DOI: 10.19666/j.rlfd.202510015

水系有机液流电池储能辅助火电机组AGC调频技术的可行性研究

许霖帆[1]，兀鹏越[1]，郑 昀[2]，王 烽[2]，王 晶[3]，康 祯[1]，
郭 昊[1]，林怡玢[2]，刘旭华[1]，李志鹏[1]
（1. 西安热工研究院有限公司，西安 710054；
2. 华能罗源发电有限责任公司，福州 350602；
3. 宿迁时代储能科技有限公司，宿迁 223805）

［摘 要］【目的】为适应高比例新能源并网对电网频率稳定性的紧迫要求，解决火电机组调频响应速度慢的问题，水系有机液流电池凭借其循环寿命长和自放电率低等优点，成为适合调频场景的技术选择。【方法】介绍了一种以水系有机液流电池作储能的火储联合 AGC 调频技术，论述了火储协同技术和水系有机液流电池的基本原理，测试了液流电池的核心性能参数，提出了液流电池辅助火电机组的调频控制策略，并将其应用于罗源电厂 200 kW/400 kW·h 火储联合调频示范工程项目。【结果】实际运行情况和分析测试结果表明，水系有机液流电池具备快速调节和精确输出的响应特性，可增强联合系统的调频能力。【结论】将水系有机液流电池应用于火电调频具有可行性。

［关 键 词］水系有机液流电池；储能；火电机组；AGC 调频；功率响应

［引用本文格式］许霖帆，兀鹏越，郑昀，等. 水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频技术的可行性研究[J]. 热力发电，2026, 55(2): 86-94. XU Linfan, WU Pengyue, ZHENG Yun, et al. Feasibility study of AGC frequency regulation technology for aqueous organic redox flow battery energy storage assisted thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(2): 86-94.

Feasibility study of AGC frequency regulation technology for aqueous organic redox flow battery energy storage assisted thermal power units

XU Linfan[1], WU Pengyue[1], ZHENG Yun[2], WANG Feng[2], WANG Jing[3], KANG Zhen[1],
GUO Hao[1], LIN Yibin[2], LIU Xuhua[1], LI Zhipeng[1]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Luoyuan Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350602, China;
3. Suqian Time Energy Storage Technology Co., Ltd., Suqian 223805, China)

Abstract: [Objective] To address the pressing demand for grid frequency stability under high-proportion renewable energy integration and mitigate the slow frequency regulation response of thermal power units, aqueous organic redox flow batteries (AORFBs) have emerged as a viable technical solution for frequency regulation scenarios due to their advantages of long cycle life and low self-discharge rate. [Methods] A thermal-storage combined AGC frequency regulation technology utilizing AORFBs for energy storage is presented. The fundamental principles of coordinated thermal-storage technology and AORFBs are elaborated, the core performance parameters of flow batteries are tested, a frequency regulation control strategy for AORFBs-assisted thermal power units is proposed, and this approach is applied to the 200 kW/400 kW·h thermal-storage combined frequency regulation demonstration project at Luoyuan Power Plant. [Results] Operational data and analytical testing demonstrate that AORFBs exhibit rapid regulation and precise output response characteristics, thereby enhancing the frequency regulation capability of the combined system. [Conclusion] Applying AORFBs to thermal power frequency regulation is feasible.
Key words: aqueous organic redox flow battery; energy storage; thermal power unit; AGC frequency regulation; power response

收 稿 日 期：2025-10-11 修 回 日 期：2025-10-21 接 受 日 期：2025-11-05 网络首发日期：2025-12-17
基 金 项 目：中国华能集团有限公司总部科技项目（HNKJ24-H84）
Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ24-H84)
第一作者简介：许霖帆（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为新型储能调频技术，2317187009@qq.com。

随着可再生能源比例的持续攀升，电网频率波动加剧[1]。传统火电机组因响应滞后[2]、调节精度差[3]，难以满足快速调频需求[4]。通过配置储能系统，将储能与火电协同运行[5]，可显著提升火电机组的整体调频性能[6]。水系有机液流电池（aqueous organic redox flow battery，AORFB）因安全性高、循环寿命长、具备秒级响应能力[7]，能有效弥补火电调节缺陷，被视为调频储能领域的新路线[8]。

目前已有对于液流电池的研究主要集中在液流电池的性能状态研究以及在调峰领域中的应用。王天虎等[9]建立了锌溴液流电池的二维瞬态模型，系统研究了电流密度对电池性能的影响，结果表明电流密度增大导致过电势增大，降低电压效率。邱亚等[10]采用 PCMAC-PID 复合控制策略通过前馈-反馈协同机制，有效提升了全钒液流电池储能系统的功率控制响应速度和鲁棒性。李军徽等[11]提出锌溴液流电池储能系统的优化控制策略，并基于东北地区的实际数据验证了液流电池储能在调峰场景下的寻优效果和经济可持续性。

现阶段液流电池作为长时储能介质在调峰场景的应用效果已得到证实，但其在短时高频的电力调频应用仍未明确。此前国内在工程领域尚无液流电池储能辅助机组调频实际案例。华能罗源电厂于 2024 年 12 月建成的 200 kW/400 kW·h 大容量水系有机液流电池火储联合调频示范系统，是国内首个液流电池储能耦合火电 AGC 调频工程。项目通过水系有机液流电池与火电机组协同作为整体来响应电网调频调节，提升了机组的调频性能。伴随电力系统对调频响应速度与频率稳定性要求的持续提高，这一新型调频方案展现出较好的应用前景。

