

风力发电用储能电池技术的发展现状及展望

郑衍森¹, 苏黄盛¹, 梁业盈², 肖勇¹, 胡航¹, 梁业如¹

(1. 生物基材料与能源教育部重点实验室(华南农业大学材料与能源学院), 广州 510642;

2. 广东诚誉工程咨询监理有限公司, 广东 佛山 528200)

摘要: 随着全球范围内化石能源日益枯竭, 此时, “双碳”目标的提出使得风电等可再生能源产业的发展显现出更为重要的地位。近年来, 风电规模化并网发电量不断提高, 但风电出力的波动性与间歇性对电网稳定性、电能质量及风能利用率带来严峻挑战。储能系统是实现电网调节与弃风消纳的关键支撑, 其中电化学储能技术因其容量高、响应快、适应性强而广泛应用于风电场。本文系统回顾了风电储能中传统电池技术的发展与适用性, 分析了国内外典型风电场储能系统的应用现状, 剖析各类电池面临的关键瓶颈, 展望了其未来发展方向及趋势。在此基础上, 结合风电场运行特性, 探讨了新兴储能技术的可行性与发展趋势, 为构建高效、稳定的风电储能体系提供技术路径, 助力“双碳”目标实现。
关键词: 风力发电; 储能; 电化学; 风储联合系统; 低碳

Development Status and Prospects of Energy Storage Batteries for Wind Power Generation

ZHENG Yansen¹, SU Huangsheng¹, LIANG Yeying², XIAO Yong¹, HU Hang¹, LIANG Yeru¹

(1. Key Laboratory for Biobased Materials and Energy of Ministry of Education, College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Chengyu Engineering Consultation and Supervision Co., Ltd., Guangdong Foshan 528200, China)

Abstract: With the increasing depletion of fossil fuels worldwide, at this point, the proposal of the *dual carbon* goals has made the development of such renewable energy industries as wind power even more significant. In recent years, the grid-connected generation capacity of wind power has been continuously increasing, but the volatility and intermittency of wind power output pose significant challenges to grid stability, power quality and wind energy utilization efficiency. Energy storage system is a crucial infrastructure for grid regulation and wind power curtailment mitigation, in which electromechanical energy storage technology is used widely in wind farm due to its high capacity, fast response and strong suitability. In this paper, the development and suitability of traditional batteries in the wind power energy storage is systemically reviewed. The application status of typical wind farm energy storage system both at home and abroad is analyzed. The key bottlenecks faced by various types of batteries are analyzed, and its development direction and trend in the future are expected. On those basis and in combination with operation characteristic of wind farm, both technical feasibility and development trend of emerging energy storage technology are discussed, which provide technical approaches for the constructing highly efficient and stable wind power energy storage system and promoting achievement of *dual carbon* goals.

Keywords: wind power; energy storage; electrochemistry; wind storage hybrid system; low carbon

0 引言

据国际能源署统计, 全球化石能源消费占比持

续超过 80%, 每年二氧化碳排放量高达 364 亿吨, 严重加剧了生态环境问题。加速发展可再生能源已成为应对能源安全与气候变化的关键路径。

收稿日期: 2025-06-28

收稿日期: 国家自然科学基金(52373074); 广东省大学生科技创新能力培养专项资金(pdjh2021a0072); 广东省自然科学基金杰出青年基金(2024B1515020017)。

风能作为重要的绿色能源,具有资源丰富、分布广泛、成本低廉等优势。近年来发展迅速,2024年全球累计装机容量已突破1 136 GW。然而,风能的间歇性与不确定性显著,易造成并网波动、电能质量下降以及弃风现象,制约其大规模消纳与稳定输出^[1]。建立高效的风电储能系统成为保障风电接入、电网安全及提升风能利用率的关键手段^[2]。储能系统可在负荷低谷储存多余电能,在用电高峰释放,从而实现风电输出平滑化、系统调峰调频、削峰填谷,提升整体运行效率与经济性^[3]。

当前,应用于风电场的储能技术主要包括物理储能与电化学储能。前者如飞轮储能、抽水蓄能,具备寿命长、容量大等优势,广泛用于大规模场景;后者则以铅酸电池、锂离子电池等为代表,具有响应速度快(<100 ms)、部署灵活、能量密度高等特点,在风电领域展现出广阔应用前景。近年来,电化学储能技术在风电并网调节中的作用愈发突出,受到学术界和工程界广泛关注。已有文献^[4-10]对风电场中储能系统的结构特性、控制策略与应用实例进行了深入探讨,为系统设计与工程部署提供了重要参考。

尽管如此,针对电化学储能技术在风电大规模应用场景下的系统性综述仍较匮乏。随着风电规模的不断扩大,业界对电池系统的安全性、经济性和适配性的要求不断提升,电化学储能技术也在持续迭代升级,在支持风电高比例接入方面发挥着日益重要的作用。因此,围绕电化学储能在风电场中的适配性与发展潜力进行系统总结与深入分析,具有重要的现实意义与研究价值。

鉴于此,本文聚焦于风电场的储能需求特性,详细总结了适用于风电场的大规模电化学储能技术,重点分析各类电池体系的工作机制、性能特点与应用场景,归纳全球典型风电场中电化学储能的应用现状,并探讨其面临的技术瓶颈与发展趋势。在此基础上,提出适应风电波动特性的新型电化学储能路径,展望其在绿色、智能、高效风电系统构建中的应用前景。

1 风力发电特性、发展现状及其储能技术

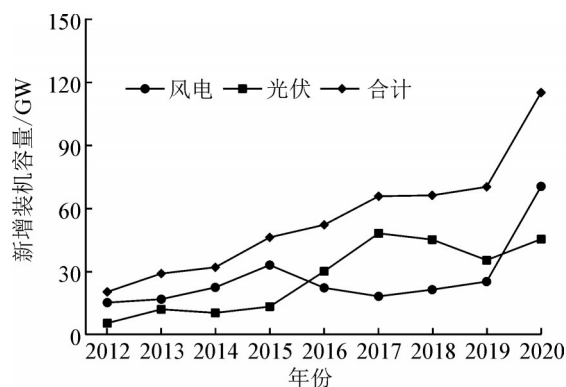
1.1 风力发电特性

风力发电是指将风能转换为电能,是继水电之后最成熟、易获取、成本较低、开发潜力巨大的可再生能源转换技术。用于风力发电的场所称为风电场,通常由多个风力发电机组有序排列而成。当风

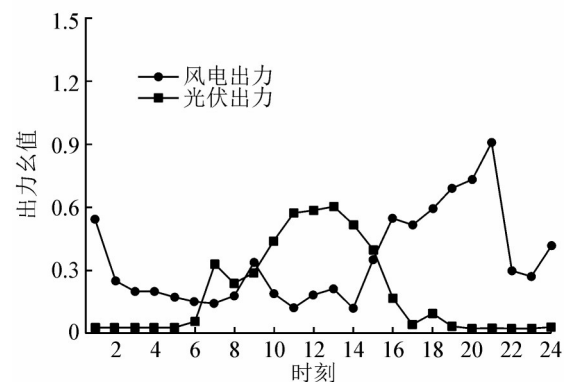
力驱动叶片旋转,经轮毂和齿轮箱带动发电机运行,即可实现风能向电能的转换并接入电网。风电场一般部署在高原、沿海、岛屿及海上等区域,机组布局根据主导风向及地形条件进行优化,以尽可能减少尾流效应影响。

