

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.020

液冷式锂电池储能系统高倍率调频应用研究

雷博¹, 吴越¹, 史尤杰¹, 曹文灵², 王亦伟², 蒋方明²

(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663;

2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

摘要: 针对风光能源规模化接入电网造成的频率波动问题,提出了结合功率型锂电池及液冷式热管理的储能系统。基于实验测试获取了功率型锂电池的电热特性,结果表明高倍率工况下仅依靠自然对流散热不能满足电池合理工作温度需求。建立了液冷式热管理系统及其仿真模型,并通过数值仿真对4C倍率放电、不同流量以及实际AGC调频工况条件下系统热管理性能及电池热行为进行了分析。研究表明实际AGC调频工况下,电池间温差小于2℃,最高温度小于33℃,证明了液冷式热管理方案能够实现储能系统在高倍率调频工况下的长期稳定运行。

关键词: 锂电池; 储能系统; 液冷热管理; 调频

Research on Liquid-cooling Li-ion Battery Energy Storage System in High Frequency Regulation Application

LEI Bo¹, WU Yue¹, SHI Youjie¹, CAO Wenjing², WANG Yiwei², JIANG Fangming²

(1. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the frequency fluctuation due to the massive access of wind and solar energy to the grid, an energy storage system combining power-type lithium battery and liquid cooling thermal management is proposed. The electrical and thermal characteristics of the power type lithium battery are obtained based on the experimental tests. The results show that only with the natural convection heat dissipation cannot meet the proper operating temperature of the battery under high rate conditions. The liquid cooling thermal management system and its simulation model are set up. By numerical simulation, the thermal management performance of the system and the thermal behavior of the battery are analyzed under 4C rate discharge, different flow rates and actual AGC frequency regulation conditions. The research shows that the temperature difference between batteries is less than 2℃ and the maximum temperature is less than 33℃ under the actual AGC frequency regulation condition. It proves that the liquid-cooled thermal management scheme can realize the long-term stable operation of the energy storage system under high rate frequency regulation conditions.

Keywords: lithium ion battery; energy storage system; liquid cooling thermal management; frequency regulation

0 引言

随着我国“双碳”战略的持续推进和能源需求的不断增长,发展风能、光伏等绿色能源替代传统化石能源是实现我国能源结构调整的重要途径^[1-5]。然而,由于风能及光伏发电自身存在的波动特性和间歇特性,当电网中风光渗透率达到一定程度后,

其功率波动或故障退出将导致发电侧和负荷侧功率的不平衡,进而对电网频率稳定性和电力系统安全性造成冲击^[7-9]。因此,在规模化风光接入电网条件下,对高响应速率、高调节容量的储能系统需求也将相应增高^[10]。

近年来,以锂离子电池为主的电化学储能系统发展迅速^[11-13]。锂离子电池具有能量转换效率高、系统

收稿日期:2023-11-18

基金项目:直流输电技术国家重点实验室开放基金(SKLHVDC-2021-KF-01)。

响应快、寿命长、比能量密度大等特性^[14-15],规模化应用于电网调频及平抑波动应用场景时,具备短时功率吞吐能力强、快速响应与精确跟踪等能力^[16]。目前制约锂电池储能系统在调频工况及平抑波动等场景的应用主要在于经济性和安全性两方面^[17]。从经济性角度而言,尽管锂电池单位瓦时成本远低于超级电容,但其倍率性能较低,配组时需要的电池数量更多,从而影响整体系统集成成本^[18]。从安全性角度而言,当采用较高倍率运行锂电池储能系统时,则产热量过大,使电池温度显著升高。锂离子电池的性能受温度的影响很大,温度过高以及分布不均匀会加速电池性能的衰退,降低电池的使用寿命,甚至还能产生热失控引发安全问题^[19-21]。

针对上述问题,本文探讨了功率型磷酸铁锂电池在高倍率调频及平抑波动场景的适用性。首先,对单体电池电、热特性进行了测试分析,在此基础上提出了高倍率应用场景下液冷式热管理方案,并进行了4 MW/1MWh调频用锂电储能系统设计;其次,构建了电池系统三维电-热-流体耦合仿真模型,并通过实验测试对液冷式热管理性能及模型仿真精度进行了验证;最后,基于数值仿真分析了热管理系统全天候多工况适应性。

1 功率型磷酸铁锂电池电热特性分析

为满足大倍率充放电需求,功率型锂电池在电芯制造过程采用更小的电极材料颗粒粒径及更薄的电

极厚度,以提升离子电导性能,降低极化阻抗^[22-27]。本文选取100 Ah功率型磷酸铁锂电池进行研究,采用一阶等效电路模型描述其电行为,通过实验测试获取其开路电压及内阻,实验测试系统见图1。

