

电力储能系统热效率提升与节能效果评价研究

张志远

中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司, 河北 秦皇岛 066000

[摘要] 电力储能技术是提高电力系统运行效率、安全性、经济性和可再生能源的利用率的关键技术。文中从锂离子电池储能的材料热性能、设备结构设计及运行环境三个维度分析了影响储能热效率的主要因素, 系统论述了高导热储能材料优化、热管理技术优化、结构设计优化、智能温控监测以及充放电策略优化等提升热效率的关键技术, 并围绕评价指标体系构建、热效率评价、能耗评价、经济性评价和环境效益评价等方面研究了电池储能系统节能效果的综合评价方法。本评价方法对材料、技术、结构、策略等优化方法进行多维度协同优化组合, 以达到在储能热效率最大化的条件下同时最大程度降低投资。该评价方法是衡量锂离子电池储能节能效果、指导技术优化的有力工具。

[关键词] 电力储能; 储能热效率; 热管理技术; 节能评价方法

DOI: 10.33142/hst.v9i8.20442

中图分类号: TM911.1

文献标识码: A

Research on Enhancing Thermal Efficiency and Evaluating Energy-saving Effects in Power Energy Storage Systems

ZHANG Zhiyuan

SHEN KAN Qinhuangdao general engineering design& research institute corporation, MCC, Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract: Power energy storage technology is a key technology for improving the operational efficiency, safety, economic performance, and renewable energy utilization of power systems. This paper analyzes the main factors affecting thermal efficiency from three dimensions: material thermal properties of lithium-ion battery energy storage, equipment structural design, and operating environment. It systematically discusses key technologies for enhancing thermal efficiency, including high-conductivity energy storage material optimization, thermal management technology optimization, structural design optimization, intelligent temperature control monitoring, and charging/discharging strategy optimization. Additionally, it studies comprehensive evaluation methods for the energy-saving effects of battery energy storage systems, focusing on the construction of evaluation indicators, thermal efficiency assessment, energy consumption evaluation, economic performance evaluation, and environmental benefit evaluation. This evaluation method achieves multidimensional collaborative optimization of material, technology, structural, and strategic approaches to maximize thermal efficiency while minimizing investment costs. It serves as a robust tool for assessing the energy-saving effects of lithium-ion battery energy storage and guiding technological optimization.

Keywords: power energy storage; thermal efficiency of energy storage; thermal management technology; energy-saving evaluation methods

引言

伴随着可再生能源渗透率不断上升以及新型电力系统创建的不断深入, 电力储能技术对于解决能源供需时空上的矛盾, 提高电网的灵活性、稳定性发挥重要的作用。随着锂离子电池技术的逐步成熟, 其相对较快的响应速度和可观的容量已经广泛应用于可再生能源发电系统中。但是锂离子电池储能系统在充放电循环过程中不可避免地会产生热量的积累, 如果散热不好就会造成系统温度上升、

热分布不均, 不但会降低能量转换效率, 还会引起热失控等安全问题。因此对锂离子电池储能系统热效率影响因素和提高技术途径进行梳理, 建立完整的节能效果评价体系, 为电池储能系统热设计优化、运行管理提供理论依据。

1 储能系统热效率影响因素分析

1.1 储能材料热性能影响

锂离子电池热管理系统的冷却方法主要有空气冷却、液冷和相变材料 (PCM) 冷却三种方法。相变材料冷却

由于具有高储热密度、恒温输出等特点,在储能系统中得到了广泛的应用。但是相变材料(PCM)本身具有较低的导电性以及导热性,需要加入高导电、高导热的添加剂来制备出电、热性能更好的复合相变材料。

1.2 储能设备结构设计影响

锂离子电池储能设备的结构设计会直接影响系统内流道的布置、换热面积和热阻分布,进而对整个热效率产生影响。换热器的几何形状、肋片排列、管束布置方式、流体进口出口位置等结构参数都会对传热性能造成较大的影响。对于电池储能系统来说,电芯的排布间距、模组结构都会影响到散热通道是否畅通,也与热失控风险防控有着密切联系。用非均匀热源边界条件下的液冷板拓扑优化设计可以达到换热效率和流动阻力的最佳匹配。

