

可再生能源系统与储能研究概析

孙慧馨*

上海电力大学人工智能学部, 上海

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

在全球能源结构加速转型背景下, 可再生能源占比显著提升, 但其间歇性与波动性导致电网调峰压力显著增加, 凸显储能技术对保障能源安全与电网稳定的关键作用。本文聚焦微电网系统储能研究, 简要分析其结构, 旨在提升供电可靠性与可再生能源消纳效率。将储能技术分为物理、电化学、电磁及化学储能四大类, 通过综述与案例分析, 评估了各类技术的经济性、效率及适用场景, 并探讨混合储能系统在平抑波动、提升动态响应方面的优势。

关键词

微网储能, 微网系统结构, 储能适用场景

An Overview of Renewable Energy Systems and Energy Storage Research

Huixin Sun*

Faculty of Artificial Intelligence, Shanghai University of Electric Power, Shanghai

Received: February 2, 2026; accepted: March 4, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Against the backdrop of accelerating global energy transition, the share of renewable energy has significantly increased. However, its intermittency and volatility have dramatically heightened peak-shaving pressures on power grids, highlighting the critical role of energy storage technologies in ensuring energy security and grid stability. This paper focuses on energy storage research within microgrid systems, briefly analyzing their structure to enhance power supply reliability and renewable energy integration efficiency. Energy storage technologies are categorized into four main types: physical, electrochemical, electromagnetic, and chemical. Through literature review and case studies,

*通讯作者。

the economic viability, efficiency, and applicable scenarios of each technology are evaluated. The advantages of hybrid energy storage systems in mitigating fluctuations and improving dynamic response capabilities are also explored.

Keywords

Microgrid Energy Storage, Microgrid System Architecture, Energy Storage Application Scenarios

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球能源结构加速转型下, 可再生能源系统储能研究愈发重要。2023 年, 可再生能源占全球发电量 28.3%, 风能和太阳能占比 12.6%, 较 2010 年增长近 8 倍, 但其间歇性和波动性大, 如德国风电场日发电量波动达装机容量 0%~90%, 加州太阳能电站正午出力是傍晚 5 倍以上, 致电网调峰压力剧增, 2022 年欧洲因风光出力骤降引发 12 次区域性电网稳定预警, 损失超 30 亿欧元[1]。同时, 储能技术成本下降推动需求, 2023 年锂离子电池储能系统成本较 2015 年下降 70%, 全球储能市场规模达 312 亿美元, 预计 2030 年突破 1.2 万亿美元, 但现有方案有瓶颈: 抽水蓄能受地理限制, 仅满足 15% 储能需求[2]; 电化学储能寿命低于 15 年, 退役电池回收率不足 40%, 制约高比例可再生能源电网稳定运行。储能研究意义重大: 保障能源安全与电网稳定, 平抑波动可使电网接纳风光发电量提升 30%~50%, 如澳大利亚 Hornsdale 储能项目(150 MW/194 MWh)投运后减少电网频率偏差事件 62%, 故障恢复时间大幅缩短; 提升能源利用效率, 我国弃风弃光率下降, 但年损失电量仍大, 高效储能技术可大幅压缩弃电率, 节约标准煤; 推动能源结构转型, 国际能源署预测, 实现 2050 年碳中和目标, 全球储能装机需大幅增长, 90% 依赖新型储能技术突破, 如液流电池储能寿命长, 美国铁-空气电池成本低, 为大规模长时储能提供可能[3]; 促进产业升级与经济增长, 储能产业链带动效应强, 2023 年全球储能相关就业岗位多, 中国储能产业年产值高, 带动关联产业增长。此外, 储能技术与交通、建筑等领域融合, 如电动汽车 V2G 技术可优化储能资源配置, 德国试点项目显示全国电动汽车参与调峰可提供强大调节能力, 凸显储能研究战略价值。因此, 储能研究是解决可再生能源消纳难题的技术关键, 也是实现“双碳”目标、推动能源技术创新与产业升级的战略支撑, 其现实价值成为全球能源转型核心议题。