风电具有天然的波动性和不可预测性,导致其输出功率难以稳定满足并网要求,易造成电网频率波动、电能质量下降等问题,甚至造成风电弃用,见图1。由图1(b)看出,相较光伏发电呈现出强烈的间歇性,风电出力则表现出明显的波动性^[11]。因此,发展适配分布式风电系统的储能技术,是提升风能利用率、保障电网安全运行的关键路径^[12-13]。

近年来,随着风电技术持续进步,风力发电已在全球范围实现大规模应用。相较成本较高的光伏发电,风电在单位产能上的优势依然显著,且其度电成本已接近天然气发电,是当前最具经济竞争力的可再生能源之一。在我国,风电依托资源优势与政策支持实现快速发展,见图1(a),在“双碳”战略目标推动下,正日益成为推动能源结构转型和实现可持续发展的重要力量。



(a) 近年来中国清洁能源新增装机容量发展趋势



(b) 风电场出力和多云天气下光伏电站出力

图1 近年来中国清洁能源新增装机容量发展趋势及风电场出力和多云天气下光伏电站出力
Fig. 1 Development trend of new installation capacity of clean energy in China in recent years, and output from wind farm and photovoltaic power stations on cloudy days

1.2 风力发电发展现状

近年来,随着各国对能源安全、环境治理与气候变化问题的重视,全球风力发电产业步入快速发展阶段。根据全球风能理事会发布的《2025 全球风能报告》,截至 2024 年底,全球风电累计装机容量达 1 148 GW(见图 2),年新增 117 GW,年增长率为 10.19%。其中,中国、美国、德国、印度和巴西位列全球风电装机容量前 5 位。受益于技术进步与市场扩张,风电装机量持续攀升,风能已成为最具竞争力的清洁能源之一。尽管取得显著进展,全球风电发展规模距离实现本世纪中叶“净零排放”目标仍有较大差距。若要按期实现,未来十年内全球风电装机速度需在当前基础上提升两倍以上。

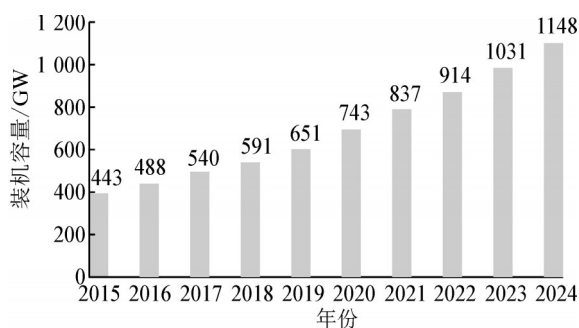


图2 2015~2024全球风电储能装机容量

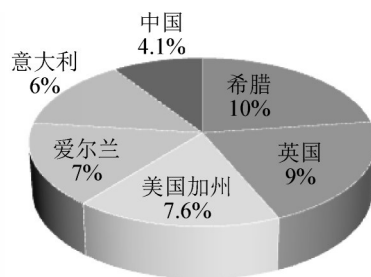
Fig. 2 Installation capacity of wind energy storage around the world between 2015~2024

我国风能资源丰富,早在 2015 年风电发电量便超越美国,位居世界首位。2024 年,我国风电累计装机容量达到 442 GW,占全球总量的 40%以上;风电年发电量达 9 916 亿 kW·h,同比增长 16%,充分体现出我国风电发展的强劲势头。近年来,在政策引导与资源优势驱动下,风电在我国西北高原、东南沿海及岛屿等风能富集地区加速布局,2024 年全球主要国家/地区弃风率分布及 2024 年中国弃风率主要地区分布见图 3。在“双碳”目标指引下,持续推进风电项目建设、加快新型储能技术应用并推动产业技术创新,将是我国风能高质量发展的重要方向。

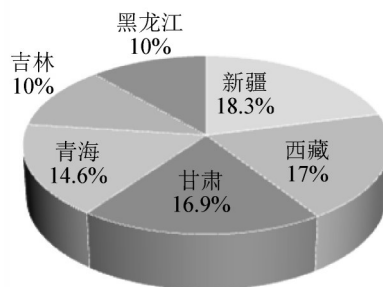
1.3 风力发电储能技术现状

风力发电具有间歇性与不稳定性,将其直接接入传统电网易引发电压波动、功率闪变等问题,严重影响电网运行质量。根据《全国新能源消纳监测预警中心》与《ENTSO-E 透明度平台》最新数据,2024 年欧洲主要国家风电弃风率分别为:希腊 10%、英国 9%、爱尔兰 7%(见图 3(a)),反映出即便

在风能资源丰富的地区,受限于电网结构与调度能力,风能浪费问题仍较为突出。在中国,风资源集中分布于西部地区,局部弃风率也同样居高不下。《2024 年中国省级新能源并网消纳情况》报告显示,新疆、西藏、甘肃 3 地弃风率分别为 18.3%、17.0%、16.9%,位列全国前 3(见图 3(b))。可见,提高风能利用率已成为全球性难题。



(a) 2024年全球主要国家/地区弃风率分布



(b) 2024年中国弃风率主要地区分布

图3 2024年全球主要国家/地区弃风率分布和2024年中国弃风率主要地区分布

Fig. 3 Wind curtailment rates in major countries and regions around the world in 2024, and regional distribution of wind curtailment rates in China in 2024

储能技术被广泛认为是解决风电波动性与弃风问题的关键手段^[14-15]。通过储能系统调节风电输出功率,可有效抑制并网波动,提升电能质量。理想的储能系统应具备快速响应能力与容量调节功能,满足风电出力变化下的动态负载需求。

目前,风电场所采用的储能技术主要分为物理储能与电化学储能两大类。前者包括抽水储能、飞轮储能与压缩空气储能等,具备寿命长、安全性高、适合大规模应用等优势,在传统风电系统中占据主导地位。然而,能量密度低与灵活性差仍是其面临的核心挑战。

相比之下,电化学储能以电池与超级电容器为核心器件,具有能量密度高、响应速度快、部署灵活等特点,适用于多类型、多场景风电接入系统。图 4 显示了当前全球投运储能项目中各类储能技术的分布情况,抽水储能仍为主导,但电化学储能占比正稳步提升,展现出广阔的发展前景。

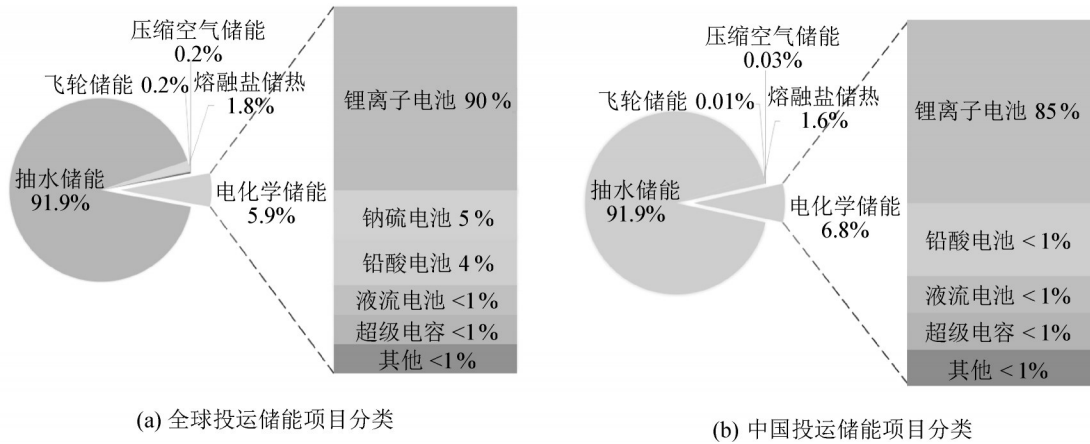


图4 全球投运储能项目和中国投运储能项目分类

Fig. 4 Classification of operational energy storage projects around the world , and classification of operational energy storage projects in China