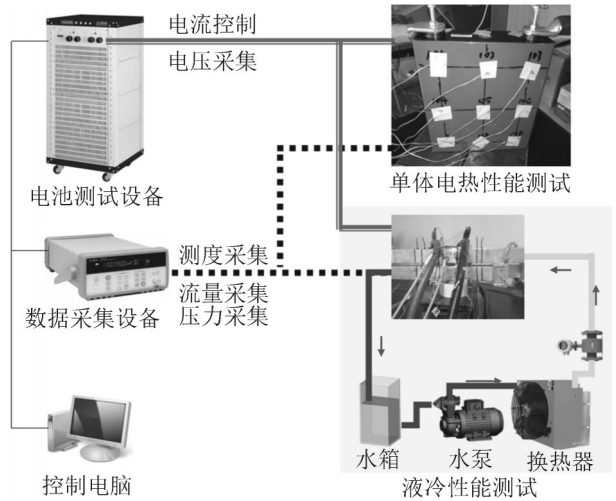


图1 电池测试系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of battery testing system

欧姆内阻是影响锂离子电池性能的重要参数,其包括电解液阻抗与外部连接电路阻抗^[28-31]。在一定温度与SOC条件下,电池的欧姆阻抗可由脉冲充放电试验(HPPC)确定^[32],在复合脉冲功率特性脉冲充放电电流激励下,根据电池端电压的压降与电流可计算得到该荷电状态时电池的欧姆内阻 R_o 、极化内阻 R_p 和极化电容 C_p 。电池一阶等效电路测试结果见图2。

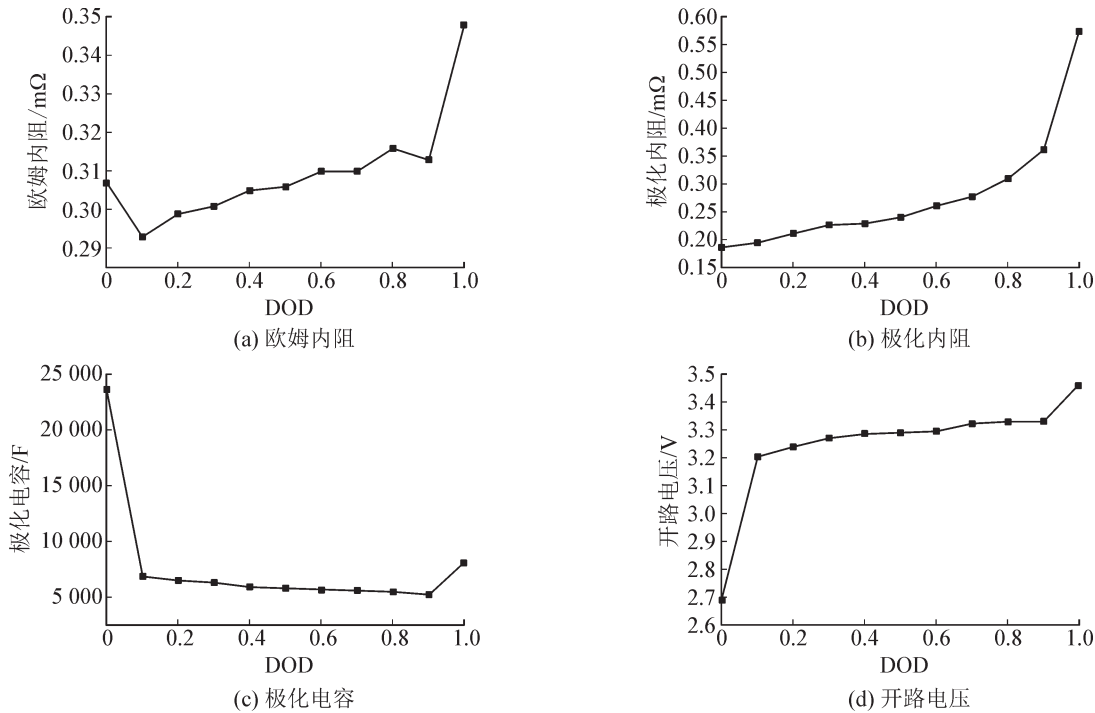


图2 电池一阶等效电路参数测试结果
Fig. 2 Test results of first-order equivalent circuit model of battery

电池的欧姆内阻见图 2(a),从图中可以看出电池的欧姆内阻在放电中期基本保持不变,放电末期欧姆内阻略微增加,整体处于 0.29~0.35 mΩ 区间。电池的极化内阻见图 2(b),可以看出放电后期极化内阻逐渐增大。电池极化电容见图 2(c),由极化电容随放电深度的变化曲线可以看出电池的极化电容与极化内阻呈负相关。总体而言,功率型磷酸铁锂电池欧姆内阻与极化内阻均小于相同容量的能量型电池,能够获得更好的倍率性能并降低产热。为了通过等效电路模型及产热模型实时获取电行为及产热量,在 HPPC 测试中同时获取了电池开路电压随荷电状态的变化情况,见图 2(d)。

