

锂离子电池储能热管理系统比较与经济性 分析研究

李伟航¹, 石千磊¹, 曲涛², 李京鲲², 黄东永², 张志鸿¹, 朱晓庆¹, 巨星¹
(1. 新型储能技术北京实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206; 2. 嘉实多(上海)管理有限公司, 上海市 浦东新区 201206)

Comparison and Economic Analysis of Lithium-ion Battery Energy Storage Thermal Management System

LI Weihang¹, SHI Qianlei¹, QU Tao², LI Jingkun², HUANG Dongyong², ZHANG Zhihong¹, ZHU Xiaoqing¹, JU Xing¹

(1. Beijing Laboratory of New Energy Storage Technology (North China Electric Power University), Beijing 102206, Changping District, China; 2. Castrol (Shanghai) Management Co., Ltd., Shanghai 201206, Pudong New Area, China)

摘要: 【目的】储能热管理技术迭代速度快, 近来主流公司产品采用的冷却方式已由风冷过渡为间接液冷, 同时浸没液冷技术正在从示范迈向应用。但目前对于浸没液冷在经济性等方面的优势尚无论文进行较为深入的讨论, 因此对 3 种常见热管理系统进行对比分析。

【方法】针对性选取了重量/体积成组效率、温升/温差和运维过程等指标, 对比了不同热管理系统的差异。基于对储能系统的调研, 建立了考量储能热管理系统特征的经济性模型, 纳入电池容量衰减的影响; 对比了成本, 净现值, 动态投资回收期, 内部收益率, 并对指标的参数敏感性进行了分析。【结果】在长期运行情况下, 同规模储能电站中应用浸没液冷的系统在内部收益率上对比间接液冷系统增加了 3.2%, 对比浸没液冷系统增加了 9.1%, 且在市场发生波动的情况下能保持稳定收益率。

【结论】储能系统的收益率对于峰谷电价差敏感, 且浸没液冷在市场波动的情况下收益更为稳定。结果可为储能电站建设运营提供参考。

关键词: 储能电站; 锂离子电池; 电化学储能; 热管理系统; 浸没液冷; 经济性分析

ABSTRACT: [Objectives] The energy storage thermal management technology is iterating rapidly, and the cooling method used by mainstream companies has recently transitioned from air cooling to indirect liquid cooling, while submerged liquid cooling technology is moving from demonstration to application. However, the advantages of immersion liquid cooling in economy and other aspects have not been discussed in depth. Therefore, this paper compares three common thermal management systems and compares the differences of different thermal management systems by selecting indicators such as weight/volume group efficiency, temperature rise/temperature difference and operation and maintenance process. [Methods] Based on the investigation of the energy storage system, an economic model was established to consider the characteristics of the energy storage thermal management system, including the impact of battery capacity attenuation, and compared the cost, net present value, dynamic investment payback period, and internal rate of return. The parameter sensitivity of the index was analyzed. [Results] Under long-term operation, the internal rate of return of the system applying immersion liquid cooling in the same scale energy storage power station increased by 3.2% compared with the indirect liquid cooling system and 9.1% compared with the immersion liquid cooling system, and it can maintain a stable rate of return in the case of market fluctuations. [Conclusions] The yield of energy storage systems is sensitive to the difference between peak and valley electricity prices, and the yield of submerged liquid cooling is more stable in the event of market fluctuations. The results can provide reference for

基金项目: 国家自然科学基金项目(52476196); BP 嘉实多研究项目(BP Castrol-NCEPU-01)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52476196) and Research Project of BP Castrol(BP Castrol-NCEPU-01).

the construction and operation of energy storage power stations.

KEY WORDS: energy storage power station; lithium ion battery; electrochemical energy storage; thermal management system; immersion cooling; economic analysis

0 引言

多种储能相关产品涉及的关键词中多次提及大容量、长寿命、高安全性,体现了市场对储能系统性能的需求。锂离子电池作为电化学储能技术中应用最广泛的一种技术,其在充放电过程中尤其是高倍率充放电过程中产生的热量较高,如不及时将热量导出,会严重损害储能系统的性能和寿命,极端情况下甚至可能引发热失控。目前储能一体机市场中,主流的热管理方式可以分为空气冷却和液冷,其中液冷以间接液冷为主,另一种常见液冷方式即浸没液冷目前在产品中应用较少。

空气冷却利用空气作为介质进行换热,一般以空调作为制冷设备;液冷以冷却液作为介质,间接液冷通过冷管和冷板与电池换热,浸没液冷则令冷却液直接接触电池换热,2种液冷均采用冷水机进行制冷。目前对风冷的研究包括:改善电池组设计^[1]、调整冷却通道^[2-4]、使用导热性能更强的导热材料^[5]。对间接液冷的研究主要集中在液体流道的尺寸、布局的设计^[6-7]