2 风力发电储能电池的需求分析与应用

2.1 风力发电站电池储能的需求分析

储能系统极大缓解了风电不稳定性等给电网及电能质量带来的消极影响,电池储能技术能够灵活克服风电不稳定导致的低质量电力传输问题。在风电系统的发电侧,电池储能能够平滑间歇性电能及参与调频等,使得风力所发的电能连续稳定地输出。不仅如此,电池储能技术在电网输配储能中能够提高电能质量、延缓增容需求;在电网用户侧分布式储能中能够提高供电可靠性等均发挥着重要作用。储能电池在风力发电系统的作用见图5。图5表明,电化学储能技术在发电侧、电网输配及用户侧分配中不可或缺。

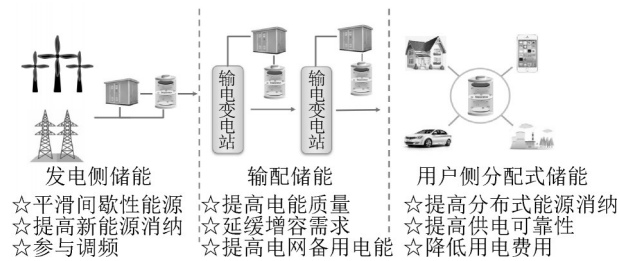


图5 储能电池在风力发电系统的作用

Fig. 5 Effect of energy storage batteries in wind power generation systems

目前,新兴风电场储能系统以电池储能为主,铅酸电池因能量密度高、灵活性强等优势成为主流。然而,根据场景应用的不同,不同种类的电池具备相应优势及劣势,对于经济成本、安全性、环保性、能量密度及使用寿命各有侧重。

2.2 风力发电站各类储能电化学的比较与应用

用于风电场储能的电池种类以锂离子电池、钠硫电池、铅酸电池及全钒液流电池为主,各类电化学储能方式有其优势和适用范围。表1为不同类型储能电化学技术的性能及经济性对比,储能系统的选择应根据具体储能需求,从多因素分析每类电池的特点作出选择。在风电场的诸多电池储能技术中,铅酸电池最为成熟且经济性好,其能量密度小、污染环境是制约发展的主要因素;锂离子电池能量密度高、工作寿命长,但安全性差且成本高;钠硫电池大倍率放电性能好,但运行温度高,且存在重大的安全隐患;全钒液流电池具备寿命长、功率高、系统运行维护费用低及安全环保,能量密度低及窄工作运行温度范围是全钒液流电池所面临的重大挑战。

目前,世界各国在风电场中均已较为成熟地应用以上举例储能电池作为储能系统,根据电池优劣势不同,其适用场景亦有侧重,不同类别电池特性对比见图6。

表1 不同类型电池性能对比^[16]

Table 1 Performances comparison of different batteries^[16]

电池种类	能量密度/(W·h/kg)	能量效率/%	循环寿命/次	储能成本/[元·(kW·h) ⁻¹]	响应时间
铅酸电池	< 50	75~85	500~1 200	800~1 000	毫秒级
锂离子电池	< 200	90~94	1 000~10 000	2 500~4 500	毫秒级
钠硫电池	< 240	75~86	2 500~4 000	2 000~3 000	毫秒级
全钒液流电池	< 30	70~85	12 000~18 000	4 500~6 000	毫秒级

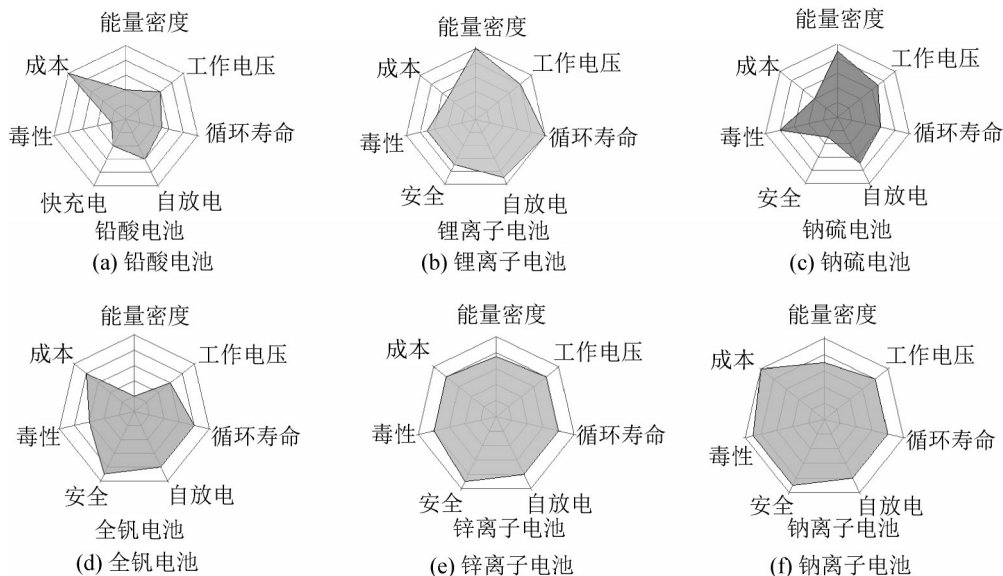


图6 不同类型电池性能雷达图
Fig. 6 Radar diagram of performance of different types of batteries

2.2.1 铅酸电池

铅酸电池兼具技术成熟、经济性好及安全性高等优势,在小型风力发电系统中占有较多的份额。在小型风能发电系统中,以风力发电机作为发电单元,控制器、逆变器等作为能源转换单元,以铅酸电池作为储能单元,为各类型负载提供电力供应或分散并网发电。铅酸电池结构、工作原理见图 7(a)、图 7(b) 所示。

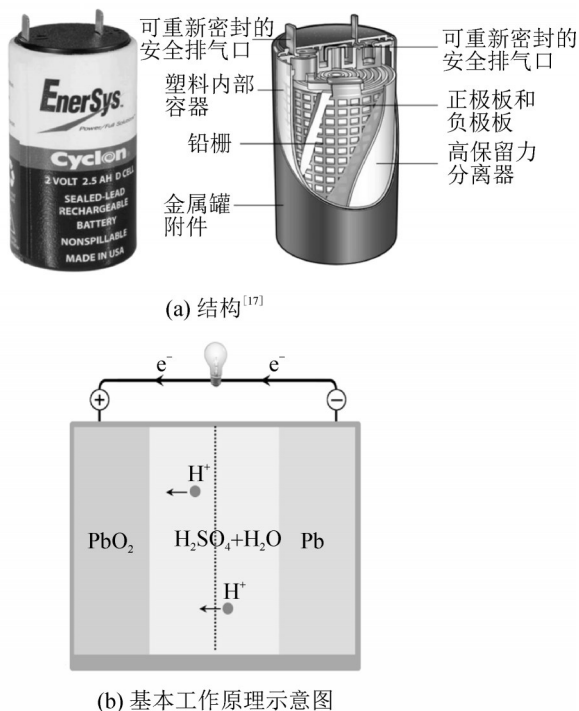


图7 铅酸电池结构^[17]及基本工作原理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of structure^[17] and basic working principle of lead-acid battery