图 3 为 1C 及 4C 放电倍率下电池温升曲线。实验中采用空气自然对流散热,测试环境温度为 25℃。可以看出,1C 倍率放电末期电池温度达 30℃,整个放电过程电池温升约 5℃,满足锂电池工作温度范围要求。而在 4C 倍率下,放电末期电池温度达 45℃,温升约 20℃。实验结果表明在大倍率充放电条件下,即使采用功率型锂离子电池,被动耗散式的热管理方案仍不能满足电池系统长期

稳定运行的工作温度需求,需要采用更高换热效率的主动式热管理方案。

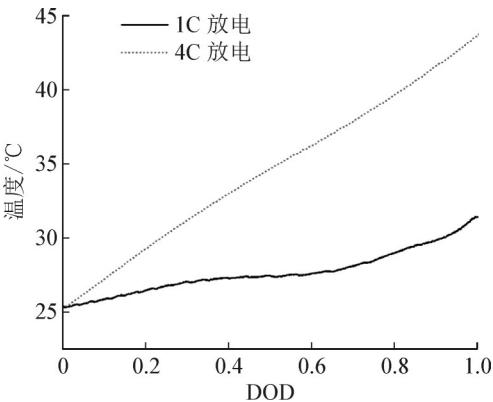


图3 不同放电倍率下电池温升测试结果
Fig. 3 Test results of temperature rise of battery under different discharge rate

2 基于液冷的热管理系统集成及仿真建模

2.1 4 MW/1 MWh 液冷式储能系统集成设计

为了满足高倍率调频及平抑波动工况下锂电池储能系统工作温度要求,本文采用了液冷式热管理方案,电芯到系统的液冷集成设计见图 4。

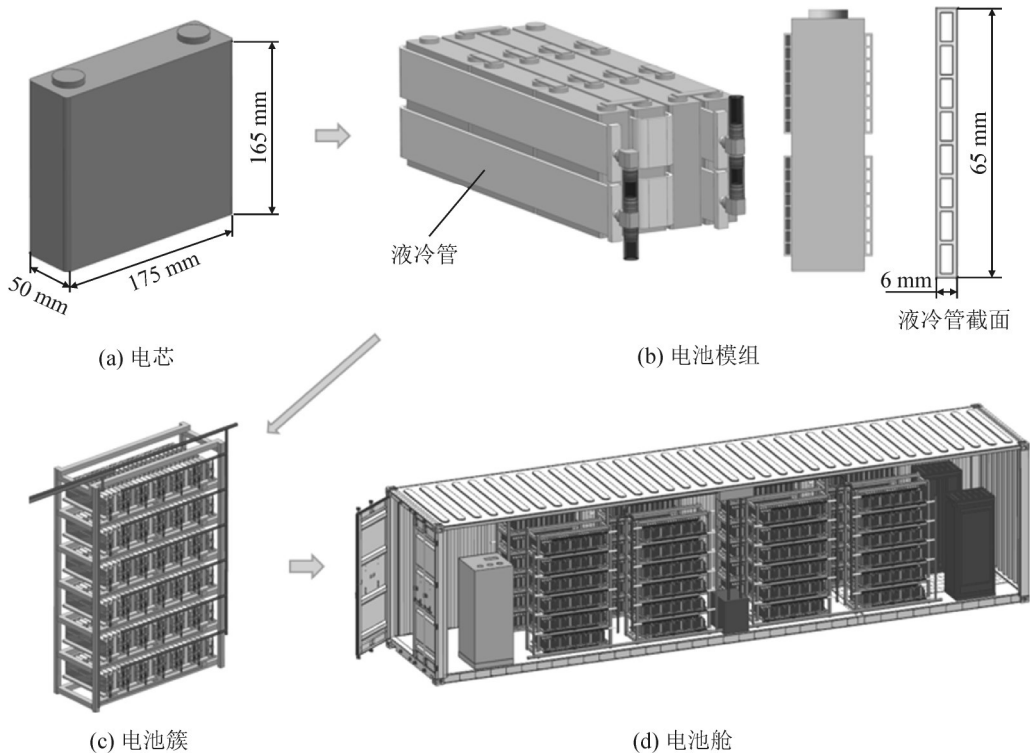


图4 液冷式锂电储能系统集成示意图
Fig. 4 Schematic diagram of liquid-cooled lithium energy storage system integration

电芯尺寸如图 4(a)所示,电池模组采用 1P12S 连接方式,按 3 排 4 列成组,如图 4(b)所示。液冷通道采用 65 mm 宽、6 mm 厚的微通道铝型材扁管,折弯并焊接接头后与电池装配成组。12 个电池模块