浸没液冷冷却方式是将电池与冷却液直接接触的一种热管理方式,其将电池 pack 完全浸没于绝缘冷却液中,这种冷却方式具有更高的冷却效率,能更快地将电池产生的热量导出,若应用特定冷却液还能避免热失控引发的火灾。目前研究主要围绕研发新浸没液、改进浸没参数等方面展开。目前主要应用的浸没液类型包括氢氟醚,水乙二醇混合溶液、碳氢化合物、硅油、酯类等^[8]。Wang 等^[9]研究了一定条件下浸没比对电池冷却效率的影响,Liu 等^[10]研究了浸没液流速和电池间距对电池最高温度的影响,Song 等^[11]通过耦合喷淋冷却增强热管理性能,并在特定条件下得出了最优化的配置设计。

目前储能电站相关的经济性分析中,多对整体系统在特定场景的应用进行针对性分析,如陈巨龙等^[12]根据贵州电力行业发展现状,对储能商业模式进行了研究,得出了现有分时电价水平下,各电压等级未参与电力市场交易,并执行两部制电价的情况下,得到了内部收益率将不能达到 8% 的水平,投资经济性较差的结论。薛颖慧^[13]对某拟投资建设的储能电站开展了 2 种运行模式下的经济性分析,并得出 2 种运营模式下均具有良好经济性的结论。韩龙进^[14]对大工业用户侧储能项目进行了经济性分析,并得出了峰谷差价达到 0.7 元/(kW·h)及以上时,可以通过峰谷套利获得良好经济效益的结论。梁毅等^[15]则对用户侧储能进行了多种类多运营环境的讨论,探讨了 4 种不同类型的电化学储能电站在中国各省电价情况下的用户侧储能经济性,得出初始单位投资成本涉及的初始投资成本和换电成本占总成本的比重较高,以及在电力缺口较大的省份用户侧储能经济性较优的结论。但目前这些研究没有针对储能热管理系统进行分析,更没有针对浸没液冷这一热管理方式研究。

本文从多方面综合对比了不同热管理系统之间的特点,建立了热管理系统的成本模型。基于目前经济性研究中尚未关注到的部分,针对同规模下不同热管理方式带来的经济性差异进行对比,建立了考量储能热管理系统特征的经济性模型,纳入了电池容量衰减的影响,对 3 个关键的经济性指标(净现值、动态投资回收期、内部收益率)进行了对比,并对内部收益率的参数敏感性进行了分析。

1 储能热管理系统和储能系统经济性模型

1.1 储能热管理系统成本模型

1.1.1 设备成本

设备成本计算方式如下:

$$E_p = \sum (e_p \times j) \quad (1)$$

式中: E_p 为设备成本; e_p 为具体设备的单位价格; j 为对应需要的设备数量。

1.1.2 运维成本

运维成本的计算方式如下:

$$E_{o\&m} = E_m + E_l + E_e \quad (2)$$

式中: $E_{o\&m}$ 为热管理系统运维成本; E_m 为热管理系统维护成本; E_l 为热管理系统冷却液损失成本(仅液冷); E_e 为热管理系统耗电成本。

1.1.3 全生命周期成本

全生命周期成本的计算方式如下:

$$LCC = E_p + E_i + E_{o\&m} + E_d \quad (3)$$

式中: LCC 为全生命周期成本; E_i 为热管理系统安装成本; E_d 为热管理系统处置成本。

1.2 储能系统经济性模型

1.2.1 成本模型

储能系统全生命周期中的成本主要来源于建设成本, 运行耗电成本, 运维成本和更换电芯成本, 表示如下:

$$C_{all} = (C_{self} + C_l + C_c \& i) + C_e + C_{o\&m} + C_b \quad (4)$$

$$C_{self} + C_l + C_c \& i = C_{unit} \times S + C_l \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

$$C_e = (E_h \times C_h + E_l \times C_l) + S \times C_l \quad (6)$$

$$C_{o\&m} = C \times \eta \quad (7)$$

$$C_b = S \times C_b \quad (8)$$

式中: $(C_{self} + C_l + C_c \& i)$ 指建设资金中的自筹资金和贷款资金以及贷款带来的利息; C_e 指运行过程中热管理系统耗电成本与电池充电耗电成本之和; $C_{o\&m}$ 指整个储能系统的运维成本; C_b 指电芯报废时更换的成本; C_{unit} 为 EPC 单位价格; S 为装机规模; E_h 为高电价时间区间内的耗电量; C_h 为高电价; E_l 为低电价区间内的耗电量; C_l 为低电价; η 为运维比例; C_b 为电芯单位容量价格。

1.2.2 收益模型

储能系统的收益部分主要来源于峰谷差价收入, 其他方式收入, 政府补贴和折旧收入, 表示如下:

$$I_{all} = I_s + I_d + I_o + I_r \quad (9)$$

$$I_s = (C_{self} + C_l) \times \zeta \quad (10)$$

$$I_d = S_n \times DOD \times (C_{sell} - C_l) \quad (11)$$

$$I_o = (I_d - C_e) \times i_o \quad (12)$$

$$I_r = C \times i_r \quad (13)$$

其中 I_s 为政府的一次性补贴; I_d 为峰谷差价收益; I_o 为其他盈利方式收入; I_c 为折旧收入; ζ 是补贴比例; S_n 为该次运行时的现容量; DOD 为放电深度; C_{sell} 为电力期货市场售电价格; i_o 为其他方式收入占峰谷差价收益的比例; i_s 为残值比例。