本文针对水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频技术开展研究，测试了调频型液流电池的关键性能参数，设计了一种液流电池耦合机组的调频控制策略，提出了耦合控制方案，并基于华能罗源电厂火储联合调频系统进行现场验证，实际运行数据显示水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频效果显著，验证了液流电池储能用于火电调频的技术可行性。

1 水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频技术

1.1 火储技术原理

储能辅助火电 AGC 调频技术原理如图 1 所示。当电网调度下发 AGC 指令至火电机组时，储能系统同时获取该指令[12]。鉴于火电机组响应存在分钟级延迟[13]，储能系统凭借其秒级快速响应能力[14]，优先补偿指令与机组实际出力之间的短期功率缺额[15]。随着机组出力逐渐接近指令要求，储能系统输出功率逐步降低，确保联合输出持续稳定跟踪 AGC 指令，并为后续调节做好准备。

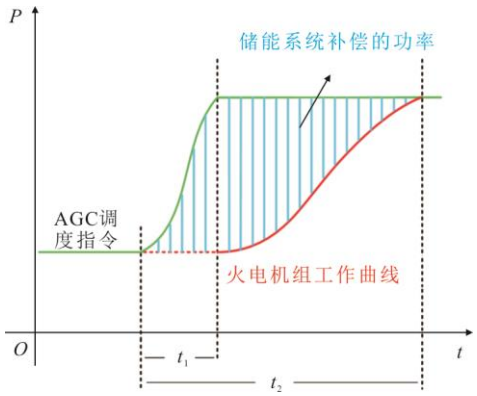


图 1 火储调频技术原理

Fig.1 The principle of frequency regulation technology for a storage-assisted thermal power unit

1.2 水系有机液流电池用于调频的优势

在各类液流电池技术中，水系有机液流电池作为一种新兴储能方案[16]，以水基电解质与有机活性物质为核心材料，凭借高效的响应特性，能够有效缓解火电机组调频压力，适配火电机组调频场景[17]。图 2 为水系有机液流电池工作示意图。正负极电解液在循环泵驱动下进入电堆，于电极表面发生氧化还原反应实现电能与化学能转换，反应后的电解液回流至储罐重复利用[18]。

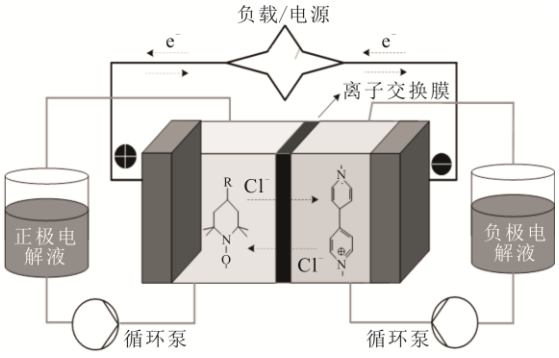


图 2 水系有机液流电池工作示意

Fig.2 Schematic diagram of the operation of an AORFB

水系有机液流电池凭借电解液活性物质的自恢复能力，在电网调频中展现多项核心优势[19]：

1）自放电低，能规避非工作状态电量损耗，保障长期备用时的可调功率，避免调频响应衰减；

2）充放电快速高效且调频速度快，能精准匹配电网秒级、毫秒级的负荷波动，快速平抑功率偏差；

3）能量效率高，运行稳定，高频启停场景下转换损失远低于传统储能，减少能源浪费并降低能耗成本。

这些特性协同作用，使水系有机液流电池在长周期调频运营中满足高频启停需求，成为电网调频的高效解决方案。

1.3 适配 AGC 调频的液流电池性能参数设计

根据电网对发电机组 AGC 调频性能的要求，提出在福建电网具有竞争优势的 AGC 调频综合 K 值指标。依据《福建省电力调频辅助服务市场交易规则（试行）（2022 年修订版）》[20]，调频性能综合指标 K_P 是机组调频过程中调节速率 K_1、调节精度 K_2 及响应时间 K_3 3 项性能指标的综合反映。

在此基础上，结合机组现有 AGC 调频指标，提出对储能系统的技术要求，进一步选择符合要求的液流电池规格型号。本研究采用的水系有机液流电池电堆单体参数如表 1 所示。

表 1 水系有机液流电池电堆单体参数

Tab.1 Parameters of a single unit in an AORFB stack

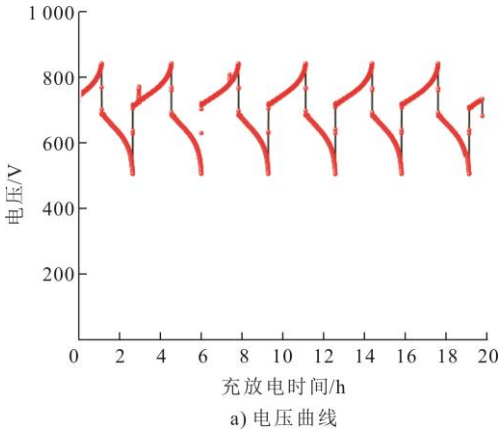
项目	数值
额定工作电压/V	728
最低工作电压/V	504
额定容量/Ah	60
功率调节范围/kW	25~50
过电压/V	840
直流内阻/mΩ	780
额定充放电电流/A	41.2
最大充放电电流（≤30 s）/A	100
漏电流/A	0.05~0.5
工作温度范围/℃	–20~60
存储温度范围/℃	–20~70
循环寿命/次	≥20 000
质量/kg	1 500