铅酸电池在风电储能中的应用主要得益于其

工艺成熟与制造成本低的优势,但该技术仍面临以下关键限制:1)循环寿命短,板栅腐蚀与不可逆硫酸盐化问题易导致性能衰减,并且在高温环境下尤为严重;2)能量密度低,典型值仅约 40 W·h/kg,远低于磷酸铁锂(约 150 W·h/kg)和钠离子电池(>120 W·h/kg)等新型体系;3)环境污染风险,生产和使用过程中产生的铅及其化合物具有较高毒性,限制其在绿色储能领域的规模化应用。

为提升其综合性能,当前研究主要聚焦于新型极板材料、电极结构优化与电池管理系统的智能化发展。在极板结构方面,已有研究采用网状玻璃碳为基底进行电镀铅处理^[18-19],以减轻重量、提升活性物质利用率与电极导电性能。部分超级电池结构可实现寿命较传统铅酸电池提升一个数量级以上^[20]。在此基础上发展出的铅炭电池,通过引入活性炭材料显著增强了倍率性能与循环寿命^[21]。在材料设计方面,沈浩宇团队以聚氨酯泡沫为原料,通过玻璃炭化后制得的泡沫铅板栅^[22],所组装的铅酸电池可将能量密度提升至 43.5 W·h/kg,相比普通铅酸电池提高约 14.5%。

尽管技术持续进步,铅酸电池在容量密度、绿色制造与全生命周期管理方面仍面临挑战。未来,铅酸电池的可持续应用仍需在提升比能、延长寿命与减少污染等方面实现多维协同优化。

2.2.2 锂离子电池

锂离子电池自 20 世纪 90 年代商业化以来,因其能量密度高、充放电效率高等优势,应用于电动汽车、便携式设备等领域,也成为风电储能系统中应用最为成熟的电化学储能技术之一^[23],锂离子电

池结构及工作原理示意图见图8。

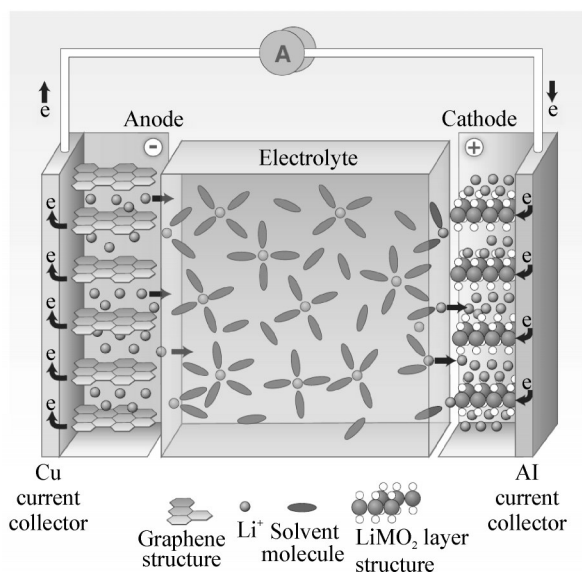


图8 锂离子电池结构及工作原理示意图^[24]
Fig. 8 Structure and working principle diagram of lithium-ion battery^[24]

锂离子电池在风电储能中的应用优势主要体现在以下几个方面:1)能量密度高,目前商业化产品可达约 $150\sim 200\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ ^[25],远高于铅酸电池等传统体系;2)循环寿命长,正常条件下,在2500次循环后容量保持率不低于80%;3)充放电效率高、自放电率低,系统能量效率可超过90%^[26];4)响应速度快、功率密度高,具备良好的调峰调频能力,适应风电输出波动。

在实际应用中,锂离子电池已用于多项风电储能示范工程。例如,夏威夷风电场建设了多个配套锂电储能系统,包括30 MW风电场配套1.5 MW/1 MW·h储能系统和21 MW风电场配套10 MW/20 MW·h系统^[9],用于平抑风电出力波动、提升并网稳定性。系统亦可在电价低时储能、高时放电,实现经济调节与辅助盈利。

尽管锂离子电池综合性能优异,但其在风电储能中的进一步规模化应用仍受限于两个关键问题:1)安全性不足,电解液和隔膜为易燃有机物,且在过充、短路等故障下易引发热失控;石墨负极嵌锂潜在形成锂枝晶,可能造成内部短路;2)成本偏高,原材料依赖锂资源,制造与回收成本较高。

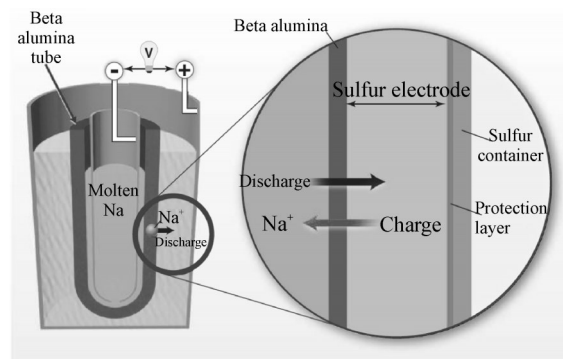
为提升其在风电场景中的可用性,研究正集中于高安全性固态电池、低成本材料替代、以及电池全生命周期管理技术的发展。同时,人工智能技术在电池状态评估与系统保护策略中展现出良好前景。例如,基于机器学习的算法可实现对电池剩余

电量(SOC)、健康状态(SOH)和剩余寿命(RUL)的精准预测^[27],辅助构建更安全可靠的储能运行策略,提升系统整体智能化水平。

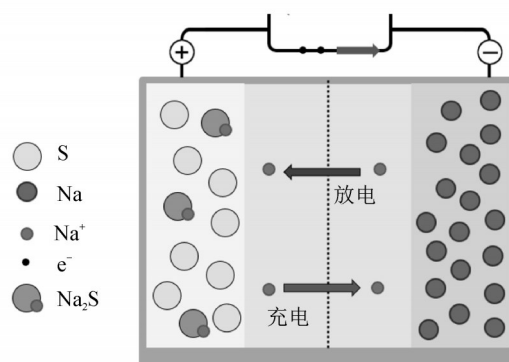
总体来看,锂离子电池凭借其高效能与快速响应特性,仍是当前风电储能系统的主流技术之一。但面对成本、安全和资源等多重制约,未来需与钠离子电池等新兴储能体系协同发展,以满足多样化风电接入场景的需求。

2.2.3 钠硫电池

钠硫电池是一种以金属钠为负极、单质硫为正极、 β -氧化铝陶瓷为固态电解质兼隔膜的高温二次电池^[28],其结构和工作原理见图9。该类电池具有能量密度高、循环寿命长、环境友好等优势,是当前全球储能市场中装机容量达GW级的重要技术路线之一^[29]。钠硫电池典型能量密度可达 $248\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 和 $392\text{ W}\cdot\text{h/kg}$,预计使用寿命可超过15年^[30],且高达99%的活性材料可实现回收再利用,具有良好的环境可持续性。在实际应用中,日本Futatabi风电场便部署了17组钠硫储能单元,总储能容量达34 MW,相当于其51 MW风场规模的2/3,有效平抑了风电输出波动至2%以内,显著提升了可再生能源接入电网的稳定性。



(a) 钠硫电池结构图^[24]



(b) 钠硫电池工作原理

图9 钠硫电池结构及钠硫电池工作原理
Fig. 9 Structural diagram^[24] of Na/S battery and working principles of Na/S battery