串联构成电池簇,在电池层架上分两层托盘放置,便于模块化维护。电池模块间的冷却管路采用串联布局,各层间冷却管路采用并联布局。图 4(d)为整体电池舱内液冷系统布局。电池舱内设置 8 个电池

架,分别列于箱内两侧,并独立配备水泵及换热器。

2.2 电-热-流体耦合仿真模型

本文基于一阶等效电路构建了锂电池电模型,将电池等效为由若干电阻、电容、电感和电源等组成的等效电路,根据电流曲线实时计算电池端电压,进而计算电池产热量^[33]。

$$U=U_{ocv}+IR_{\Omega}+U_p(0)\cdot e^{\frac{t}{R_pC_p}}+IR_p(1-e^{\frac{t}{R_pC_p}})$$

(1)

$$Q_{gen}=Q_{ir}+Q_{re}=I(U_{ocv}-U)-IT\frac{dU_{ocv}}{dT}$$

(2)

式(1)为端电压计算方程,其中开路电压 U_{ocv} 、欧姆内阻 R_{Ω} 、极化内阻 R_p 及极化电容 C_p 为测量值,结果列于图2中。式(2)为电池产热模型,由不可逆热 Q_{ir} 和可逆熵热 Q_{re} 组成。 dU_{ocv}/dT 为熵热系数,由实验测量获得^[34],见图5。

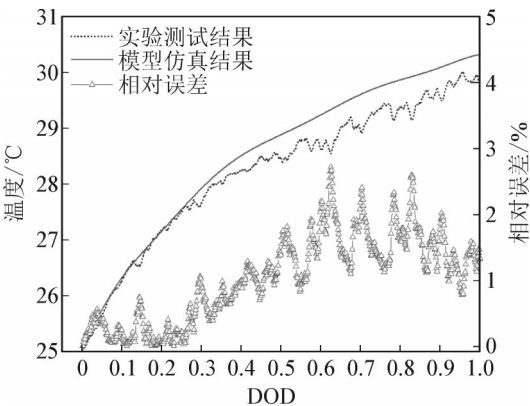


图5 仿真模型实验验证
Fig. 5 Experimental validation of simulation model

热-流耦合过程仿真采用了 Fluent 软件,电模型和产热模型均采用自定义函数(UDF)编写程序代码。基于有限体积方法(finite volume method, FVM)求解偏微分方程组,包括流体连续性方程(式3)、动量守恒方程(式4)、流体能量方程(式5)以及电池等固体域能量方程(式6)。空间导数项采用一阶迎风差分格式,时间导数项采用全隐差分格式,采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equation)方法处理压力和速度的耦合。求解所用物性参数见表1。

表1 工质、液冷管道和电池的热物性参数
Table 1 Thermal properties of working fluid, cooling pipe and battery

物性	工质	液冷管道	电池
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 075	2 719	1 855.9
导热系数 $k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.387	871	厚度方向 1.2 平面方向 20.0
比热容 $c_{pr}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	3 300	202.4	1 343
粘度 $\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.001 5	—	—

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\times(\rho u)=0$$

(3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\nabla\times(\rho uu)=-\nabla P+\nabla\times(\mu\nabla u)$$

(4)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T)+\nabla\times(\rho c_p uT)=\nabla\times(k\nabla T)$$

(5)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T)=\nabla\times(k\nabla T)+Q_{gen}$$

(6)

2.3 模型验证

为了验证电池产热模型及液冷热管理仿真的准确性,采用图1实验系统对单电池4C倍率放电工况下液冷性能进行了测试,并进行了仿真模型验证。实验及仿真中系统初始温度为25℃,液冷循环流量为3 L/min,入口温度恒定为25℃。

图5为采用液冷散热条件下单电芯4C放电过程温升曲线对比,温度测点选取在电池本体靠近正极侧位置。可以看出,在液冷管控下,4C放电过程电池温升仅为5℃,远小于自然对流散热条件下电池温升。升温规律及最高温度均与实验接近,最大相对误差在3%以内,证明本模型合理有效。

3 高倍率调频工况热管理性能分析

基于建立的数值仿真模型,本文研究了该液冷储能系统在4C倍率放电、不同冷却工质流量以及4C倍率AGC调频工况的热管理能力^[35],计算算例设置见表2。

表2 仿真算例设置
Table 2 Simulation calculation setup

算例编号	计算参数
Case ₁ (标准算例)	4C倍率恒流放电;每个模块分配冷却工质流量为3 L/min;工质入流温度25℃,系统初始温度25℃
Case ₂	4C放电,每个模块分配冷却工质流量为1.5 L/min,其余同Case ₁
Case ₃	AGC调频工况充放电倍率,其余同Case ₁