1.3 运行环境对热效率的影响

储能系统所处的环境条件对于热效率有重要的调节作用。传统的风冷技术在极端环境中存在着明显的不足之处,浸没式加热/冷却由于在温度控制以及反应速度上具有明显的优势,因此被广泛应用于各种场合当中。环境温度升高会造成系统散热能力降低,容易引发热失控,低温时电池性能、容量明显下降,所以宽温域内热管理是提高热效率的重要问题。

2 储能系统热效率提升关键技术

2.1 高导热储能材料优化技术

由于储热材料存在导热性能差的固有缺陷,因此高导热储热材料优化技术正成为提高热效率的新方向。纳米材料和石墨烯复合相变材料技术是目前最具有发展前途的方法。纳米材料技术是在相变材料中均匀分散高导热纳米颗粒,在保持较高的相变焓的同时大大提高了热导率。鲁博辉等人研究一种石蜡和 Fe_3O_4 纳米颗粒高导热系数复合相变材料,能够有效地提高复合相变材料的导热系数,当纳米颗粒的质量分数为5%时,固态和液态导热系数分别提升了53%和79%,完全熔化和凝固时间可分别缩短29.69%和29.81%; Fe_3O_4 纳米颗粒的添加降低了储热和放热过程中的自然对流强度^[1]。

石墨烯复合相变材料是以石蜡作为相变基体,膨胀石墨和石墨烯协同增强导热,制备高导热性的复合相变材料。吴晓昱等人以石蜡作为相变基体,膨胀石墨和石墨烯协同增强导热,制备高导热性的复合相变材料。研究表明复合相变材料能有效降低工作中锂离子电池的表面温度,同时使电池的性能更加稳定。通过对比复合相变材料与石蜡的降温效果,发现当放电倍率越高,其降温效果越好。复合相变材料可以有效降低电池温度,保持电池工作中的安全^[2]。

2.2 储能系统热管理技术

热管理技术是保证储能系统正常工作的重要手段。储能系统热管理是保障锂电池储能系统安全、高效、长寿命运行的关键技术,其主要功能是通过散热、加热与温度均衡控制,使电池工作在适宜温度区间(最佳运行温度约为 $10\sim 35^\circ\text{C}$),防止热失控风险并优化性能。张万涛提出一种基于多源异构数据融合的热失控极早期预警系统,构建“机理-数据”双驱动智能预警模型,实现热失控发生前60min的精准预警^[3]。

李明提出了一种基于能量管理系统(EMS)计划曲线的热管理控制策略,并采用电芯温度对储能电池舱内空调进行集中控制,避免各设备间的差异化启停,提升热管理的一致性。需要采集电芯温度作为热管理系统的判断依据,提高热管理的灵敏度^[4]。

2.3 储能设备结构优化设计

结构优化设计是从物理构型角度改善热效率的途径,它主要包含增大有效换热面积、改善流体流动路线和削减局部热阻等方法。储能单元的径长比、壁面厚度、保温层的设计都会影响到热损失的大小,在初始设计阶段要综合考虑热性能优化和结构力学、制造成本等因素。常用的有在换热表面上增加肋片、采用螺旋或多通道流道结构、改善管束的排列方式等。结构优化要同材料选择、热管理策略一起进行一体化的设计,从而达到热性能和经济性的双提高。王定标等研究了一种新型对称菱形流道液冷板,在 40°C 高温环境中,电池包最高温度在不同的冷却液入口温度下均保持适宜的工作范围,在降低电池包最高温度与最大温差的同时压降最高可降低63.93%^[5]。

顾万选设计了一种全包围式的液冷散热板,散热板形状呈现蛇形管路将电池圆弧表面半包围起来,研究结果显示,该液冷系统的散热效率高,整个电池组的温度区间都在合理的范围之内。并优化了该散热结构,缩减了管道面积,将其变为均匀布置的四通道结构,该结构的散热效果并未下降,并且安全性好,达到了优化效果^[6]。

2.4 智能温控与监测技术

随着传感技术、物联网、人工智能算法三者的融合,智能温控和监测技术已成为储能热管理系统中不可缺少的部分。智能热管理系统通过搭载温度传感器、控制器和执行器等设备,实现对电池温度的实时监测和调节,从而保持电池在安全温度范围内运行。通过智能算法的优化和控制,可以实现对电池温度的动态调节,避免因外界环境变化而导致的温度异常和性能下降。动态优化算法是一种有效的热管理技术,通过实时调节电池系统的工作参数,