为了使液流电池更好提升火电机组 AGC 调频性能指标，在实验室开展调频型液流电池储能系统的调节速度、调节精度和响应时间等充放电关键参数研究，以评估其在火电调频中的实际应用性能。

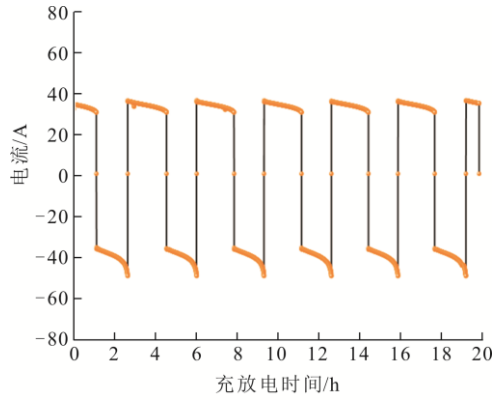
2 调频型液流电池性能测试

2.1 充放电测试

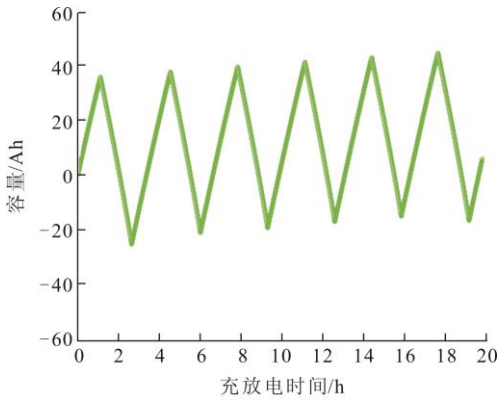
通过恒功率充放电循环，评估液流电池在连续充放电过程中的电压稳定性、调频速度及输出一致性。图 3 是实验室测得的水系有机液流电池系统恒功率充放电曲线。水系有机液流电池充电容量为 62.769 Ah，充电能量为 47.468 kW·h，放电容量为 61.032 Ah，放电能量为 38.093 kW·h。从图 3 可以看到，该电池在 6 次充放电循环过程约 20 h 中电压、电流保持高度一致，无电压或电流衰减现象，表明水系有机液流电池具备优异的调节速率（K_1），可实现毫秒至秒级的功率响应，为快速补偿电网频率波动提供了关键技术支撑。同时，极其稳定的充放电曲线证明水系有机液流电池具有极高的调节精度（K_2），其输出功率波动极小，能够精准追踪控制指令，满足 AGC 调频对控制准确性的苛刻要求。该水系有机液流电池具有瞬时启动充放电调节机制，可以短时间快速响应（K_3），实时平抑电网频率波动。



a) 电压曲线



b) 电流曲线



c) 容量曲线

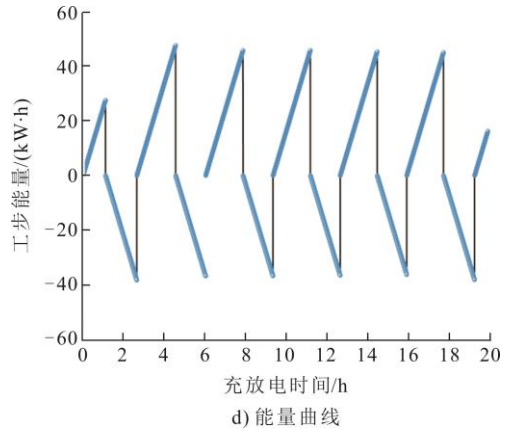


图 3 液流电池系统恒功率充放电曲线
Fig.3 Charge-discharge curves of the flow battery with constant power

2.2 自放电特征

液流电池的自放电现象是影响其性能的重要因素。在实验室中，将液流电池充电至额定电压后开路放置一段时间，测得其端电压与额定电压的比值即为电压保持率，电压保持率可用来反映液流电池的自放电性能。

图 4 是实验测得的水系有机液流电池自放电特性电压曲线。将液流电池系统连接 PCS 充电至 50%SOC 后，停止程序开始搁置，泵不停条件下开路放置 24、48、72 h 后，测得其 24 h 电压保持率分别为≥97.44%、≥95.31%、≥92.03%。本实验测定的液流电池电压保持率高，自放电低，适用于 AGC 调频。