3.1 4C倍率恒流放电工况下液冷性能分析

图6为4C放电过程电池温度场分布演化结果。随着放电过程的进行,电池温度逐渐增加,达到放电截止时,电池最高温度约为32.8℃,处于理想工作温度范围。电池间温差逐渐增大,至放电结束时,电池间温差约为3℃。

图7为电池最高温度上升曲线及出口流体温度曲线。随着放电的进行,电池最高温度及出口流体温度均逐渐上升,放电截止时电池最高温升为7.8℃,冷却工质温升约为4.1℃。图7显示了在液冷条件影响下,电池温升不再为线性上升,而是具有抛物线形特征,即初期电池升温较快,随着放电

的进行升温逐渐趋于平缓。这是因为入口水温恒定,电池温度逐渐上升时流-固温差逐渐增大,冷却工质换热量也相应提升。当冷却工质换热量与电池发热量相等时,电池温度将不再增加,达到温度平衡状态。这一规律在实验测试中也有所体现,也说明该冷却方案能够在长期充放电运行工况下将电池维持在合理的使用温度内。

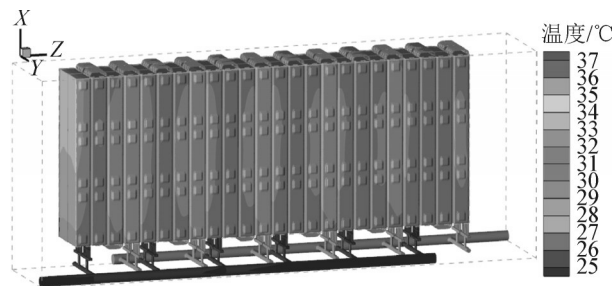


图6 4C放电过程电池温度分布
Fig. 6 Temperature distribution during 4C discharge

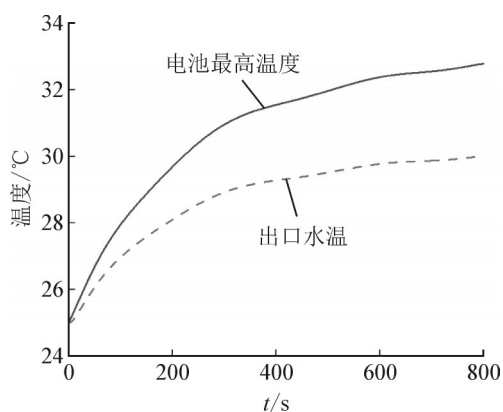


图7 4C放电过程电池最高温升及出口水温曲线
Fig. 7 Maximum temperature rise of battery and outlet water temperature curve during 4C discharge

3.2 不同循环流量对液冷性能的影响

Case₂研究了冷却工质流量对热管理性能的影响。一般而言,工质循环流量越高对流换热越强,散热性能越好,但消耗泵功也越大。图8为电池模组内循环流量 1.5 L/min 条件下 4C 放电过程温度场分布演化。当电池模组冷却工质流量降低至 1.5 L/min 时,放电末期电池最高温度为 36℃,电池间最大温差达到 7℃。这是因为冷却工质流量降低意味着其通道内物理速度降低,在液冷管路内驻留时间更长,出口位置工质温度相对高循环流量工况下更高,造成进出口位置换热性能差异更大,进而导致更大电池温差。电池长期处于较大温差下工作,会导致其老化衰退的不一致性,影响系统整体性能,因此较低的循环流量不利于系统的长寿命运行。

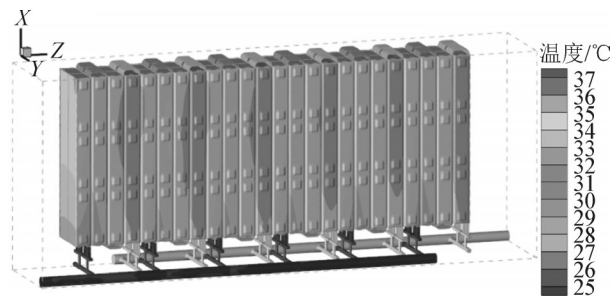


图8 1.5 L/min/module 工质流量分配下 4C 放电电池温度分布

Fig. 8 Temperature distribution at 4C discharge with 1.5 L/min/module coolant flow rate

图9为 1.5 L/min 冷却工质循环流量条件下 4C 放电过程电池最高温度及出口水温曲线,相比高循环流量工况,该流量下电池温升速率更快,放电截止时电池最高温升为 11℃,出口水温温升为 9℃。