2. 微电网系统结构

微电网系统是一种由分布式电源、储能装置、负荷及监控保护装置构成的小型发配电系统。它具备独立运行能力, 支持并网与孤岛模式切换。其结构通常包括分布式电源、储能装置、负荷等部分, 其中, 分布式电源是微电网的核心组成部分之一, 主要包括光伏电池、风力发电、燃料电池、微型燃气轮机等新能源形式。这些电源可以就地发电, 满足微电网内部的用电需求; 储能装置用于存储多余的电能, 在需要时释放出来, 以维持微电网的稳定运行。储能装置可以是物理储能、化学储能或电磁储能等形式。它们有助于实现削峰填谷、提高供电可靠性, 并在故障情况下提供“黑启动”支持; 负荷可分为重要负荷、可控负荷和可切负荷。重要负荷对电能质量要求较高, 需连续供电; 可控负荷可在必要时减少或中断供电; 而可切负荷则可以随时切除, 以保障关键设备的用电。并有控制系统负责协调分布式电源、储能装置和负荷之间的运行, 确保微电网的安全、稳定和经济运行。此外, 微电网还通过一个公共连接点

(PCC)与外部大电网相连。在正常情况下，微电网可以与大电网并网运行，共享电能；当大电网发生故障时，微电网能够迅速切断连接，独立运行，继续向重要负荷供电。这种灵活性使得微电网在提高供电可靠性、促进分布式能源就地消纳方面具有显著优势。如图 1 为微电网结构简图。

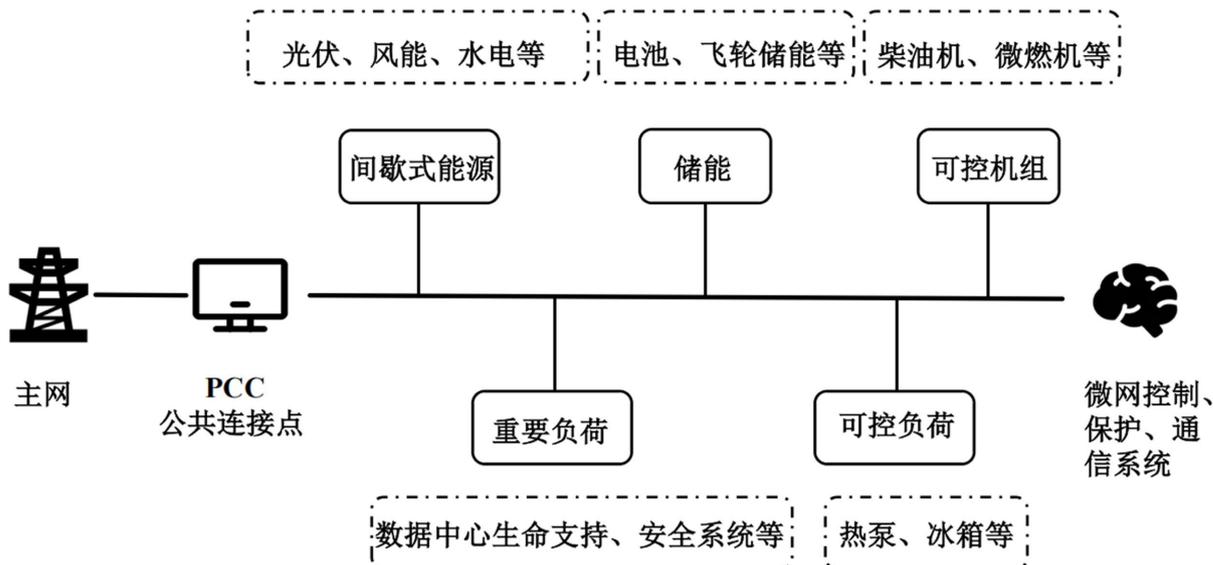


Figure 1. Simplified diagram of microgrid structure
图 1. 微电网结构简图

3. 微电网系统储能研究

微电网中的储能技术是保障系统稳定、灵活运行的核心环节，尤其在应对可再生能源波动、实现削峰填谷和黑启动等方面发挥关键作用。根据能量存储形式的不同，储能技术主要分为物理储能、电化学储能、电磁储能和化学储能四大类[4]。

3.1. 物理储能(机械储能)