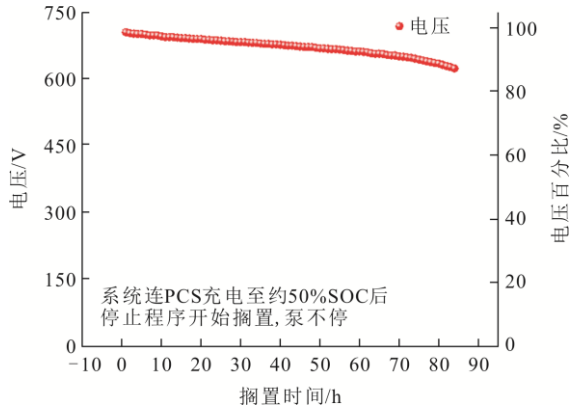


图 4 液流电池自放电电压曲线
Fig.4 Voltage curve of self-discharge of flow battery

2.3 能量效率测试

液流电池的能量效率指放电能量与充电能量的比值，反映电池能量转化过程中的损耗。图 5 是实验室测得的水系有机液流电池充放电能量效率曲线。本次水系有机液流电池能量效率测试共 18 个循环，实验环境温度通过空调控制在 25 ℃。分析测试结果可知，18 次循环的平均能量效率约为 80.01%，最小值约为 79.42%，最大值约为 80.48%，能量效率波动极小，表明系统运行高效且稳定。

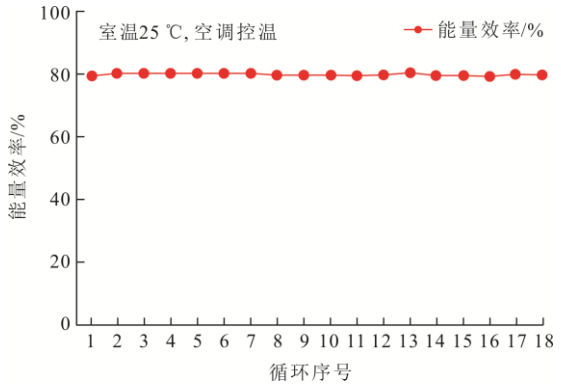


图 5 液流电池能量效率曲线
Fig.5 Energy efficiency curve of flow battery

2.4 循环寿命测试

根据调频型液流电池运行特点，液流电池在长期循环充放电过程中，电解液浓度会缓慢降低，从而影响液流电池的健康状态（SOH）。本测试通过 模拟调频型液流电池长期运行状态，评估该液流电池的循环寿命特性。液流电池按照“充电−放电−充电−放电−…”序列进行循环测试并监控其 SOH：首先在标准电解液浓度下循环 600 次，监测 SOH 变化；随后更换部分电解液为蒸馏水，使 SOH 降低约 10%，继续循环 860 次；最后再次稀释电解液，使 SOH 进一步下降 5%，再进行 540 次循环并记录 SOH 变化。2000 次循环寿命测试结果如图 6 所示。

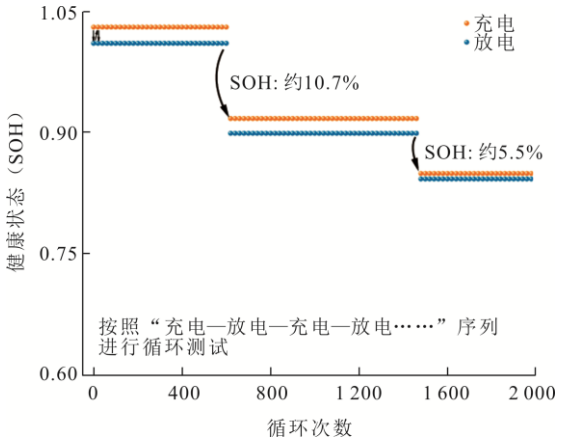


图 6 不同电解液浓度中液流电池 SOH 随循环次数的变化
Fig.6 Variation sof SOH of the flow battery with the number of cycles in different electrolyte concentrations

由图 6 可以看出：在标准电解液浓度下，电池容量保持稳定，600 次循环后仅衰减 0.16%；首次稀释电解液使 SOH 降至 90.11%后，860 次循环后容量

衰减率为 0.26%；第 2 次稀释使 SOH 降至 84.29%后，衰减显著加剧，540 次循环后容量下降 15.93%。

测试表明：电解液浓度降低会加速容量衰减，衰减率从标准浓度下的每 20 000 次 5.33%，上升至 SOH 为 84.29%时的 15.92%；在浓度下降的条件下，基于衰减趋势预估，该电池在容量衰减至 80%前的循环寿命可以超过 20 000 次，满足寿命要求。

3 水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频策略

3.1 调频型液流电池接入罗源储能系统

通过分析在实验室测得的调频型液流电池性能参数发现，液流电池储能系统具备快速响应和高精度控制的特点，适用于电网调频。将其应用于罗源电厂 AGC 调频项目，把 200 kW 水系有机液流电池两段（A、B 段）接入罗源电厂原 20 MW 混合储能系统，如图 7 所示。将 6 kV 储能 A 段母线通过并网开关 C411 及进线开关 C111 接入 6 kV 厂用 1A 段；将 6 kV 储能 A 段母线通过并网开关 C421 及进线开关 C121 接入 6 kV 厂用 2A 段；将 6 kV 储能 B 段母线通过并网开关 C412 及进线开关 C112 接入 6 kV 厂用 1B 段；将 6 kV 储能 B 段母线通过并网开关 C422 及进线开关 C122 接入 6 kV 厂用 2B 段。