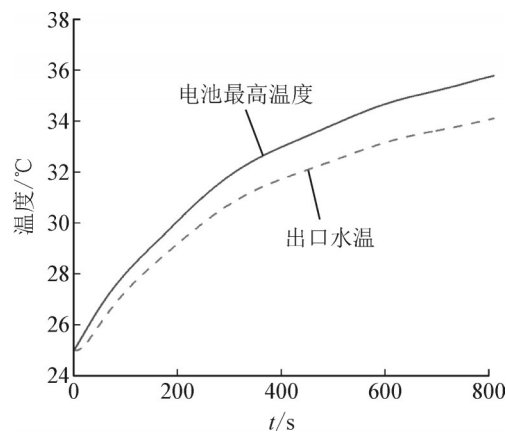


图9 1.5 L/min/module 工质流量分配下电池温升及出口水温

Fig. 9 Temperature rise of battery and outlet water temperature with 1.5 L/min/module coolant flow rate

3.3 高倍率调频及平抑波动工况热管理性能

电网频率变化是电网功率不平衡的累计结果。实际 AGC 通常是一个长周期持续的调频任务,对应储能系统将根据需求不断充放电。图 10(a)为一个实际锂电池调频机组正常运行工况下电池侧电流曲线。根据 SOC 区间及本文所用功率型 100 Ah 电池电热特性,采用式(2)计算了 15 000 S 内电池发热量曲线,见图 10(b)。

图 11 为 4C 调频工况长周期运行下,系统内电池最高温度演化曲线及出口水温曲线。由于传热过程的响应时间远大于电流变化速率,系统中电池最高温度变化及出口水温相比电流曲线和产热量曲线更为平滑。当系统长期处于 4C 倍率充放循环,即产热量长期维持在 65 000 W/m³左右时,电池最高温度不超过 33.5℃。

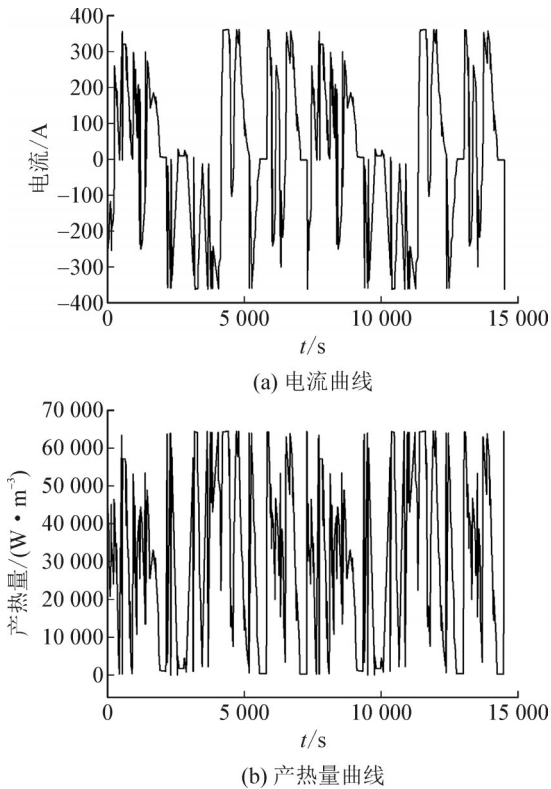


图 10 实际调频工况下电流曲线及发热量曲线
Fig. 10 Current and heating curve at frequency regulation

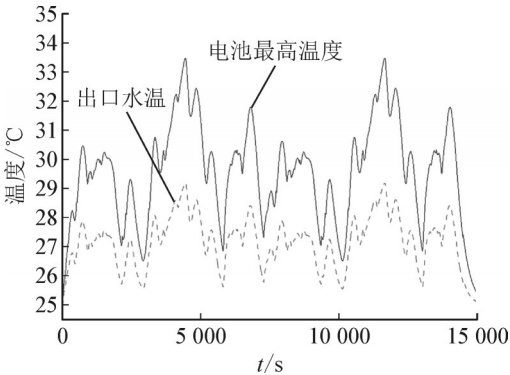


图 11 实际调频工况下电池温升及出口水温
Fig. 11 Temperature rise of battery and outlet temperature of actual frequency regulation

图 12 为相对稳定状态下电池温度场分布,电芯间温差约在 2℃以内。以上结果证明本液冷系统方案能够满足 4C 倍率调频长期运行的有效热管理。

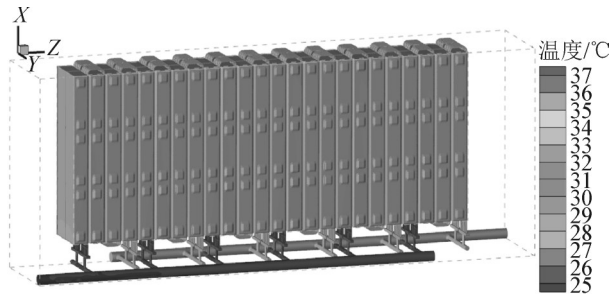


图 12 实际调频工况下电池温度分布
Fig. 12 Temperature distribution of battery at actual frequency regulation