以适应外部环境变化和电池内部状态变化,从而实现对电池温度的动态控制和优化^[7]。智能温控系统依据电芯实时温差变化状况,自动调节冷却介质的流量、温度、流速的分配,在热安全状况下最大程度削减冷却消耗。

2.5 充放电策略优化技术

充放电策略的本质就是控制储能系统在工作过程中产生的热生成速率和热分布,是抑制极端温升、提高热效率的行为控制手段。合理的充放电策略设计同主动热管理措施相配合,可以在保证高倍率放电要求的情况下大大减少辅助能耗。将充电电流分成多个阶梯式变化,可以有效地减小峰值热流密度,使热积累的过程更加平滑可控,在满足电网调度要求的情况下提高热效率和延长循环寿命。人工智能算法在电能储存系统充放电策略优化中的应用,展现了其在提高系统效率、延长设备寿命、降低运营成本等方面的显著优势,通过深度学习、强化学习等技术,使储能系统在复杂多变的电力环境中能够做出精准、高效的决策。AI 在需求预测、电池管理和多系统协同优化中的

深度应用,进一步推动了电力行业的智能化转型^[8]。

3 储能系统节能效果评价方法

3.1 节能效果评价指标体系构建

科学完整的评价指标体系是量化锂电池储能系统节能效果、指导系统技术选型、提高运行优化逻辑的根基。评价指标的选择要遵照系统性、层次性以及可操作性的准则,全方位涵盖热效率、能耗、经济性以及环境效益这四个主要方面。《电化学储能场站能效等级评价规范》(T/HNEE 010-2025)对电化学储能场站能效等级的总则、评价指标体系及取值规则、评价方法、评价流程进行了规定,适用于电源侧、电网侧和用户侧额定功率不小于500kW、额定能量不小于500kWh的锂离子电化学储能场站的能效等级评价。电化学储能场站评价指标基本权重设置见表1。

以西部地区某储能电站为例,根据《电化学储能场站能效等级评价规范》(T/HNEE 010-2025)评价方法对其能效等级进行评价,评价计算结果见表2。

表1 指标权重设置

序号	一级指标	权重	二级指标	权重
1	电池系统能效	50%	电池系统能量转换效率	20%
			电池系统放电能量保持率	20%
			电池失效率	10%
2	转换系统能效	20%	转换效率	10%
			待机损耗	5%
			空载损耗	5%
3	整站运行能效	30%	场站综合效率	15%
			场站储能损耗率	5%
			站用电率	5%
			场站变配电损耗率	5%

表2 某储能电站能效等级评价计算

序号	一级指标	二级指标	综合评价得分
1	电池系统能效	电池系统能量转换效率	18
		电池系统放电能量保持率	16
		电池失效率	9
2	转换系统能效	转换效率	8
		待机损耗	4
		空载损耗	4
3	整站运行能效	场站综合效率	13.5
		场站储能损耗率	4
		站用电率	4
		场站变配电损耗率	4.5
	合计		85

该电站综合评价得分为 85 分, 根据能效等级划分为二级, 即能效水平处于行业优良水平, 综合能效高于行业平均水平, 能量损耗控制在合理范围内, 能满足主流应用场景的能效需求; 技术表现为核心设备性能优良, 运行可靠性较高, 充放电循环寿命符合行业主流标准, 具备基础的能效管控措施, 无重大能效短板; 合规与管理方面符合 GB/T 42288 及能效相关标准的核心要求, 数据采集、指标计算、等级评定等流程规范, 无合规性问题。

3.2 热效率评价方法

热效率是用来度量储能系统能量转换和传输过程中热量利用情况的直接指标。按照热力学第二定律, 热效率可以从能量(焓)和熵两个角度进行评价。能量效率按照热力学第一定律来计算, 重视能量的“数量”守恒, 计算方便但是不能区分不同的品质能量; 熵效率是根据热力学第二定律提出的, 它体现的是实际热力过程和理想可逆过程的区别。表 3 给出储能系统热效率评价的主要方法及适用范围。

3.3 能耗分析方法

能耗分析方法是研究储能系统在运行过程中自身消耗的辅助能源总量, 即冷却设备能耗、泵功损耗、风扇能耗、控制系统自耗电等。从系统边界划分角度来说, 能耗分析可以分为单元级分析和系统级分析两种。单元级分析以单个电池模组或者储热单元为对象, 主要研究热管理方案下局部能耗的特性; 系统级分析把热管理能耗当作整个储能电站辅助用能的一部分, 考察其同主储能效率之间的耦合状况。热效率提高技术的引入之后, 能耗分析还要注意辅助能耗增量和主系统效率增益之间的权衡关系, 防止出现“节能增耗”的无效优化。