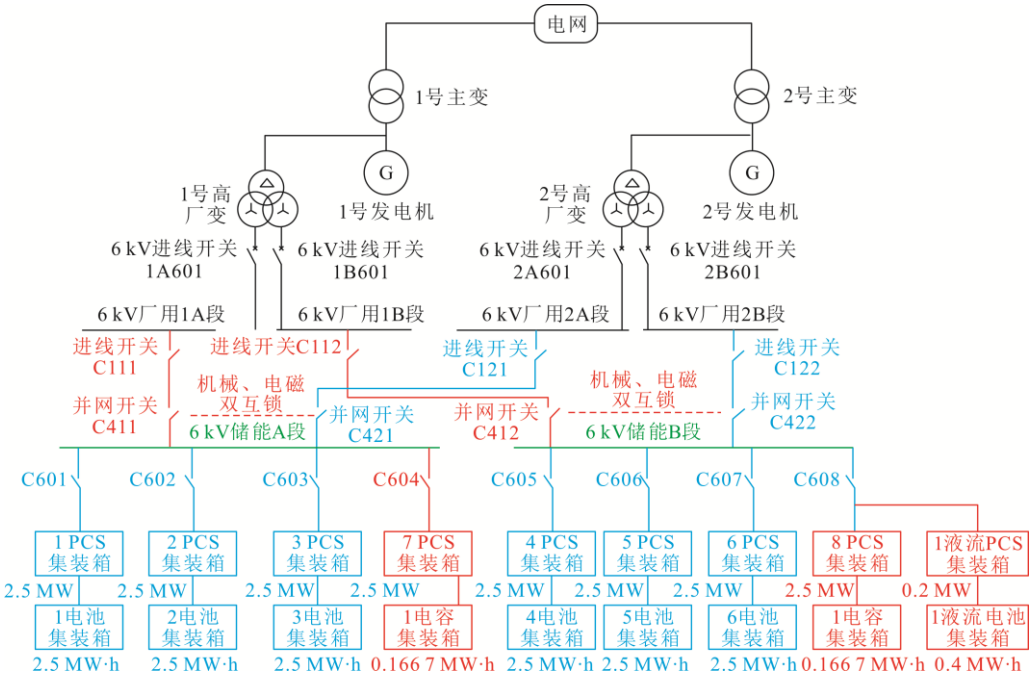


图 7 罗源电厂储能系统概况

Fig.7 Overview of the energy storage system in Luoyuan Power Plant

3.2 调频功率控制策略

液流电池储能系统总容量通常显著低于火电机组，因此在储能与机组协同调频过程中，需充分发挥两者优势，实现协调运行与功能互补。本研究构建液流电池与火电机组耦合控制体系，以实现调频指令精准跟踪、发挥液流电池技术特性为目标，控制流程及指令逻辑如图 8 所示。

火电机组一次调频由转速偏差驱动，转速实际值ω与额定值ω_0的偏差$\Delta\omega$经死区模块后，由放大系数 K_F 转化为协调控制系统（CCS）侧一次调频功率指令，将该一次调频指令与调度 AGC 指令 P_{AGC} 相加，最终生成机组机械功率指令。

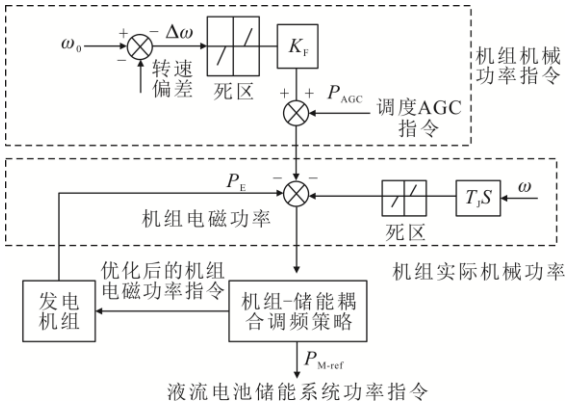


图 8 液流电池储能耦合机组调频功率控制框图

Fig.8 Block diagram of frequency modulation power control for the flow battery energy storage coupled unit

机组机械功率指令与机组电磁功率 P_E 求差，得到功率指令与实际电磁功率的偏差。偏差先经死区模块过滤微小偏差，再通过传递函数 T_JS（T_J 是机组惯性时间常数，S 为拉普拉斯算子），最终反馈到机组实际转速ω，形成“机械功率→转速”的动态闭环。

向发电机组发送优化后的机组电磁功率指令，指导机组调整电磁功率，匹配功率需求。向液流电池储能系统发送储能系统功率指令 $P_{M\text{-}ref}$，利用储能响应速度快的优势，快速弥补机组的响应滞后，辅助平抑频率波动。

在该控制方案下，动态过程中储能系统能够以毫秒级极速响应功率指令。当发电机组和储能系统视为一个联合体时，其整体输出的等效“机械功率”也因此具备毫秒级的快速响应能力，有助于优化一次调频的暂态性能，并加快二次调频的响应速度。在系统从动态向稳态过渡的阶段，随着发电机组逐步跟踪并执行机械功率指令，储能系统所承担的调频功率指令会持续衰减，并趋于 0。当系统完全进入稳态时，机械功率、电磁功率与机械功率指令值达到平衡，储能系统的功率指令也变为 0，不再承担调频功率。