尽管在大规模储能场景中具有良好应用前景,钠硫电池的安全性问题仍是其进一步推广应用的关键瓶颈。当前主流钠硫电池在高温(约 350 ℃)下运行,活性物质反应热焓高达 $-420\text{ kJ/mol}^{[30]}$,一旦陶瓷隔膜破裂导致熔融钠与硫接触,将产生剧烈放热反应,极易引发发热失控事故。此外,熔融态硫对电极材料与电池外壳具有强烈腐蚀性,严重影响电池寿命和系统安全。更为严重的是,高温运行需长期依赖加热与保温系统,导致能耗高、运行成本重,成为制约其实用化的核心障碍之一。

为缓解上述问题,部分研究聚焦于优化高温体系中的材料与结构设计,如增强固态电解质的热稳定性与力学强度、引入电路保护机制等。YUNG Fang, YU Yao 团队^[31]构建的以熔融钠/硫为电极、 β -氧化铝为电解质的高温钠硫电池在 300~350 ℃ 下实现了稳定运行,但长期服役仍不可避免地面临腐蚀与材料降解风险。因此,研究重心正逐步从“高温耐受性提升”转向“降低工作温度”,以从源头提高系统的本体安全性与运行经济性。

在此背景下,室温钠硫电池被认为是未来发展的理想方向,其在避免高温风险的同时,有望兼顾能量密度、系统简化与安全性。然而,该体系仍面临多硫化物穿梭、钠枝晶生长及界面不稳定等核心挑战。为此,界面调控成为关键研究策略。XU Xiaofu 团队^[32]提出采用高浓度 NaTFSI 电解液显著提升电池性能。随着电解液浓度由 1 mol L^{-1} 提升至 2 mol L^{-1} , NaPSs 的溶解被有效抑制,并在负极表面形成富含 NaF 与 Na_3N 的致密无机 SEI 层,协同抑制多硫穿梭与枝晶生成。电池在 0.1 C 下循环 100 圈后,其可逆比容量由 680 mAh g^{-1} 提升至 907 mAh g^{-1} ,循环稳定性显著增强。未来,通过进一步优化溶剂种类、盐类组合及其电解液-电极界面相容性,有望实现更高效、更安全的室温钠硫储能系统,加速其在柔性电子、分布式能源与大规模储能等领域的实用化进程。

2.2.4 全钒液流电池

全钒液流电池是一种以钒离子在不同价态间可逆氧化还原反应为能量载体、通过外部泵循环电解液实现储能与释能的大型水系电化学储能系统,结构和原理见图 10。其核心结构由两个独立储液罐、电堆单元、循环泵和离子交换膜组成,具备结构可扩展、运行安全性高等显著优势。该体系自提出以来在大规模储能领域获得广泛关注,特别适用于可再生能源波动调节场景^[33]。

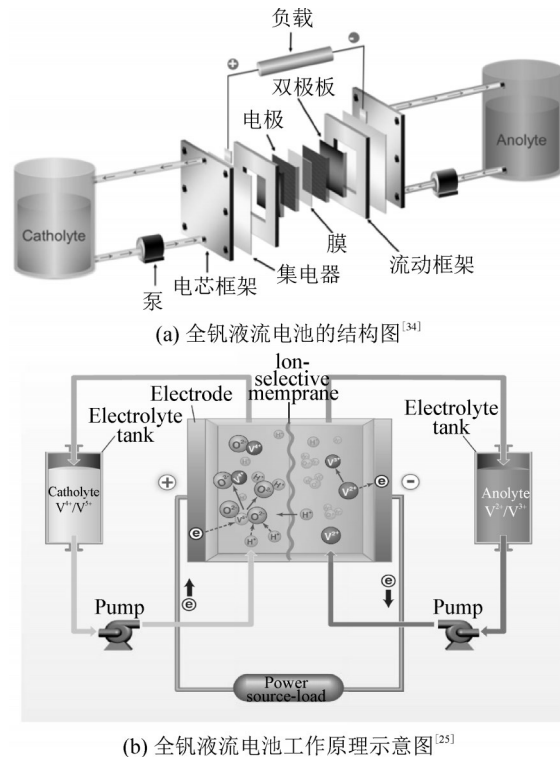


图 10 全钒液流电池结构图和工作原理示意图
Fig. 10 Structural diagram and schematic working principle of all-vanadium flow battery^[25]

与传统电池系统相比,全钒液流电池在风电储能中的优势主要体现在 3 个方面:1)功率与容量独立设计,通过调节电堆规模和电解液体积,可灵活配置输出功率与储能容量,便于满足不同风电接入场景需求;2)使用寿命长、循环稳定性优异,电池反应仅涉及钒离子的价态变化,无固相转化,具备良好的深放电能力和无记忆效应;3)系统可维护性强,由于活性物质循环流动、传质受限较小,系统具备较强过载能力和运行稳定性。

在实际风电示范中,全钒液流电池已展现出良好适配性。例如,2006 年建成的爱尔兰 Sorne Hill 风电场配套建设了总装机容量达 38 MW 的 VRFB 储能系统,在 10 min 内可提供 3 MW 的脉冲功率,用于平滑风能输出波动^[35-36]。

尽管如此,全钒液流电池在风电场景下的规模化应用仍面临诸多挑战:1)能量密度偏低,受限于钒离子在电解液中的溶解度,目前系统能量密度仅为 $40\text{ W}\cdot\text{h/kg}$;2)系统结构复杂、运行能耗高,需要维持电解液循环泵、冷却系统等外部子系统稳定运行;3)经济性不适用于中小型风电站,单位成本偏高。

为解决上述问题,提升电池关键材料性能成为技术发展的核心路径^[37]。目前,研究正聚焦于电堆构型设计上,通过结构的创新与集成提升整体性能。在电堆关键部件中,双极板的材料与结构设计

尤为重要。例如,戴纹硕团队^[38]采用聚丙烯(PP)替代聚偏氟乙烯(PVDF),制备了膨胀石墨/聚丙烯热压双极板,并构建从内到外PP含量递减的梯度结构,有效缓解了热压成型中的聚丙烯富集问题。实验表明,在10%PP含量下,该双极板在 200 mA cm^{-1} 条件下实现77.71%的能量效率,并具备良好的循环稳定性。

总体来说,全钒液流电池凭借其高安全性与设计灵活性,已成为风电储能的重要候选技术。未来,围绕能量密度提升、系统集成简化与材料成本控制的协同优化,有望进一步推动其在风电场景下的规模化商业化应用。

3 新兴储能电池技术在风力发电站中的应用可行性

尽管当前风电储能系统中以铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池以及全钒液流电池为代表的电化学储能技术已经取得广泛应用,但这些传统储能电池仍面临成本高、安全性低、资源制约或循环寿命不足等问题,尤其在风电规模持续扩大的背景下,这些问题日益凸显。因此,为了突破传统技术的瓶颈、实现更高效、更安全、更经济的风电储能系统,新兴储能电池技术应运而生。新兴技术在材料体系、工作机制、安全性能等方面呈现出显著优势,不仅可以作为现有技术的有力补充,甚至有望在特定场景中实现对传统电池的替代。基于此,以下将重点介绍具有广阔应用前景的新型储能电池技术,探讨其在风电储能中的应用可行性及发展潜力。

3.1 水系锌离子电池

水系锌离子电池因其高安全性、低成本和良好的环境适应性,在风电大规模储能场景中展现出广阔应用前景。相较铅酸电池能量密度低、锂离子电池成本高及安全性差,以及钠硫电池需高温运行、存在腐蚀性等问题,水系锌离子电池以水溶液为电解质,不仅离子电导率对比有机系电解液高出2个数量级^[39],同时显著降低了火灾、爆炸等风险,满足风电场对安全、经济、环保的储能需求。其水基体系高离子电导率也使其具备出色的倍率性能,近年来受到广泛关注。