1.2.3 税务相关项目

储能电站运行中主要涉及 3 种税, 分别为增值税, 附加税和所得税, 表示如下:

$$T_{all} = T_v + T_a + T_i \quad (14)$$

式中: T_v 为增值税, 由初期投资时和更换电池时缴纳的增值税构成; T_a 为附加税, 根据增值税的一定比例额外征收; T_i 为所得税, 根据净收益的一定比例征收。

1.3 评价指标

1.3.1 净现值

净现值(net present value, NPV)指未来资金(现金)流入(收入)现值与未来资金(现金)流出(支出)现值的差额, 是项目评估中净现值法的基本指标。未来的资金流入与资金流出均按预计折现率各个时期的现值系数换算为现值后, 再确定其净现值。这种预计折现率是按企业的最低的投资收益率来确定的, 是企业投资可以接受的最低界限。计算公式:

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{(I_n - O_n)}{(1+g)^n} \quad (15)$$

式中: N 为项目运行周期; I_n 为第 n 年的总收入; O_n 为第 n 年的总支出(包括税); g 为可接受的最低收益率。

1.3.2 动态投资回收期

动态投资回收期(dynamic investment payback period, DIPP)是把投资项目各年的净现金流量按基准折现率折成现值之后, 即考虑了时间的货币价值计算的投资回收期, 计算公式为

$$DIPP = n' - 1 + \frac{\sum_{n=1}^{n'-1} ((I_n - O_n) / (1 + g)^n)}{((I_{n'} - O_{n'}) / (1 + g)^{n'})} \quad (16)$$

式中 n' 为总净收益大于 0 的年份。

1.3.3 内部收益率

内部收益率(internal rate of return, IRR)指投资项目的净现值为零时的折现率。即某项投资处于经济保本点时的折现率。是净现值法则的重要替代。可视作项目存续期间投资者可获得的平均回报。

$$\sum_{n=1}^N \frac{(I_n - O_n)}{(1 + IRR)^n} = 0 \quad (17)$$

1.3.4 敏感性分析

根据数据特点,采用 One-at-a-time(OAT)的方法,即每次更改一个变量而其他变量保持基线值的方法进行敏感性分析,在本文中将因变量的变化率与变量的变化率相除得到一个值用于对比。

2 储能热管理技术经济性计算参数

2.1 用于对比的储能预制舱产品参数

选取部分产品进行对比,以字母指代不同公司的产品,同一公司的不同产品以数字区分,参数如表 1 所示。

表 1 采用不同热管理方式的储能集装箱或预制舱产品参数

Tab. 1 Parameters of energy storage containers or prefabricated pods with different thermal management technologies

产品	系统类型	体积 /m ³	额定容量 /(kW·h)	质量 /t	电芯总 重/t	电芯 总体 积/m ³
A	间接液冷	47.81	5,015	39	26.9	12.9
B	风冷	42.77	2,867.2	28	16.6	8.3
C1	风冷	42.77	1,612	30	9.9	4.6
C2	间接液冷	42.77	5,015	45	28.6	13
D	风冷	80.64	3,460	39	18.6	8.9
E	间接液冷	42.77	3,168	35	15.7	7.5
F	浸没液冷	48.77	5,000	61	26.9	12.9

2.2 热管理系统参数

罗列热管理主要部件,并给出市场价格,其中冷却设备单价以制冷量计,具体见表 2—4。对于热管理系统经济性计算部分:1)假设储能热管

理系统运行 20 年,且期间没有发生严重损坏,则其全生命周期成本为系统购置成本、系统安装成本与系统运维成本的和,安装费用以购置成本的 5%计算;2)运维部分假设维护维修每年花费热管理系统总价的 5%,假设液冷机组每年损失 10%冷却液,则每年补充总液量 10%的冷却液,对于耗电成本来说,根据主要耗电部件计算:风冷的耗电成本来源于空调和风扇,根据现行的《风管送风式空调机组能效限定值及能效等级》(GB 37479—2019)规定,风冷式单冷型机组二级能效能效比不低于 3.0(名义制冷量大于 28 kW 时),同时一个直流 12 V 风扇的功率大约为 8 W,而液冷的耗电成本来源于冷水机和水泵,根据现行的《冷水机组能效限定值及能效等级》(GB 19577—2015)规定,风冷式冷水机组二级能效的综合部分负荷性能系数不低于 3.7(名义制冷量大于 50 kW 时),根据 5 000 kW·h 机组流量推算水泵运行最大功耗为 2.2 kW。

表 2 风冷热管理系统成本构成

Tab. 2 Cost composition of air cooling and heating management system

风冷相关设备	单价
集装箱储能空调(冷暖型)	1.4/(元/W)
不锈钢镀锌风管	40/(元/m ²)
铝箔隔热棉保温层	10/(元/m ²)
风冷电池 Pack 壳体	400/(元/个)