3.3 耦合控制方案

液流电池与火电机组联合参与二次调频时，采用混合被动跟踪控制与主动耦合控制 2 种可切换控制策略。机组运行工况相对稳定时通常采用被动跟踪策略：以机组为主导，液流电池作为辅助，通过响应 AGC 目标功率与机组实际出力的差值来调节充放电，不改变机组原有控制逻辑。当机组处于复杂或受限工况时采用主动耦合策略：以混合系统整体控制为核心，机组调频为辅，液流电池依据自身状态和机组运行工况，结合调度 AGC 目标功率，从机、炉、电、化、热等多系统全局协调分配出力，实现高效耦合。

2 种策略都需将机组与储能的出力合成一个总功率信号。为此，在 6 kV 储能接入点增设功率测量装置，实时监测液流电池功率，并将数据传送至电厂 DCS 控制系统及 RTU 远动装置，在本地与远程终端分别完成功率合成，最终上传至调度端，用于 AGC 性能评估。液流电池储能耦合机组 AGC 调频控制原理如图 9 所示。该系统以机组与液流电池储能作为一个整体响应电网 AGC 指令，将联合出力作为反馈信号，上传至电网调度系统。

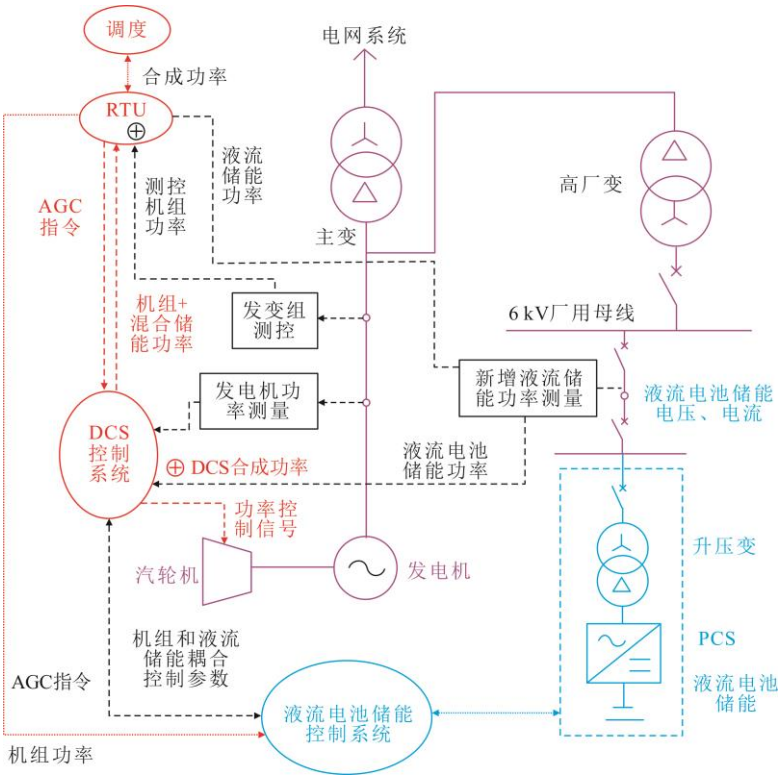


图 9 液流电池储能耦合机组 AGC 调频控制原理

Fig.9 Control principle of AGC frequency regulation for the flow battery energy storage coupled unit

4 场景验证

4.1 模拟调频场景测试

将实验室测得的高性能水系有机液流电池用于模拟测试，测定其在调频场景中的表现。采用 200 kW 水系有机液流电池系统在模拟 AGC 调频场景下运行 24 h，共接收 400 条指令。指令幅值基本处于±25 kW 范围内，平均每条指令持续时间约为 3.6 min，用于观察该系统在电压、电流输出特性及对 AGC 指令的响应表现。系统模拟调频工况运行状态如图 10 所示。

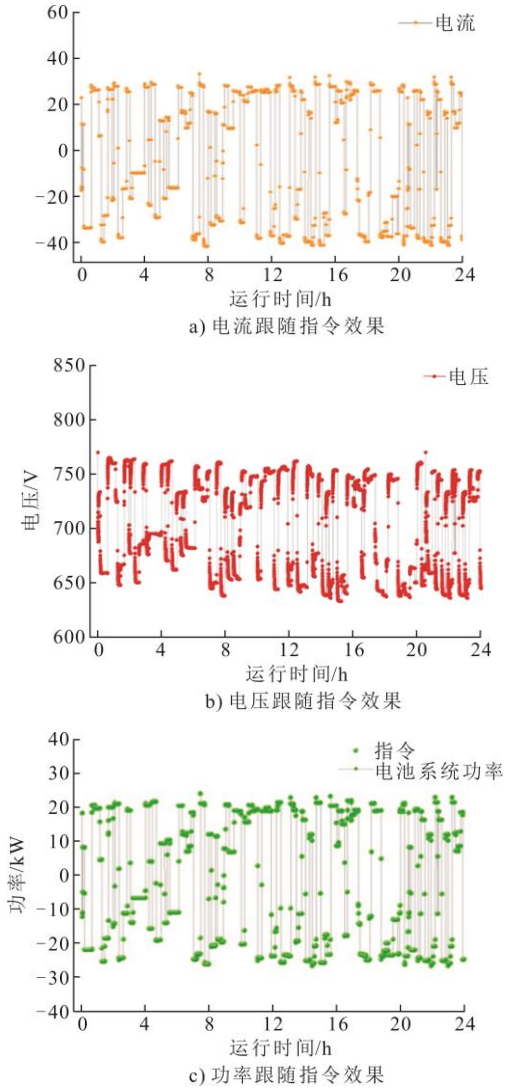


图 10 水系有机液流电池系统模拟调频工况运行状态

Fig.10 Simulation of operating status of the AORFB system under frequency modulation conditions

