储存大量热能;温度降低时,PCM由液态变回固态,释放储存的热量,从而维持系统温度稳定。常见的PCM包括石蜡类、水合盐类、脂肪酸类等,不同材料具有不同的相变温度与潜热特性,可根据储能系统实际需求进行选择。PCM技术具备被动式散热、无运动部件、运行安静等优势,能够在无需外部能源输入的情况下,实现对储能系统温度的有效控制,尤其适用于对噪音敏感、空间紧凑的应用场景。PCM可与其他冷却技术结合使用,如与空气冷却或液体冷却集成,形成复合热管理系统,进一步提升散热性能。但PCM的导热系数普遍较低,限制了其热量传递效率,通常需要添加高导热材料(如金属纳米颗粒、碳纤维等)制备复合PCM,以改善导热性能。PCM在长期使用过程中可能出现过冷、相分离等问题,影响其热管理效果与使用寿命,需通过技术手段加以解决^[2]。

2.4 热管技术

热管技术基于相变传热原理,通过工质在蒸发段吸收热量汽化,蒸汽在压差作用下流向冷凝段释放热量液化,液态工质再依靠毛细力或重力回流至蒸发段,形成循环传热过程。热管由管壳、吸液芯和工质组成,具有极高的导热性能,其有效导热系数可达金属铜的数百倍甚至上千倍,能够快速将热量从高温区域传递至低温区域。在储能系统热管理中,热管可实现高效的热量传递

与均温控制。将热管布置于电池组之间或与电池表面紧密贴合,能够迅速将电池产生的热量传递至散热端,有效降低电池组温度梯度,提升温度均匀性。热管技术无需外部动力驱动,运行可靠、维护成本低,且具有良好的等温性,可在极小温差下实现大量热量传输。然而,热管的性能受工作温度、倾斜角度、工质填充率等因素影响较大,在实际应用中需要根据储能系统的具体工况进行优化设计。热管制造工艺要求较高,成本相对较高,限制了其大规模应用。尽管如此,热管技术凭借其优异的传热性能,在高功率密度储能系统热管理领域具有广阔的应用前景。

3 储能系统的安全性评估

3.1 热失控风险评估

热失控是储能系统面临的核心安全威胁,其本质是电池内部产热速率远超散热速率,引发链式反应致使温度急剧攀升。在锂离子电池体系中,负极与电解质的副反应、隔膜热收缩导致的内短路等均为热失控诱因。通过量热测试可精准获取电池在过充、过热等工况下的产热参数,结合差示扫描量热法(DSC)与加速绝热量热法(ARC),能够量化反应起始温度、反应焓变等关键指标,为热失控临界条件的判定提供数据支撑。构建多物理场耦合的热失控仿真模型是评估风险的重要手段。借助计算流体力学(CFD)与电化学-热耦合模型,可模拟热失控在电池模组、电池簇间的蔓延路径。模型需考虑电池材料特性、环境对流换热系数等参数,通过敏感性分析确定影响热失控传播速度的关键因素,如电池间距、导热材料热导率等,为系统布局优化提供参考。实验验证环节中,全尺寸滥用测试不可或缺。在封闭实验舱内对电池模组施加针刺、挤压等极端条件,实时监测温度、电压、气体成分等参数变化。通过对比不同电池管理策略下的热失控表现,评估预警系统响应时间与灭火装置有效性,从而建立基于实验数据的热失控风险评估准则,指导储能系统的安全设计与运行。

3.2 温度一致性评估

储能系统内电池单体的温度一致性直接影响系统性能与寿命。由于电池充放电过程的非线性产热特性,加之模组内气流分布不均、导热路径差异,易导致电池间出现显著温差。采用红外热成像技术可对电池表面温度场进行非接触式测量,捕捉局部热点;配合热电偶阵列对电池核心区域测温,能够构建三维温度分布模型,实现对温度梯度的精确量化。热仿真分析是优化温度一致性的重要工具。基于有限元方法(FEM)建立电池模组热模型,输入材料热物性参数与边界条件,模拟不同工