表 3 间接液冷热管理系统成本构成

Tab. 3 Cost composition of indirect liquid cooling and heating management system

间接液冷相关设备	单价
冷水机	1.8/(元/W)
液管	36.8/(元/m)
连接头	42/(元/个)
水/乙二醇混合溶液	7.3/(元/kg)
液冷板	300/(元/个)
液冷电池 Pack 壳体	350/(元/个)

表 4 浸没液冷热管理系统成本构成

Tab. 4 Cost composition of immersion cooling and heating management system

浸没液冷相关设备	单价
冷水机	1.8/(元/W)
10 号变压器油	15/(元/L)
液管	36.8/(元/m)

连接头	42/(元/个)
阀门	358/(元/个)
Pack 级浸没舱	400/(元/个)

2.3 储能系统经济性计算参数

为方便比较和计算,假设一个 10 MW·h 的储能电站分别使用空冷、间接液冷、浸没液冷 3 种热管理方式进行运营,运营周期 20 年,参数如表 5 所示。

表 5 储能电站经济性计算参数

Tab. 5 Operation parameters of energy storage power station

参数	数值
风冷 EPC 价格/(元/Wh)	1.17
间接液冷 EPC 价格/(元/Wh)	1.30
浸没液冷 EPC 价格/(元/Wh)	1.40
贷款比例	70%
贷款利率	5%
贷款期数/月	120
电池 EOL	80%
电池购买价格/(元/Wh)	0.36
电池放电深度	90%
高峰电价/[元/(kW·h)]	1.193
低谷电价/[元/(kW·h)]	0.478
年工作时长	330 天
售电价格/[元/(kW·h)]	1.05
充放电效率	95%
残值比例	5%
运维比例	2%
通货膨胀率	3%

3 不同热管理方式特征与经济性对比

3.1 关键性能指标对比

3.1.1 重量成组效率和体积成组效率

重量成组效率,体积成组效率常用于评价储能系统的集成度,是电芯总体积(重量)与储能集装箱总体的体积(重量)的比值。表 1 所示的几种储能产品的重量/体积成组效率如图 1 所示。在该项对比中,各热管理系统重量成组效率和体积成组效率的平均值分别为,空冷: 45.90%, 15.92%; 间接液冷: 59.23%, 25.06%; 浸没液冷: 44.19%, 26.45%。由此可知,浸没液冷在重量成组效率上略低于间接液冷与空气冷却,主要原因是浸没舱与浸没液的额外质量。但在体积成组效率上优于

间接液冷与空气冷却,这种优势来源于高散热效率及其带来的高电池密集度。

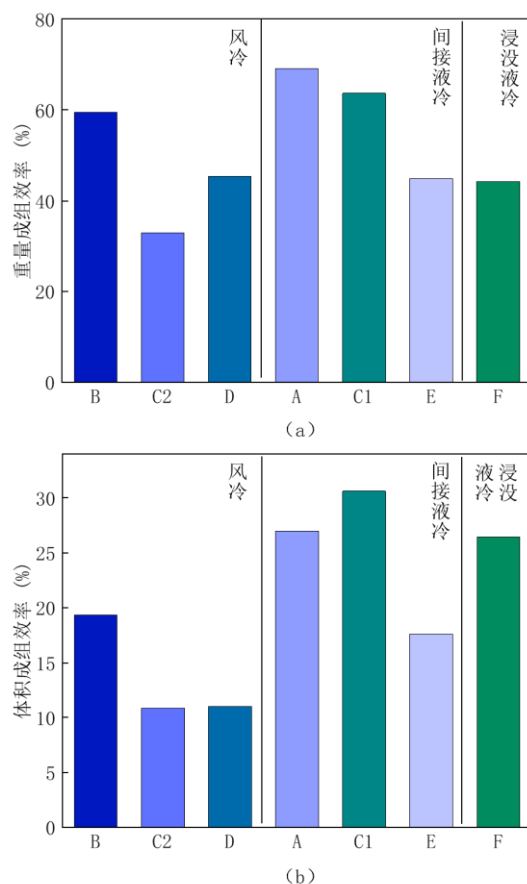


图 1 (a)重量成组效率对比(b)体积成组效率对比

Fig. 1 (a) Comparison of weight group efficiency (b) comparison of volume group efficiency

3.1.2 温控能力

风冷、间接液冷、浸没液冷 3 种热管理方式的温度控制能力如图 2 所示。在特定条件下的测量中,浸没液冷的组内最大温差能控制在 2 °C,平均温升控制在 5 °C^[16]。相对于间接液冷^[17]在组内最大温差上有明显优势,相对于风冷^[18]则在两项上均有明显优势。说明对于电池热管理系统而言,浸没液冷在温度控制能力上更胜一筹。