物理储能通过机械或势能方式存储电能，适用于大规模、长时间的能量调节。通过其快速、可控的功率响应能力，直接参与电压与频率的动态调节，提升系统稳定性。

1. 抽水蓄能

抽水蓄能是利用低谷电能将水抽至上水库，在高峰时段放水发电的一种储能方式。这是目前成熟度较高的大规模储能技术，效率可达 70%~85%，但受地理条件限制较大。采用可变速机组后，抽水蓄能可实现更灵活的频率调节，既能进行日调节，也能参与日内高频调频，提升微电网对可再生能源波动的适应能力。抽水蓄能电站通常配备同步发电机，天然具备无功调节能力。通过调节励磁系统，可在不改变有功出力的情况下调节无功输出，有效抑制电压波动。在微电网中，它可作为“电压支撑节点”，特别是在长距离输电末端或弱电网区域发挥重要作用。付冬团队构建了风光抽水蓄能一体化微电网联合优化调度模型，采用信息间隙决策理论处理不确定性，通过改进人工兔优化算法实现高效求解。并通过实验验证了该一体化系统有效提升了乡村微电网的经济性与低碳性，为偏远地区清洁能源高效消纳与农业可持续发展提供了经济高效的解决方案。该方案充分发挥抽水蓄能的长时储能与多能互补优势，实现电力-水力系统协同优化[5]。

2. 压缩空气储能

压缩空气储能是在电力富余时压缩空气并储存在地下洞穴或压力容器中，放电时释放高压空气驱动膨胀机发电。该技术适合大规模能量型应用，且可与天然气补燃结合提升效率。新型压缩空气储能能配备电力电子变流装置，在并网模式下采用 PQ 控制，按调度指令输出有功和无功；在离网模式下切换为 V/F 控制，独立建立并维持微电网电压和频率。这种能力使其在主电网故障时能快速转为孤岛运行，保障关键负荷供电连续性。胡厚鹏构建了先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)仿真模型，构建的仿真模型能够正确地反应系统动态响应特性，通过对系统相关动态响应特性和仿真结果分析，可为先进绝热压缩空气储能系统控制系统的设计提供基础以及未来包含先进绝热压缩空气储能系统的智能电网的运行调度提供参考[6]。方颖聪等人提出耦合电解制氢的热储存压缩空气储能系统，通过压缩比与质量流量双参数调节及储气室动态建模，实现储气状态与系统性能的精准关联。该系统日储能量达 475 MW·h，可支撑 120 MW·h 高峰用电，相较传统方案在往返效率、能源转换效率及氢能供应上均达最优，氢能产出显著使得能效提升，为高比例新能源电网提供了高效多能互补的储能方案[7]。

3. 飞轮储能

飞轮储能一般通过电动机带动高速旋转的飞轮储存动能，响应速度达毫秒级，适用于短时功率支撑和频率调节。其寿命长、维护少，常用于微电网的瞬时功率平衡。飞轮储能极高的功率密度和快速充放电能力可在负荷突变时迅速释放或吸收功率，实现一次调频和二次调频支持。在微电网黑启动过程中，飞轮可作为“惯性源”建立初始频率，并维持系统稳定直至其他电源接入，与火电机组协同时，飞轮可补偿其响应滞后问题，避免反向调节导致频率进一步恶化。飞轮系统若采用同步电机或双馈电机结构，可在有功调节的同时调节励磁电流，提供连续无功输出，维持母线电压稳定。在微电网孤岛运行时，飞轮可切换为 V/F 控制模式，主动设定电压幅值和频率，作为电压-频率“锚点”支撑整个系统。姚海燕团队针对数据中心对高可靠供电的核心需求，提出了一种集成飞轮储能不间断电源(UPS)与风光可再生能源的微电网架构方案。对改进型多目标灰狼优化(MOGWO)算法进行了应用，通过精细化的能量调度策略，在显著提升供电可靠性的同时，有效降低了数据中心的综合用电成本，通过促进风光新能源的就地消纳，显著提高了可再生能源的利用率，从而实现了系统经济性与能源利用效率的协同优化，为高能耗数据中心的绿色化、可持续供电模式提供了具有理论价值与实践意义的解决方案[8]。陈正建团队聚焦于光伏与磁悬浮飞轮储能系统的融合应用，结合 MW 级飞轮特性构建光伏-飞轮储能方案，明确系统拓扑结构、运行逻辑及一次调频算法。基于所提出方案搭建模型系统，通过验证表明，系统响应特性良好，飞轮在光伏调频领域优势显著，加入飞轮后光储系统调频效果大幅提升[9]。