4 结语

对 100 Ah 磷酸铁锂电池开展了电热行为测试,在相对封闭环境及环境温度 25℃条件下,4C 倍率充放电过程中单体电池最高温度将接近 50℃,不能满足调频工况需求。同时,通过实验还获取了该电池的开路电压及充放电过程端电压随 SOC/DOD 变化规律,为热仿真模型提供参数。

开展了基于液冷式热管理的电池成组方案设计,并通过数值仿真对 4C 倍率放电、不同流量以及实际 AGC 调频工况条件下系统热管理性能及电池热行为进行了分析。实际 AGC 调频工况下,电池间温差小于 2℃,最高温度小于 33℃,证明了液冷式热管理方案能够实现 4C 倍率下系统的长期稳定运行。

参考文献

[1] YANG Pingjian,PENG Shuan,BENANI N,et al. An integrated evaluation on China's provincial Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134497.

[2] 王深,吕连宏,张保留,等. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J]. 环境科学研究,2021,34(9): 2044-2055.

WANG Shen,LYU Lianhong,ZHANG Baoli,et al. Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking Carbon dioxide emissions and Carbon neutrality[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(9): 2044-2055.

[3] 阮前途,陈赟,潘智俊. 新型电力系统对实现沿海城市双碳目标贡献的探讨[J]. 电力系统自动化,2022,46(14): 11-18.

RUAN Qiantu,CHEN Yun,PAN Zhijun. Discussion on contributions of novel power system to achieving Carbon emission peak and Carbon neutrality of coastal city[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(14): 11-18.

[4] 陈海生,刘畅,徐玉杰,等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术,2021,10(5): 1477-1485.

CHEN Haisheng,LIU Chang,XU Yujie,et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology,2021,10(5): 1477-1485.

[5] HUO T,XU L,LIU B,et al. China's commercial building carbon emissions toward 2060: An integrated dynamic emission assessment model[J]. Applied Energy, 2022 (325),119828.

[6] LEHTOLA T,ZAHEDI A. Solar energy and wind power supply supported by storage technology: A review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019

- (35): 25-31.
- [7] 刘根才,陆志欣,杨智诚,等. 考虑SOC均衡的分布式储能聚合控制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 174-181.
- LIU Gencai, LU Zhixin, YANG Zhicheng, et al. Distributed energy storage aggregation control method considering SOC equalization[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 174-181.
- [8] MERKERT LENNART A A H, SÖREN H. Optimal scheduling of combined heat and power generation units using the thermal inertia of the connected district heating grid as energy storage[J]. Energies, 2019, 12(2): 266-275.
- [9] ARBABZADEH, MARYAM, JEREMIAH X, et al. Parameters driving environmental performance of energy storage systems across grid applications[J]. Journal of Energy Storage, 2017(12): 11-28.
- [10] AKTAS A, ERHAN K, ÖZDEMİR S, et al. Dynamic energy management for photovoltaic power system including hybrid energy storage in smart grid applications[J]. Energy, 2018(162): 7282.
- [11] DIOUF, BOUCAR, PODE R. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy[J]. Renewable Energy, 2015(76): 375-380.
- [12] SHAHJALAL M, ROY P K, SHAMS T, et al. A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues[J]. Energy, 2022(241): 122881.
- [13] TAHIR M U, ANEES M, KHAN H A, et al. Modeling and evaluation of nickel manganese cobalt based Li-ion storage for stationary applications[J]. Journal of Energy Storage, 2021(36): 102346.
- [14] DENG Da. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges[J]. Energy Science & Engineering, 2015, 3(5): 385-418.
- [15] DIOUF, BOUCAR, PODE R. Potential of Lithium-ion batteries in renewable energy[J]. Renewable Energy 2015(76): 375-380.
- [16] 王陈园,傅春明,张文赋,等. 基于多电池组SOC一致性的光储联合电站平抑策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 237-244.
- WANG Chenyuan, FU Chunming, ZHANG Wenfu, et al. Study on stabilization strategy of photovoltaic-storage combined power station based on SOC consistency of multi-battery pack[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 237-244.
- [17] MARSZAL E, BRYAN A. Risk assessment and safeguarding of Lithium-ion battery containing facilities[J]. Process Safety Progress, 2022, 41(3): 449-454.
- [18] MAHDI R. Seyed mohammad taghi bathae, masoud aliakbar golkar. dynamic modeling and nonlinear control of fuel cell vehicles with different hybrid power sources[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016(41): 3185-3198.
- [19] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of Lithium-ion batteries: A review [J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 178-192.
- [20] 董缙,彭鹏,曹文昊,等. 锂离子电池热管理和安全性研究[J]. 新能源进展, 2019, 7(1): 50-59.
- DONG Ti, PENG Peng, CAO Wenjiong, et al. Research on thermal management and safety of Li-ion batteries[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(1): 50-59.
- [21] KANG D, LEE P Y, YOO K, et al. Internal thermal network model-based inner temperature distribution of high-power Lithium-ion battery packs with different shapes for thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2020(27): 101017.
- [22] 朱卫平,陈国旺,卫志农,等. 基于VFFRLS算法的锂电池参数辨识[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 226-233.
- ZHU Weiping, CHEN Guowang, WEI Zhinong, et al. Parameter identification of Lithium-ion battery based on least squares algorithm with variable forgetting factor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 226-233.
- [23] 王骏骏. 基于ICS-LSSVM的电动汽车锂电池SOC预测[J]. 东北电力技术, 2022, 43(12): 52-56.
- WANG Junjun. SOC Prediction of electric vehicle Lithium battery based on ICS-LSSVM[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(12): 52-56.
- [24] 薄利明,郑惠萍,张世锋,等. 锂电池健康状态均衡技术综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 11-18.
- BO Liming, ZHENG Huiping, ZHANG Shifeng, et al. Review on health state equalization technology for Lithium batteries[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 11-18.
- [25] 邓子豪,夏向阳,张嘉诚. 磷酸铁锂电池优化多因子状态在线评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(3): 90-96.
- DENG Zihao, XIA Xiangyang, ZHANG Jiacheng. An optimized multi-factor online assessment method of SOH for LiFePO₄ batteries[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 90-96.
- [26] 尚彦赞,宋红为,杨照光,等. 基于二阶RC模型的锂电池充放电特性分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 87-94.
- SHANG Yanyun, SONG Hongwei, YANG Zhaoguang, et al. Charge and discharge characteristics analysis of Lithium battery based on second-order RC model[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 87-94.
- [27] 付建哲,郭昆丽,闫东. 一种基于简化ADRC的混合储能系统改进低通滤波策略[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(6): 80-85.