3.2 运维情况对比

3.2.1 定期检修对比

如表 6 所示,本部分列举了不同热管理系统在定期检修中需要进行的检查项目并简单说明了操作方式。

3.2.2 故障处理流程对比

本部分对电池包发生故障的情况下的流程进

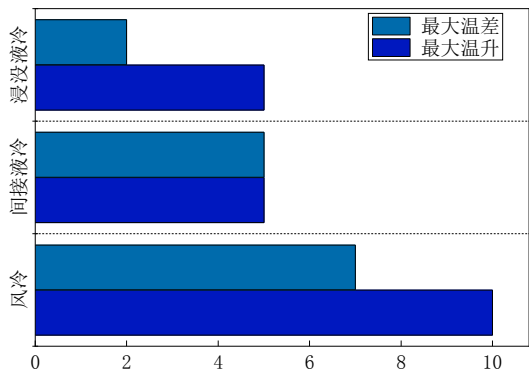


图 2 温度控制能力对比

Fig. 2 Comparison of temperature control capabilities

表 6 定期检修项目

Tab. 6 Regular maintenance projects

风冷	间接液冷	浸没液冷
1.检查线路：目测检查线路有无异常	1.检查线路：目测检查线路有无异常	1.检查线路：目测检查线路有无异常
2.检查风机扇叶：拨动检测各风扇是否转动顺畅	2.检查冷水机扇叶：拨动检测	2.检查冷水机扇叶：拨动检测
3.检查空调有无异常：观察排水管是否通畅以及冷凝器是否需要除灰	3.检查冷水机冷凝器：查看是否正常工作以及翅片是否正常	3.检查冷水机冷凝器：查看是否正常工作以及翅片是否正常
—	4.冷却液维护：需检测冷却液状态决定是否更换，如需更换需要彻底排净后重新抽真空注液	4.冷却液维护：检测冷却液是否需要更换，如需更换需要彻底排空后注液
—	5.检查冷却液是否漏液：利用系统中自带的对应探头检测箱内空气中相应冷却液成分是否超标	5.检查冷却液是否漏液：利用系统中自带的对应探头检测箱内空气中相应冷却液成分是否超标

行了对比，如表 7 所示。从售后流程上来说间接/浸没液冷在系统故障时需要完成更繁琐的步骤才能完成更换。同时更大的 PACK 重量以及检测气密性这一步骤导致系统发生故障时需要有额外的仪器辅助完成，而风冷只需要简单的工具即可完成维护，同时需要的专业性较低。2 种液冷的故障处理流程较为接近，但是相较于间接液冷，由

于注入过程相对容易，浸没液冷注入冷却液时不必对管路抽真空。

表 7 故障处理流程对比

Tab. 7 After-sales process comparison

风冷	间接液冷	浸没液冷
1.拆除电源线和信号线	1.拆除电源线和信号线	1.拆除电源线和信号线
2.抽出故障电池 pack	2.排出冷却液	2.排出冷却液
3.返厂维修	3.拆除冷却管路	3.拆除冷却管路
4.安装电池 pack	4.抽出电池 pack	4.抽出电池 pack
5.连接电源线和信号线	5.返厂维修	5.返厂维修
—	6.安装电池 pack	6.安装电池 pack
—	7.连接冷却管路	7.连接冷却管路
—	8.检测液冷管路气密性	8.检测液冷管路气密性
—	9.真空泵抽真空	9.重新注入冷却液
—	10.重新注入冷却液	10.连接电源线和信号线
—	11.连接电源线和信号线	—

3.3 热管理系统成本对比

3.3.1 设备成本

根据 2.1 和 2.2 中参数进行配型，配型过程中，冷却设备的额定功率根据电池发热量进行计算；涉及冷却液的按实际机组冷却液容纳量计算且冷却液类型采用表中给出的类型；连接管道依照机组尺寸和系统构成方式估算，其他连接件及部件按照实际数目参与计算。得到 3 种热管理系统平均单位成本如图 3 所示，根据柱状图可知风冷的平均设备成本最低，平均只有 35 元/(kW·h)，

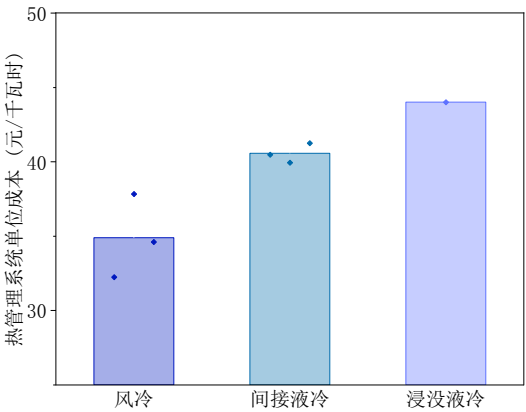


图 3 热管理系统单位成本

Fig. 3 The unit cost of thermal management system

而浸没设备成本在 44 元/(kW·h)。

3.3.2 运维成本

根据 2.1 和 2.2 中假设和参数,假设储能电站一年运行 330 天,每天运行 4 h,则风冷每年的运维成本为 8.59 元/(kW·h);间接液冷每年的运维成本为 7.42 元/(kW·h);浸没液冷每年运维成本为 7.90 元/(kW·h),对比如图 5 所示。从组成部分来看,间接液冷与浸没液冷在运维成本方面有额外的冷却液损耗成本,分别为 0.058 元/(kW·h×年)和 0.6 元/(kW·h×年);耗电成本上由于散热效率带来的差异,表现为风冷>间接液冷>浸没液冷;由于维护成本基于机组成本的固定比例得出,表现为浸没液冷>间接液冷>风冷。