3.4 经济性评价方法

经济性评价属于热效率提高措施可行性以及推广价值的必要环节, 主要对技术增量投资所产生的节能效益全生命周期效益进行分析。常用的指标有静态投资回收期、

动态投资回收期、净现值、内部收益率和平准化度电成本等。西部区域某储能电站规模为 1MW/2MWh (储能系统最大功率 1MW, 总存电量 2MWh, 满功率能持续放电 2 小时), 初始投资大约为 328 万元, 8 年后总收益达到 626 万元, 回本周期缩短到 2.2 年左右。但是由于分时电价政策的改革, 各个省份的储能项目的经济性存在一定的差别。经济性评价还要对初始建设成本、运行维护成本、节能收益等不同的成本和收益流加以区分, 然后根据具体的使用场景来分别开展经济性测算工作。

3.5 环境效益评价方法

环境效益评价就是对储能系统热效率提高所带来碳减排贡献以及生态环境正效应进行量化, 生命周期评价是目前被广泛认可的评价方法。根据能源均化的含锂电岛屿电网碳足迹分析可知, 加入锂离子电池储能系统可以使岛屿电网的碳排放降低近 50%^[9], 说明储能对低碳减排起到重要的作用。从热效率提高的角度来看, 热效率越高, 能量损失越小, 单位储能能量所对应的碳排放强度就越低。因此在节能效果评价时要将热效率增益换算成标准煤节约量或者二氧化碳减排当量, 形成统一的环境效益评价口径。评价体系还可将污染物排放、资源消耗等全部生命周期的环境影响纳入其中, 给储能系统绿色低碳发展赋予了量化支撑。

4 结语

锂离子电池储能系统热效率提高是保证系统安全、提高运行经济性、释放节能潜力的重要课题。本文从材料、结构、环境三个方面对热效率的影响因素进行了分析, 对高导热材料、热管理技术、结构优化、智能温控、充放电策略这五个关键技术进行了梳理, 构建起一个包含指标体系、热效率评价、能耗分析、经济效益、环境效益的节能评价体系。本评价方法是衡量锂离子电池储能节能效果、指导技术优化的有力工具。

表 3 储能系统热效率评价方法比较

评价方法	理论基础	评价重点	适用场景	局限性
焓效率法	热力学第一定律	能量数量	单一品位储能、工程初步评估	无法区分能量品质
熵效率法	热力学第二定律	能量品质与可用性	多品位储能、综合热力学分析	计算复杂、需基准状态
往返效率 (RTE)	电化学热耦合	充放电能量比	电池储能、电站能效评定	未计辅助能耗

[参考文献]

- [1]鲁博辉,师志成,张永学,等.石蜡/ Fe_3O_4 纳米颗粒复合相变材料在管壳式储热单元中的储/放热性能研究[J].储能科学与技术,2021,10(5):1709-1719.
- [2]吴晓昱,陈明毅,李海航,等.基于石墨烯相变材料的锂离子电池热管理技术研究[J].中国测试,2023,49(5):1-8.
- [3]张万涛.储能锂电池热失控极早期预警系统[J].上海轻工业,2026(5):223-225.
- [4]李明,谢金元,邱沐楚,等.基于计划曲线的储能系统均衡热管理及节能研究[J].储能科学与技术,2023,12(8):2585-2593.
- [5]王定标,纪世博,王光辉,等.储能电池包液冷散热结构设计及性能分析[J].郑州大学学报(工学版),2026(6):11.
- [6]顾万选,郭韵.储能电站中锂电池的液冷结构设计及优化[J].中外能源,2022,27(8):94-99.
- [7]姚帅.锂离子电池储能系统的热管理与性能优化[J].网络通信系统设计,2022(8):33-34.
- [8]金伟兴.基于智能算法的电能储存系统充放电策略优化分析[J].集成电路应用,2025,42(11):486-488.
- [9]文明哲,陈泽维,肖焕秀,等.基于能源均化的含锂电岛屿电网碳足迹分析[J].能源与环保,2025(11):224-229.

作者简介: 张志远(1985—),男,汉族,河北故城县人,高级工程师,硕士研究生,毕业于北京科技大学动力工程及工程热物理专业,研究方向为集中供热、热电、节能环保等。