- FU Jianzhe, GUO Kunli, YAN Dong. An improved low pass filter strategy for hybrid energy storage system of based on simplified ADRC[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(6): 80-85.
- [28] 张志行, 韩雪冰, 冯旭宁, 等. 面向不同电流工况的锂离子电池改进EECM研究[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 2-12.
ZHANG Zhihang, HAN Xuebing, FENG Xuning, et al. Improved EECM for Lithium-ion batteries under different current conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 2-12.
- [29] 彭鹏, 林达, 汪湘晋, 等. 基于局部异常因子的锂离子电池储能系统故障诊断[J]. 浙江电力, 2023, 42(5): 11-17.
PENG Peng, LIN Da, WANG Xiangjin, et al. Fault diagnosis of Lithium-ion battery energy storage systems based on local outlier factor[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 11-17.
- [30] 向铭, 何怡刚, 张慧. 基于改进集成经验模态分解和高斯过程回归的锂离子电池剩余容量及寿命预测方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 27-33.
XIANG Ming, HE Yigang, ZHANG Hui. Capacity and remaining useful life prediction of Lithium-ion battery based on MEEMD and GPR[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 27-33.
- [31] 李正力, 李肖辉, 王京, 等. 锂离子电池储能电站热失控预警与防护研究进展[J]. 高压电器, 2023, 60(1): 87-99.
LI Zhengli, LI Xiaohui, WANG Jing, et al. Research progress on thermal runaway warning and protection of Lithium-ion battery in energy storage power station [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 60(1): 87-99.
- [32] Freedom CAR battery test manual for power-assist hybrid electric vehicles : DOE/ID-11069 [S]. Environmental Idaho National Engineering and Laboratory.
- [33] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for batter systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132: 5.
- [34] 王康康, 高飞, 杨凯, 等. 不同健康状态等级的储能磷酸铁锂电池熵变系数及放电产热研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2241-2248.
WANG Kangkang, GAO Fei, YANG Kai, et al. Research of LiFePO₄/C energy storage batteries' entropy coefficient and discharge heat generation based on the state of health[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2241-2248.
- [35] 孙丙香, 李旻熙, 龚敏明, 等. 参与AGC辅助服务的锂离子电池储能系统经济性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4048-4061.
SUN Bingxiang, LI Yangxi, GONG Minming, et al. Study on the economy of energy storage system with Lithium-ion battery participating in AGC auxiliary service[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4048-4061.

作者简介:

雷博(1989—), 男, 工程师, 主要从事储能系统集成及技术经济性评估工作。

吴越(1994—), 男, 工程师, 主要从事储能系统集成及功率控制系统设计工作。

史尤杰(1991—), 男, 高级工程师, 主要从事中高压大容量电力电子变换技术工作。

曹文灵(1983—), 男, 博士, 主要从事电化学储能系统多尺度多场耦合仿真、热-安全管理。

王亦伟(1985—), 男, 博士, 主要从事锂电池热管理系统研发及安全性测试工作。

蒋方明(1973—), 男, 博士生导师, 研究方向为电化学(包括锂电池和燃料电池)能源动力、地热能高效开发和利用等。