调频指令下达后，液流电池系统开始充放电，其功率和时间均与模拟调频指令保持一致。电池系统输出功率与指令要求功率的偏差不超过±1%，输出时间与指令要求时间的误差也控制在±1 s 以内，表明该 200 kW 水系有机液流电池在模拟调频工况下，能够精准、快速地跟随指令运行，且未出现因自放电等因素导致的性能衰减，印证了水系有机液流电池精准输出和快速调节的调频性能，初步验证了其辅助火电机组调频的可行性。

4.2 现场验证

为进一步验证水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频技术的可行性，基于华能罗源电厂建成的国内首套 200 kW/400 kW·h 水系有机液流电池火储联合调频示范项目，进行现场验证。验证过程中，重点监测储能系统总输出对 AGC 指令的跟踪效果，水系有机液流电池储能系统总输出跟随 AGC 指令曲线如图 11 所示。

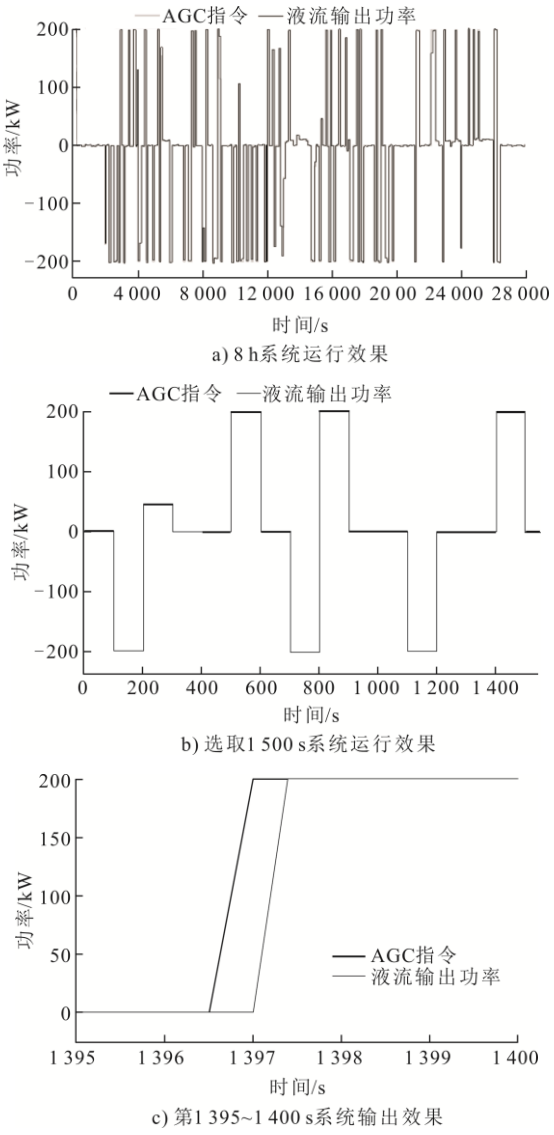


图 11 水系有机液流电池储能系统总输出跟随 AGC 指令曲线

Fig.11 The total output of the AORFB energy storage system follows the AGC instruction curve diagram

由图 11 可以看出，在 8 h 的运行测试中，液流电池功率能够准确跟踪 AGC 指令，运行稳定，动态调节性能显著提升，直观证明了水系有机液流电池储能系统具有极快的调节速率（K_1）和卓越的调节精度（K_2），完全满足电网调频的要求。通过观察电网负荷高峰时段（10:00—12:00）与低谷时段（23:00—1:00）的指令跟踪情况，从中选取 1 500 s 的指令跟随区间，发现 AGC 指令与液流输出功率幅值、时长高度重合，且功率波动极小。再进一步选择第 1 395~1 400 s 的时间窗口进行分析，发现该储能系统动态响应时间（K_3）约为 400 ms，远超传统火电机组，展现出水系有机液流电池在高频次充放电切换下的精确输出和瞬时调节能力，验证了其在火储联合调频中兼具技术可行性与工程适用性。

5 结　语

本文围绕水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频技术展开研究，通过调频型液流电池的性能测试，证实其具备毫秒级动态响应能力，适配火电调频需求；同时优化储能系统的运行控制策略，提出耦合控制方案，实现水系有机液流电池与火电机组的优势互补，提升联合系统的调频性能；最后结合华能罗源电厂 200 kW/400 kWh 示范项目进行现场验证，8 h 运行结果中水系有机液流电池能精准跟踪 AGC 指令，关键时段出力与指令高度契合，证明了水系有机液流电池储能辅助火电机组 AGC 调频的技术可行性。

[参 考 文 献]

[1] 孙秋野, 于潇寒, 王靖傲. “双高”配电系统的挑战与应对措施探讨[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7115-7136.
SUN Qiuye, YU Xiaohan, WANG Jing’ao. Discussion on challenges and countermeasures of “Double High” power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7115-7136.

[2] 洪烽, 梁璐, 逄亚蕾, 等. 基于机组实时出力增量预测的火电-飞轮储能系统协同调频控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8366-8377.
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Research on coordinated frequency control of thermal power flywheel energy storage system based on the real-time prediction of output increment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8366-8377.