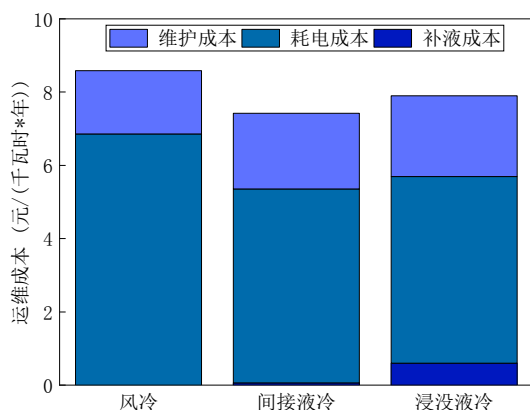


图4 热管理系统运维成本

Fig. 4 Operation and maintenance costs of thermal management system

3.3.3 全生命周期成本

根据 2.1 和 2.2 中数据与假设,风冷、间接液冷、浸没液冷的全生命周期成本分别为 208.13、199.25、204.21 元/(kW·h),构成如图 5 所示。安装成本与购置成本挂钩,均表现为浸没液冷>间接液冷>风冷,三者区别主要体现在运维成本中,其中风冷全生命周期运维成本为 171.8 元/(kW·h),间接液冷为 148.4 元/(kW·h),浸没液冷为 158 元/(kW·h)。这使得最终风冷的全生命周期成本更高,间接液冷的全生命周期成本更低,而浸没液冷则在二者之间。

3.4 储能系统经济性对比

3.4.1 经济性指标对比

根据 2.3 中数据及假设可以得出 3 种热管理

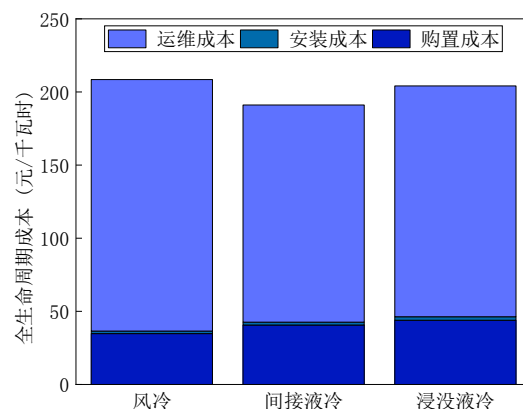


图5 热管理系统全生命周期成本

Fig. 5 Full life cycle cost of thermal management system

方式对应的储能电站的 3 个经济性指标。由图 6 所示数据可知,浸没液冷在长期运营中具有显著优势。在同等市场环境下,其最终的净现值明显高于风冷和间接液冷,资金回收期短,内部收益率高。浸没液冷的内部收益率相对于间接液冷提升了 3.2%,相对于风冷提升了 9.1%,说明了浸没液冷更适合投资。

3.4.2 内部收益率的参数敏感性分析

将 3 种冷却方式的内部收益率对换电价格和售电价格进行敏感性分析,一般认为储能电站作为一种长期投资,其如果达不到 8% 的内部收益率则没有投资意义,因此以橙色代表收益率过低 ($IRR < 8\%$),蓝色代表收益率普通 ($8\% \leq IRR \leq 12\%$),绿色代表收益率高 ($IRR > 12\%$),如表 8、9、10 所示

根据以上表中内容可知,相对于风冷和间接液冷而言,换电价格对浸没液冷的影响更小,这是其对电池使用寿命的延长导致的。采用 0.36 元/(kW·h)的换电价格和 1.10 元/(kW·h)的售电价格作为基准值,对 3 种热管理方式对应的储能系统进行分析,得到表 11 所示数据。该数据表明采用浸没液冷的储能电站内部收益率受电芯价格和售电价格波动的影响较小,说明其运行收益较为稳定。同时对于任意一种系统,其售电价格的波动对内部收益率的影响都高于换电价格波动。