3.1.1 原理

水系锌离子电池一般以金属锌为负极,具备大隧道的 MnO_2 为正极,富含 Zn^{2+} 的中性水溶液为电解液。锌离子电池工作时, Zn^{2+} 可逆地在锌负极表面溶解与沉积,同时在 MnO_2 正极隧道中发生可逆嵌脱反应^[12],实现电能与化学能之间的双向转换。在

电池放电完全后,3种锰相(尖晶石状的三价锰相、层状的二价锰相以及隧道型的二价锰相)共存^[40],充分说明水系锌离子电池的本质为 Mn^{4+} 、 Mn^{3+} 和 Mn^{2+} 之间的相互转变过程,可将其原理形象地比喻为“摇椅电池”,金属离子在正负极的两端来回奔跑^[41]。

3.1.2 应用可行性

水系锌离子电池具备高安全性、低成本与绿色环保等多重优势,契合风电场对储能系统的安全性、经济性和环境友好性的核心需求,展现出在大规模储能中的强劲应用潜力,尤其在补齐传统储能技术短板方面表现突出:1)安全性高、环境友好,电解液采用不可燃的中性水溶液,避免了锂电池中有有机溶剂带来的热失控隐患,也无铅污染,环境兼容性更强;2)倍率性能优异,具备快速充放电能力,响应时间短,优于传统铅酸电池,能适应风电出力波动大的运行工况;3)制造成本低,原料(如锌)储量丰富,电池可在常温下组装,规避了锂离子电池对洁净环境的依赖及钠硫电池复杂结构带来的成本压力。4)兼具功率与能量性能:在 12 kW/kg 功率密度下仍可维持高达 $320\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 的能量密度^[42],兼顾短时调频与长时储能功能,性能综合性优于多数传统电池。

3.1.3 发展现状及趋势

尽管水系锌离子电池在风电储能中展现出良好应用潜力,但能量密度与循环寿命仍是制约其发展的关键因素,当前研究主要聚焦于电解液设计与电极界面调控。

1)提升能量密度

传统铅酸电池和水系体系普遍面临能量密度偏低的挑战,而水系锌离子电池中窄的电化学稳定窗口成为能量释放的主要限制。为打破这一瓶颈,研究者通过构建复合水系电解液、引入离子添加剂^[43](如 Mg^{2+})、设计凝胶聚合物电解质或采用有机电解质等方式,扩大稳定窗口、减缓副反应,从而有效提高电池工作电压与能量输出,向锂离子电池能量密度水平靠近。例如,麦立强教授团队提出的不含有机溶剂的复合水系电解液,在 -20°C 环境下,锌金属负极沉积/剥离具有97.7%的高初始库仑效率、长达5600h的长循环寿命,以及高达50%的锌金属负极放电深度,展现出优异的动力学性能^[44],为水系电池的能量密度提升提供了有效路径。

2)提高循环寿命

在水系锌离子电池的长周期运行过程中,仍面临锌枝晶生长及锌负极腐蚀钝化等挑战^[45],这些问题若无法有效控制,将影响其在风电场中长时间、

稳定运行的可靠性。针对枝晶生长问题,研究重点集中于锌离子的均匀形核调控与沉积行为优化^[46]。例如,陈维教授团队提出“以突制突”策略,通过设计人工突起结构,在负极表面诱导局域强电场,调控锌离子在高曲率区域优先形核,显著提升了沉积均匀性,实现了3 000次循环后仍保持99.85%的库伦效率^[47]。此外,通过添加无机助剂与含氧官能团形成稳定络合物,有效加快成核速率并抑制析氢副反应。针对腐蚀钝化问题,锌负极的合金化设计也成为提升其电化学稳定性的有效手段,可在提高导电率的同时增强其抗腐蚀能力,显著延长电池使用寿命。

基于水系锌离子电池在安全性、环境兼容性与成本方面的显著优势,其未来发展将聚焦于突破能量密度与循环寿命的核心瓶颈,针对材料机理深化和低温适应性技术持续突破,有望成为支撑风电波动平抑与安全储能的理想解决方案,推动可再生能源高效并网消纳。

3.2 钠离子电池

钠离子电池作为一种结构与锂电池相似、性能相近的新型储能体系,凭借资源丰富、成本低廉以及良好的低温适应性等优势,正逐步成为风电储能领域的重要补充技术。本节将围绕钠离子电池工作原理及在风电储能中的应用可行性展开叙述。

3.2.1 原理

钠离子电池通常由碳基或氧化物负极、钠基过渡金属氧化物正极和非水电解液组成,其基本工作机制为 Na^+ 在正负极之间的可逆嵌脱过程,与锂离子电池的“摇椅机制”高度一致。 Na^+ 在充电时从正极脱出并嵌入负极,放电过程则相反,实现电能与化学能的可逆转化。该体系在常温下运行稳定,可通过调节正负极材料结构实现对能量密度、倍率性能等参数的优化。

3.2.2 应用可行性

钠离子电池在风电场储能系统中的应用潜力主要体现在以下几个方面:1)资源可及性强、成本低,钠广泛存在于海水和地壳中,供应稳定,成本远低于锂,有助于实现储能系统的大规模部署和可持续发展;2)温度适应性良好,相比某些锂基体系在低温下容量衰减严重,钠离子电池在零度以下环境中仍具备较好的放电性能,适用于风电场常见的高寒与高原环境;3)安全性优于部分锂体系,钠离子电池通常不采用高活性锂金属负极,热稳定性相对更好,具备更高的本征安全性,降低热失控风险;4)体系成熟度逐步提升,钠电池的正负极材料

体系、工业制备工艺等与锂电池具有较强共通性,具备良好的可拓展性和产业兼容性,利于快速规模化推广。

3.2.3 发展现状及趋势

近年来,钠离子电池因其资源丰富、成本低、安全性高等优势,成为学术界与工业界重点关注的新兴储能技术。目前,该技术正逐步迈向商业化应用。我国中科海钠公司已开发出基于 Na-Cu-Fe-Mn-O 层状氧化物正极和软碳负极的全电池体系,能量密度达 $120\text{ W}\cdot\text{h/kg}$,循环寿命超过2 000次;2025年4月,宁德时代发布的新一代钠离子电池更是将能量密度提升至 $175\text{ W}\cdot\text{h/kg}$,标志着该技术正在加速逼近锂电池性能水平。