[3] 刘志成, 彭道刚, 赵慧荣, 等. 双碳目标下储能参与电力系统辅助服务发展前景[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 704-716.
LIU Zhicheng, PENG Daogang, ZHAO Huirong, et al. Development prospects of energy storage participating in auxiliary services of power systems under the targets of the dual-carbon goal[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 704-716.

[4] 李秀慧, 崔炎. 考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3594-3602.
LI Xiuhui, CUI Yan. Optimal allocation of energy storage in renewable energy grid considering the demand of peak and frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3594-3602.

[5] 李菁华, 兀鹏越, 黄富强, 等. 超级电容混合储能辅助火电机组 AGC 调频容量配置方案研究与应用[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 101-110.
LI Jinghua, WU Pengyue, HUANG Fuqiang, et al. Research and application of AGC frequency regulation capacity allocation scheme for supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 101-110.

[6] 焦盘龙. 储能辅助火电机组二次调频控制策略及容量优化配置研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020: 1.
JIAO Panlong. Research on control strategy and capacity optimization configuration method of energy storage combined with thermal power unit in secondary frequency[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020: 1.

[7] 袁治章, 刘宗浩, 李先锋. 液流电池储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2944-2958.
YUAN Zhizhang, LIU Zonghao, LI Xianfeng. Research progress of flow battery technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2944-2958.

[8] 许晓璇, 张长昆, 李先锋. 面向长时储能的液流电池储能技术: 发展、挑战及未来展望[J]. 科学通报, 2025, 70(9): 1230-1246.
XU Xiaoxuan, ZHANG Changkun, LI Xianfeng. Flow battery for long duration energy storage: Development, challenges and prospects[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(9): 1230-1246.

[9] 王天虎, 刘如祎, 王光绪, 等. 操作与结构参数对锌溴液流电池性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(11): 3517-3523.
WANG Tianhu, LIU Ruyi, WANG Guangxu, et al. Effect of operational and structure parameters on the performance of zinc bromine redox flow battery[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(11): 3517-3523.

[10] 邱亚, 陈薇, 李鑫. 基于 PCMAC-PID 的全钒液流电池储能系统功率控制[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 117-124.
QIU Ya, CHEN Wei, LI Xin. Power control of vanadium redox battery energy storage system based on PCMAC-PID[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 117-124.

[11] 李军徽, 陈国航, 马腾, 等. 高风电渗透率下液流电池储能系统调峰优化控制策略[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 434-447.
LI Junhui, CHEN Guohang, MA Teng, et al. Optimal control strategy of peak shaving of flow battery energy storage system under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 434-447.

[12] 王楠, 李振, 周喜超, 等. 发电厂 AGC 与储能联合调频特性及仿真[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 148-156.
WANG Nan, LI Zhen, ZHOU Xichao, et al. Characteristics research on combined frequency modulation of AGC and energy storage in power plant and the simulation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 148-156.

[13] 谢惠藩, 王超, 刘湃泓, 等. 南方电网储能联合火电调频技术应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 172-179.
XIE Huifan, WANG Chao, LIU Paihong, et al. Application of joint frequency regulation technology of energy storage and thermal power in China southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 172-179.

[14] 沈迎, 黄策, 胡锡东, 等. 锂离子电容器参与火电机组调频研究[J]. 电气技术, 2021, 22(10): 98-103.
SHEN Ying, HUANG Ce, HU Xidong, et al. Research on frequency regulation of thermal power unit with lithium-ion capacitor[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(10): 98-103.

[15] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
MU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.

[16] 宋子琛, 张宝锋, 童博, 等. 液流电池商业化进展及其在电力系统的应用前景[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 9-20.
SONG Zichen, ZHANG Baofeng, TONG Bo, et al. Commercialization progress of flow battery and its application prospects in electric power system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 9-20.

[17] CREMONCINI D, LORENZO D G, FRATE F G, et al. Techno-economic analysis of aqueous organic redox flow batteries: stochastic investigation of capital cost and levelized cost of storage[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122738.

[18] GUAN X, KAZACOS S M, MENICTAS C. An electrochemical stack model for aqueous organic flow battery: the MV/TEMPTMA system[J]. Applied Energy, 2024, 375: 124024-124024.

[19] DOMINIK E, SIMON K, NICK B, et al. Benchmarking organic active materials for aqueous redox flow batteries in terms of lifetime and cost[J]. Nature Communications, 2023, 14: 6672-6672.

[20] 国家能源局福建监管办公室. 国家能源局福建监管办公室关于印发《福建省电力调频辅助服务市场交易规则（试行）(2022 年修订版)》的通知: 闽监能市场规〔2022〕45 号[A/OL]. (2022-04-29) [2025-10-05]. https://fjb.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202311/t20231114_217701.html.
National Energy Administration Fujian Supervision Office. Notice of the Fujian Regulatory Office of the National Energy Administration on Issuing the *Fujian Power Frequency Regulation Ancillary Service Market Trading Rules (Trial) (2022 revision)*: MJNSCG〔2022〕No.45[A/OL]. (2022-04-29) [2025-10-05]. https://fjb.nea.gov.cn/ xxgk/zcfg/202311/t20231114_217701.html.

（责任编辑　李园）