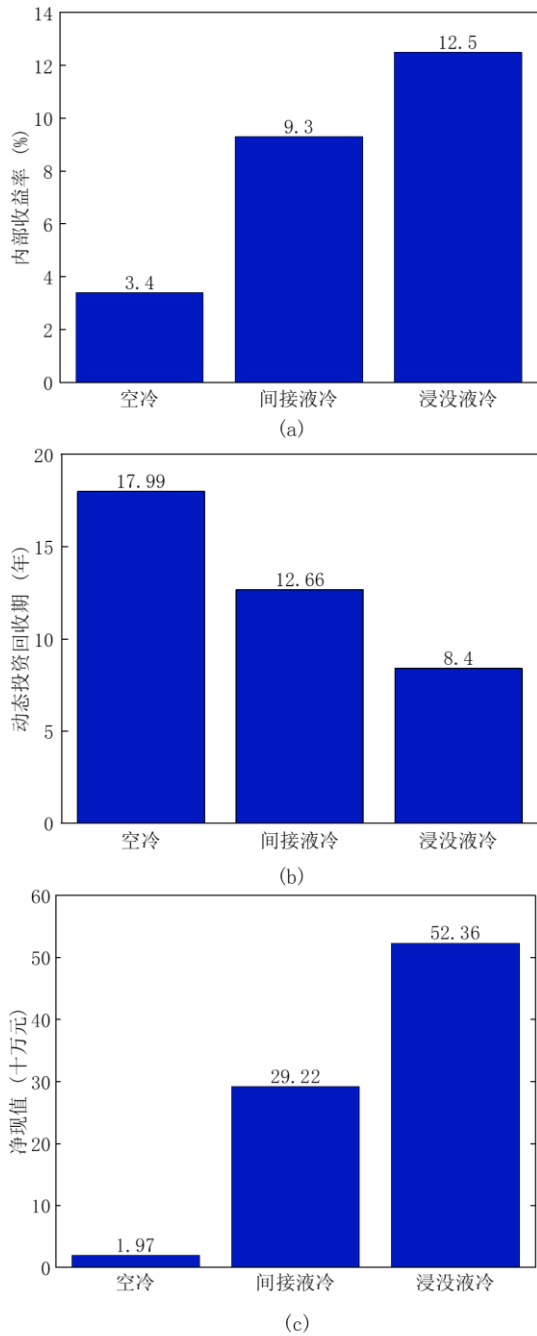


图 6 主要经济性指标对比图：(a)内部收益率(b)动态投资回收期(c)净现值

Fig. 6 Comparison of economic indicators:(a) Internal Rate of Return (b) Dynamic Investment Payback Period(c) Net Present Value

表 8 风冷储能系统敏感性分析表
Tab. 8 Sensitivity analysis of air cooling energy storage system

IRR	电芯价格/(元/Wh)				
	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32

售电价格/(元/kWh)	1.05	1.80%	2.70%	3.61%	4.53%	5.47%
	1.07	3.36%	4.29%	5.22%	6.17%	7.13%
	1.10	5.80%	6.77%	7.75%	8.73%	9.72%
	1.13	8.39%	9.40%	10.42%	11.45%	12.47%
	1.15	10.22%	11.26%	12.30%	13.35%	14.40%

表 9 间接液冷储能系统敏感性分析表
Tab.9 Sensitivity analysis of indirect liquid cooling energy storage system

IRR		电芯价格/(元/Wh)				
		0.40	0.38	0.36	0.34	0.32
售电价 格/[元 /(kW·h)]	1.05	8.16%	8.73%	9.28%	9.81%	10.32%
	1.07	10.11%	10.65%	11.17%	11.67%	12.16%
	1.10	13.08%	13.58%	14.05%	14.51%	14.95%
	1.13	16.12%	16.56%	16.99%	17.41%	17.81%
	1.15	18.17%	18.59%	18.99%	19.38%	19.76%

表 10 浸没液冷储能系统敏感性分析表
Tab. 10 Sensitivity analysis of immersion cooling energy storage system

IRR		电芯价格/(元/Wh)				
		0.40	0.38	0.36	0.34	0.32
售电 价格/(元 /(kW·h))	1.05	11.98%	12.25%	12.52%	12.79%	13.05%
	1.07	13.64%	13.90%	14.17%	14.43%	14.68%
	1.10	16.20%	16.45%	16.70%	16.95%	17.19%
	1.13	18.84%	19.08%	19.31%	19.54%	19.77%
	1.15	20.65%	20.88%	21.10%	21.32%	21.53%

表 11 针对电芯价格和售电价格的敏感性分析
Tab. 11 Sensitivity analysis of battery price and electricity sale price

$\partial y / \partial x$	电芯价格	售电价格
风冷	2.28	12.33
间接液冷	0.6	7.6
浸没液冷	0.27	5.65

4 结论

建立了储能全生命周期经济模型，并对应用了不同热管理方式的储能系统进行了多方面的对比，得出以下结论：

1) 相对风冷，液冷热管理系统对于空间的利用率更高，能在更小的空间内实现更大的容量，但是在重量方面没有明显优势。浸没液冷系统下，电池组最高温度对比风冷降低了约 50%，电池组内最大温差相对间接液冷降低了约 60%。

2) 系统成本中, 风冷成本最低, 平均为 35 元/(kW·h), 而浸没液冷成本较高, 为 44 元/(kW·h)。维护成本与系统成本相关, 且间接液冷和浸没液冷 2 种冷却方式有额外的冷却液损耗成本, 因此液冷的维护成本略高于风冷。但在全生命周期成本中, 浸没液冷的每千瓦时全生命周期成本比风冷低 3.92 元, 比间接液冷高 4.96 元。主要原因是冷却效率和冷却设备能效比的差异。