尽管在消费电子、低速电动车等场景中已有一定应用,但钠离子电池在风电场等大规模储能系统中的推广仍面临能量密度不足、循环寿命偏低和产业链不成熟等瓶颈。因此,当前技术发展主要集中在以下几方面:1)高性能正极材料,目前研究聚焦于层状过渡金属氧化物(如 Na_xMO_2)和聚阴离子化合物(如 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$)的开发上。杨阳团队^[48]控金属元素组成、晶体结构和微观缺陷,可提升 Na^+ 的扩散动力学,增强材料结构稳定性,从而提高倍率性能和循环寿命;2)优化高容量负极材料,硬碳因其低嵌钠电位、较高的比容量和良好的可逆性^[49],被广泛认为是最具潜力的负极材料。当前研究集中于通过前驱体设计、热处理调控和表面改性等方式提升其初始库伦效率、扩展嵌钠位点和提高结构稳定性。例如:日本夏普公司推出的普鲁士白类正极/硬碳负极系统也实现了 $120\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 的能量密度和超1 200次循环寿命;3)优化电解液体系,为适应宽温区与高电压需求,研究者开发出高浓度电解液、凝胶电解质及新型添加剂体系^[50],以提升电化学稳定窗口,减少界面副反应,增强极间兼容性;4)完善产业配套链,钠离子电池当前尚处于产业化初期,技术成熟度与产业规模均不及锂电池,导致配套原材料、制造工艺与应用技术成本较高,产业链上下游协同不足。但近年来成本正稳步下降,如2024年初钠电池单位成本已降至0.6元/ $\text{W}\cdot\text{h}$,相较2023年初下降了25%^[51]。随着技术突破与规模化推进,未来成本仍有进一步下降空间;5)探索集成化系统方案,面对钠离子电池能量密度仍不及锂电池的现实限制,企业正探索协同融合的新路径。例如:宁德时代提出的AB电池系统解决方案,即通过在同一系统中集成钠离子与锂离子电池,并通过智能管理系统实现优势互补,在保障高能量密度的同时提升

低温性能和安全性,有望拓宽钠离子电池在风电储能等复杂应用环境中的适用性。

综合分析,钠离子电池具备价格低廉、安全性高、电化学性能优良等优势,契合风电场储能系统的应用需求,在现代化可再生能源的大规模储能具有巨大潜力,是下一代储能技术的有力竞争者,有望在风电场大规模储能中发挥重要作用。

4 结语

风电等可再生能源在并网过程中存在波动性、间歇性和随机性,易引发电能质量波动和系统稳定性问题。构建风储联合发电系统,采用大规模电化学储能技术,是提升风电并网稳定性和风能利用效率的重要途径。本文从发展现状、应用需求与技术趋势3个方面系统梳理了风电场储能系统的关键问题,提出了以需求为导向的新兴电池储能技术路径。风电场储能系统的技术选择需从安全性、储能特性、场景适应性和经济性4个维度出发,进行全生命周期的系统评估。目前,锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池和全钒液流电池在风电储能中发挥了重要作用,有效缓解了并网波动带来的电能质量下降与弃风问题。然而,其安全性与经济性仍是限制其进一步大规模应用的关键因素。随着储能技术的持续演进,具备高安全性、低成本和良好环境适应性的水系锌离子电池、钠离子电池等新兴电化学储能体系逐步崭露头角。未来,这些技术有望与现有体系形成优势互补、部分替代,支撑多样化风电接入场景下的高效储能需求。电化学储能作为支撑大规模可再生能源发展的关键环节,将在构建安全、高效、绿色的风电储能系统中发挥更大作用,并为我国“双碳”目标的实现提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] CHEN Shang, ZHU Tong, GAN Zhongxue, et al. Optimization of operation strategies for a combined cooling, heating and power system based on adiabatic compressed air energy storage[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(5): 1135-1148.
- [2] 严晓辉,徐玉杰,纪律,等.我国大规模储能技术发展预测及分析[J].中国电力,2013,46(8):22-29.
YAN Xiaohui, XU Yujie, JI Lyu, et al. Forecasting and analysis on large-scale energy storage technologies in China[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 22-29.
- [3] 郝佳豪,越云凯,张家俊,等.二氧化碳储能技术研究现状与发展前景[J].储能科学与技术,2022,11(10):3285-3296.
HAO Jiahao, YUE Yunkai, ZHANG Jiajun, et al. Research status and development prospect of Carbon dioxide energy-storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3285-3296.
- [4] DE SIQUEIRA L M S, PENG Wei. Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102252.
- [5] DÍAZ-GONZÁLEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.
- [6] 董宜宣,闫健.风电储能技术[J].科技与创新,2022(11):178-181.
DONG Yixuan, YAN Jian. Wind energy storage technology[J]. Science and Technology & Innovation, 2022(11): 178-181.
- [7] 任惠,范雯惠,米增强.风场储能系统的设计及控制综述[J].储能科学与技术,2013,2(5):460-467.
REN Hui, FAN Wenhui, MI Zengqiang. A review on the design and control strategy of energy storage system in wind power application[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(5): 460-467.
- [8] 韩永杰,任正义,吴滨,等.飞轮储能系统在1.5 MW风机上的应用研究[J].储能科学与技术,2015,4(2):198-202.
HAN Yongjie, REN Zhengyi, WU Bin, et al. Flywheel energy storage systems for a 1.5 MW wind generator applications[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 198-202.
- [9] 刘晓林,廖强强,周国定,等.电池储能系统在风力发电中的应用[J].电器工业,2013(10):71-74.
LIU Xiaolin, LIAO Qiangqiang, ZHOU Guoding, et al. Application of battery energy storage system in wind power generation[J]. China Electrical Equipment Industry, 2013(10): 71-74.
- [10] 魏鲲鹏,汪勇,戴兴建.飞轮储能系统在风力发电中应用研究进展[J].储能科学与技术,2015,4(2):141-146.
WEI Kunpeng, WANG Yong, DAI Xingjian. Review of flywheel energy storage systems for wind power applications[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 141-146.
- [11] 刘柳.平抑新能源发电波动的储能优化控制研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [12] LEE J, JU J B, CHO W I, et al. Todorokite-type MnO_2 as a Zinc-ion intercalating material[J]. Electrochimica Acta, 2013, 112: 138-143.
- [13] XU Chengjun, LI Baohua, DU Hongda, et al. Energetic Zinc-ion chemistry: the rechargeable Zinc-ion battery[J]. Angewandte Chemie (International ed. in English), 2012, 51(4): 933-935.
- [14] 侯付彬,王焕然,贲岳,等.新型大规模抽水压缩空气储