况下的传热过程。通过调整散热结构设计,如优化冷却管道布局、改进导热界面材料,降低模组内最大温差。研究环境风速、冷却液流速等参数对温度分布的影响规律,为热管理系统参数匹配提供依据。在实际运行评估中,需采集长时间、多工况下的温度数据。通过统计学方法分析电池温度的离散程度,计算标准差、变异系数等指标评估温度一致性水平。结合电池老化模型,研究温度差异对电池容量衰减的影响机制,制定温度一致性优化方案,确保储能系统在全生命周期内维持稳定运行状态^[3]。

3.3 热管理系统可靠性评估

热管理系统的可靠性决定了储能系统在复杂工况下的热稳定性。风冷系统的可靠性评估聚焦风机寿命、风道堵塞风险,通过加速老化实验模拟风机在高转速、长时间运行下的性能衰减,采用粒子图像测速(PIV)技术分析风道内气流分布均匀性。液冷系统则着重评估冷却液泄漏、管路腐蚀问题,利用压力测试与电导率监测技术,检测密封结构完整性与冷却液纯度变化。故障树分析(FTA)是评估热管理系统可靠性的有效方法。以系统过热故障为顶事件,逐层分解至传感器失效、控制器误判、执行器卡滞等基本事件,计算各事件发生概率与故障树最小割集。结合蒙特卡洛模拟,量化不同故障组合对系统性能的影响程度,识别可靠性薄弱环节,为冗余设计与备件储备提供指导。实际运行可靠性验证需开展长时间的耐久性测试。在高低温、高湿度等极端环境下,连续监测热管理系统的温控精度、能耗效率等指标,记录故障发生频率与类型。通过失效模式与效应分析(FMEA),评估故障对储能系统安全性与经济性的影响,优化维护策略,提升热管理系统的全寿命周期可靠性。

3.4 安全性标准与规范

储能系统安全性标准与规范是保障其安全运行的技术基石。在热失控防护领域,需建立涵盖电池材料阻燃性、热失控预警阈值、灭火装置响应时间等指标的技术要求。通过对电池热失控过程的深入研究,制定不同容

量、类型电池的安全设计准则,明确电池舱体隔热材料性能参数与泄压通道设计规范,降低热失控扩散风险。温度一致性相关标准应规定储能系统内允许的最大温差范围,以及不同工况下的温度波动限值。针对电池模组、电池簇等不同层级,制定温度监测点布置原则与数据采集频率要求。结合电池热特性研究成果,建立温度一致性与电池寿命、性能的量化关系模型,为系统设计与验收提供科学依据。热管理系统标准需明确风冷、液冷等不同技术路线的性能指标,如冷却效率、能耗比、噪音限值等。规范系统部件的接口标准与通信协议,确保各组件间的兼容性与协同性。制定热管理系统可靠性测试方法与评估流程,包括老化测试周期、故障模拟场景等,促进热管理技术的标准化与规范化发展,保障储能系统安全可靠运行^[4]。

结语

综上所述,热管理技术与安全性评估是保障储能系统稳定运行的重要环节。本文分析的多种热管理技术各有优劣,需结合实际应用场景合理选择;安全性评估体系的构建,则为储能系统风险防控提供了科学依据。未来,随着储能技术向高能量密度方向发展,热管理与安全性研究仍需持续深入,通过技术创新与标准完善,进一步提升储能系统的安全性与可靠性。

参考文献

- [1]李程.电化学储能系统热管理技术研究现状与展望[J].电力设备管理,2023(16):237-240.
- [2]王凯明,白生军,王燕,等.电化学储能系统热管理技术研究进展[J].合成润滑材料,2024,51(2):40-44.
- [3]段江曼,阮白水.新型电力系统中基于储能技术的能源安全性分析与评估方法研究[J].电脑校园,2024(9):1147-1149.
- [4]胡振恺,雷博,李勇琦,等.储能用锂离子电池安全性测试与评估方法比较[J].储能科学与技术,2022,11(5):1650-1656.