3) 得益于浸没液冷热管理系统对电池寿命的提升, 相对间接液冷系统, 浸没液冷储能系统能在运行中为企业创造 3.2% 的额外收益率, 成本回收周期减少约 1/3。储能系统的收益率对于峰谷电价差敏感, 且浸没液冷在市场波动的情况下收益更为稳定。

参考文献

- [1] FAN Y, BAO Y, LING C, et al. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 155:96-109. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.03.157
- [2] SUN H, DIXON R. Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack[J]. Power Sources, 2014, 272:404-414. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.08.107
- [3] LU Z, YU X, WEI L, et al. Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 28-40. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.080
- [4] YU K, YANG X, CHENG Y, et al. Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack[J]. Power Sources, 2014, 270: 193-200. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.086
- [5] SAW L H, YE Y, YEW M C, et al. Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminum foams for Li-ion battery cooling system[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1489-1499. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.022
- [6] 谢忱创. 基于微通道蛇形冷板的圆柱形电池热性能研究[J]. 汽车文摘, 2020, 12: 31-38. DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20200164
- [7] XIE Z C. Research on Thermal Performance of Cylindrical Battery Based on Micro-Channel Serpentine Cold Plate[J]. Automotive Digest, 2020, 12: 31-38. DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20200164
- [7] JIN L W, LEE P S, KONG X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. Applied Energy, 2014, 113:1786-1794. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.07.013
- [8] 李哲, 张华, 盛雷. 新能源汽车浸没式锂离子电池冷却技术研究进展[J]. 制冷学报, 2024, 45(03): 38-49.
- [8] LI Z, ZHANG H, SHENG L. Research Progress of Immersed Cooling Technology for Lithium-ion Batteries in New Energy Vehicles[J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(03): 38-49.
- [9] WANG H, TAO T, XU J, et al. Thermal performance of a liquid-immersed battery thermal management system for lithium-ion pouch batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 46: 103835. DOI: 10.1016/j.est.2021.103835
- [10] LIU J, MA Q, LI X. Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 66: 107511. DOI: 10.1016/j.est.2023.107511
- [11] SONG C, KONG B, ZENG Z, et al. Innovative coupled cooling strategy for enhanced battery thermal management: Synergistic optimization of jet impingement and immersion cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 232: 125963. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125963
- [12] 陈巨龙, 王祥, 杨婕睿. 多应用场景下贵州电化学储能商业模式研究[J]. 中国能源, 2021, 43(11): 73-80.
- [12] CHEN J, WANG X, YANG J. Study on the business model of electrochemical energy storage in Guizhou Province under multiple application scenarios[J]. Energy of China, 2021, 43(11): 73-80
- [13] 薛颖慧. K 电化学储能电站运营经济性分析及优化策略[D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [13] XUE Y. Operation economy analysis and optimization strategy of K electrochemical energy storage power station[D]. North China Electric Power University (Beijing), 2023.
- [14] 韩龙进. 大工业用户侧储能项目的经济性评估[D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [14] Han L. Economic evaluation of large industrial user side energy storage projects[D]. North China Electric Power University (Beijing), 2023.
- [15] 梁毅, 田思源, 张颖. 用户侧储能经济性研究[J]. 中外能源, 2024, 29(10): 18-28.
- [15] LIANG Y, TIAN S, ZHANG Y. Research on Economy of user-side energy storage[J]. Sino-Global Energy, 2024, 29(10): 18-28.
- [16] 李岳峰, 徐卫潘, 韦银涛, 等. 储能锂电池包浸没式液冷

系统散热设计及热仿真分析[J].储能科学与技术,2024,13(10):3534-3544.

LI Y, XU W, WEI Y, et al. Thermal Design and Simulation Analysis of An Immersing Liquid Cooling System for Lithium-ions Battery Packs in Energy Storage Applications[J]. Energy Storage Science and Technology,2024,13(10):3534-3544.

- [17] 张同坤.储能锂离子电池组液冷系统散热及运行研究[D].山东大学.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2024.003218.

ZHANG T. A study on heat dissipation and operation of liquid cooling system of lithium_ion battery pack for energy storage[D].Shandong University(Jinan),2024.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2024.003218.

- [18] 付长江.集装箱储能系统中电池风冷散热需求及空调能耗研究[D].天津商业大学,2023.DOI:10.27362/d.cnki.gtsxy.2023.000116.

FU C. Research on battery air cooling heat dissipation and energy consumption of air conditioning in container energy storage system[D].Tianjin University of Commerce,2023. DOI:10.27362/d.cnki.gtsxy.2023.000116.

收稿日期：2025-05-16。

作者简介：



李伟航

李伟航(2002)，男，硕士研究生，研究方向为储能热管理技术，eins594@163.com。



巨星

巨星(1982)，男，博士，教授，研究方向为储能系统热管理，安全与监测，scottju@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)