- 能技术[J]. 流体机械, 2019, 47(7): 44-47.
- HOU Fubin, WANG Huanran, BEN Yue, et al. A new technology for large-scale pumped compressed air energy storage[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(7): 44-47.
- [15] 胡雪松, 孙才新, 刘刃, 等. 采用飞轮储能的永磁直驱风电机组有功平滑控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 79-83.
- HU Xuesong, SUN Caixin, LIU Ren, et al. An active power smoothing strategy for direct-driven permanent magnet synchronous generator based wind turbine using flywheel energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 79-83.
- [16] ZHANG Chao, WEI Yili, CAO Pengfei, et al. Energy storage system: current studies on batteries and power condition system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(3): 3091-3106.
- [17] KRIVÍK P, BACA P, KAZELLE J. Effect of ageing on the impedance of the lead-acid battery[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 36: 102382.
- [18] CZERWINSKI A, OBREBOWSKI S, ROGULSKI Z. New high-energy lead-acid battery with reticulated vitreous Carbon as a carrier and current collector[J]. Journal of Power Sources, 2012, 198: 378-382.
- [19] CZERWINSKI A, WRÓBEL J, LACH J, et al. The charging-discharging behavior of the lead-acid cell with electrodes based on Carbon matrix[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2018, 22(9): 2703-2714.
- [20] COOPER A, FURAKAWA J, LAM L, et al. The ultra battery—A new battery design for a new beginning in hybrid electric vehicle energy storage[J]. Journal of Power Sources, 2009, 188(2): 642-649.
- [21] 张天任, 赵海敏, 郭志刚, 等. 铅炭电池关键材料研究进展及机理分析[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 1217-1222.
- ZHANG Tianren, ZHAO Haimin, GUO Zhigang, et al. Development status and mechanism analysis of the key materials in lead Carbon batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(6): 1217-1222.
- [22] 沈浩宇, 陈理, 王冰冰, 等. 泡沫铅板栅的比表面积对铅酸电池性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 856-860.
- SHEN Haoyu, CHEN Li, WANG Bingbing, et al. Influence of specific surface area of foam lead grid on performance of Lead acid batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 856-860.
- [23] UDDIN K, GOUGH R, RADCLIFFE J, et al. Techno-economic analysis of the viability of residential photovoltaic systems using Lithium-ion batteries for energy storage in the United Kingdom[J]. Applied Energy, 2017, 206: 12-21.
- [24] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices[J]. Science, 2011, 334(6058): 928-935.
- [25] ZU Chenxi, HONG Li. Thermodynamic analysis on energy densities of batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(8): 2614-2624.
- [26] GÜR T M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(10): 2696-2767.
- [27] NG M F, ZHAO Jin, YAN Qingyu, et al. Predicting the state of charge and health of batteries using data-driven machine learning[J]. Nature Machine Intelligence, 2020, 2(3): 161-170.
- [28] WEN Zhaoyin, HU Yingying, WU Xiangwei, et al. Main challenges for high performance NAS battery: materials and interfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(8): 1005-1018.
- [29] 胡英瑛, 吴相伟, 温兆银. 储能钠硫电池的工程化研究进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 781-799.
- HU Yingying, WU Xiangwei, WEN Zhaoyin. Research progress and prospect of energy storage sodium-sulfur battery engineering[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 781-799.
- [30] ANDRIOLLO M, BENATO R, DAMBONE SESSA S, et al. Energy intensive electrochemical storage in Italy: 34.8 MW Sodium-sulphur secondary cells[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 5(2): 146-155.
- [31] YUNG-FANG Y Y, KUMMER J T. Ion exchange properties of and rates of ionic diffusion in beta-alumina[J]. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1967, 29(9): 2453-2475.
- [32] XU Xiaofu, ZHOU Dong, QIN Xianying, et al. A room-temperature sodium-sulfur battery with high capacity and stable cycling performance[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3870.
- [33] 刘宗浩, 张华民, 高素军, 等. 风场配套用全球最大全钒液流电池储能系统[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(1): 71-77.
- LIU Zonghao, ZHANG Huamin, GAO Sujun, et al. The world's largest all-vanadium redox flow battery energy storage system for a wind farm[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(1): 71-77.
- [34] KIM K J, PARK M S, KIM Y J, et al. A technology review of electrodes and reaction mechanisms in Vanadium redox flow batteries[J]. Journal of Materials Chemistry, 2015, 3(33): 16913-16933.
- [35] WIKIPEDIA. Huxley hill wind farm [N]. 2011-10-08. http://en.wikipedia.org/wiki/Huxley_Hill_Wind_Farm.
- [36] BURGERMEISTER J. Technology Advancements Allow Bat-

- teries ToStore More Wind Energy[M/OL]. 2008-03-04.http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/03/technology-advancements-allow-batteries-to-store-more-wind-energy-51729.
- [37]李全龙,陶媛媛,王梦迪,等.全钒液流电池用关键材料技术指标特性需求分析和产业发展状况[J/OL].储能科学与技术,1-15[2025-07-02].https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0454.
- LI Quanlong, TAO Yuanyuan, WNAG Mengdi, et al. Demand analysis of technical indexes and characteristics of key materials for vanadium flow batteries and industrial development status[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 1 - 15[2025 - 07 - 02]. https://doi. org/10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2025. 0454.
- [38]戴纹硕.全钒液流电池用高导电性碳塑复合双极板的性能优化研究[D].大连:大连海事大学,2024.
- [39]BECK F, RÜETSCHI P. Rechargeable batteries with aqueous electrolytes[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(15/16): 2467-2482.
- [40]XU Dongwei, LI Baohua, WEI Chunguang, et al. Preparation and characterization of MnO₂/acid-treated CNT nanocomposites for energy storage with Zinc-ions[J]. Electrochimica Acta, 2014, 133(3): 254-261.
- [41]WANG Min, CAO Chengwei, SU Fan, et al. The electrochemical properties and reaction mechanism of orthorhombic Mn₂SiO₄ cathode for aqueous rechargeable Zinc ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2020, 477: 229013.
- [42]TAFUR J P, ABAD J, ROMÁN E, et al. Charge storage mechanism of MnO₂ cathodes in Zn/MnO₂ batteries using ionic liquid-based gel polymer electrolytes[J]. Electrochemistry Communications, 2015, 60(2): 190-194.
- [43]王娜.水系锌离子电池电解液添加剂研究进展[J].化工设计通讯,2024,50(9):121-123.
- WANG Na. Research progress on electrolyte additives for aqueous Zinc - ion batteries[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(9): 121-123.
- [44]央视网.科研人员在水系锌离子电池研究方面取得新进展[N]. 2024-10-13. https://news.cctv.com.
- [45]高旭,侯朝霞,王旭丹,等.水系锌离子电池锌负极研究进展[J].化工新型材料,2025,53(3):42-46.
- GAO Xu, HOU Chaoxia, WANG Xudan, et al. Research progress on Zinc anodes for aqueous Zinc-ion batteries[J]. New Chemical Materials, 2025, 53(3): 42-46.
- [46]RAN Y, DONG F, SUN S, et al. Aqueous Zinc-based batteries: active materials, device design, and future perspectives [J]. Advanced Energy Materials, 2025: 2406139.
- [47]SUN Jifei, ZHENG Xinhua, ZHU Zhengxin, et al. Engineering artificial protrusions of Zn anodes for aqueous Zinc batteries[J]. Nano Letters, 2025, 25(18): 7266-7275.
- [48]杨阳,杨慧雅,周新东,等.钠离子电池用磷酸盐基聚阴离子化合物正极材料研究进展[J].厦门大学学报(自然科学版),2025,64(1):45-62.
- YANG Yang, YANG Huiya, ZHOU Xindong, et al. Research progress of phosphate-based polyanionic compound cathode materials for Sodium ion batteries[J]. Journal of Xiamen University. Natural science, 2025, 64(1): 45-62.
- [49]张明杰,杨凯,刘振,等.钠离子电池热安全性研究进展[J].电池,2025,55(2):368-375.
- ZHANG Mingjie, YANG Kai, LIU Zhen, et al. Research progress in thermal safety for Sodium-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(2): 368-375.
- [50]李佩泓,张丽霞,冯武彤,等.锂离子电池失效机理综述[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(2):153-159.
- LI Peixuan, ZHANG Lixia, FENG Wutong, et al. Review on failure mechanism of Lithium-ion battery[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 153-159.
- [51]胡晗,田之滨,龚睿.钠离子储能技术发展现状与对策建议[J].水电与新能源,2025,39(1):8-11.
- HU Han, TIAN Zhibin, GONG Rui. Sodium-ion battery energy storage technology: current development status and strategic suggestions[J]. Hydropower and New Energy, 2025, 39(1): 8-11.

作者简介:

郑衍森(1997—),男,硕士,主要研究方向为规模储能技术应用。E-mail:614690652@qq.com。

苏黄盛(2004—),男,本科,主要研究方向为电化学储能技术(在读学生)。E-mail:202233310118@stu.scau.edu.cn。

梁业盈(1982—),男,工程师,主要研究方向为电力工程。E-mail:liangyeying@163.com。

梁业如(1986—),男,教授,主要研究方向为电化学储能技术应用、功能高分子及炭材料。E-mail:liangyr@scau.edu.cn。