4. 重力储能

重力储能包括山体轨道机车、海下中空球体等新技术，利用重物升降实现能量转换。例如，海下储能系统通过海水压力驱动涡轮发电，具备零排放、长寿命潜力。何超智针对含山地落差式重力储能的微电网优化配置展开研究，建立风电、光伏及重力储能的数学模型与微电网优化配置模型，改进麻雀搜索算法得到 IMOSSA 以求解多目标优化问题。结合西北山地实测数据仿真验证，表明重力储能适配山地场景、助力风光消纳，可提升微电网经济性与可靠性[10]。

3.2. 电化学储能

电化学储能是当前微电网中应用广泛的储能形式，具有模块化、部署灵活、响应快等优势。电化学储能在微电网中通过毫秒级充放电响应，精准调节有功功率以稳定频率，同时利用 PCS 实现有功/无功协同控制，抑制电压波动并改善电能质量；在并离网切换时，其双向变流器可快速切换控制模式，保障无缝过渡与黑启动能力，结合智能控制策略延长设备寿命，从而在维持系统稳定性的同时提升整体可靠性与经济性。

1. 锂离子电池

目前, 锂离子电池占据市场主导地位, 具有能量密度高、循环寿命高, 效率超过 95% 的优良特性。其中, 磷酸铁锂(LFP)因其高安全性广泛应用于工商业微电网。李起伟采用“化零为整”策略, 研究锂离子蓄电池并联控制技术, 将多台电源并联组成微电网, 实现能量储备与输出功率扩容。详细阐述了并联控制原理, 设计了微电网架构及单体电源, 并在神东煤炭集团锦界煤矿完成现场测试。结果表明, 该系统在续航能力、能源利用率、可靠性和稳定性方面均显著优于单体后备电源[11]。

2. 铅碳/铅酸电池

铅碳/铅酸电池具有成本低, 回收体系成熟的特点, 适合中小型微电网。但能量密度较低, 循环寿命较短, 在实践中需通过碳添加剂改善性能。

3. 钠硫电池

钠硫电池能量密度高, 同时适合高温环境下的长时间储能, 但存在安全风险, 在选择该电池作为储能方式的时候需有严格热管理。

4. 液流电池

液流电池有着电解液可分离储存, 安全性高, 寿命长达数万次等优点, 适合长时储能场景。虽初始成本较高, 但运行稳定, 适用于对可靠性要求高的微电网。厉震面向居民用户侧用电经济性与可靠性需求, 研究全钒液流电池(VRB)在光储微电网中的集成应用, 提出光伏优先的能量管理策略。建立了包含 VRB 储能、光伏发电及电源管理系统的技术架构, 完成 10 kW 级实验平台构建与实测试验。结果表明, VRB 储能系统各项电能质量指标满足并网要求, 运行安全稳定, 在户用光储场景中具备良好的技术经济性与工程应用价值[12]。

随着风能、太阳能等可再生能源发展、智能电网建设推进及峰谷平衡需求凸显, 液流电池、钠硫电池、锂离子电池、铅酸电池等化学储能迎来良好发展的机遇[13]。

3.3. 电磁储能

以电磁场形式直接存储能量, 响应极快, 主要用于功率型调节。

1. 超导磁储能(SMES)

利用超导线圈产生强磁场储存能量, 响应速度达微秒级, 转换效率高, 适用于电网频率调节和电压支撑。但需低温环境维持超导状态, 成本高昂[14]。

2. 超级电容器

基于双电层原理, 功率密度高达 10 kW/kg, 可实现数十万次循环, 适合高频次充放电场景。常用于平滑光伏/风电的瞬时波动, 弥补电池响应不足。结合新能源输出功率受天气条件变化等因素影响较大, 具有随机性、间歇性、波动性等特点。而超级电容储能可以独立平抑短时间内的波动, 也可以通过混合储能系统平抑多时间尺度下波动, 以此延长电池的寿命, 减少经济成本。张步涵等人构建了基于串并联拓扑的超级电容储能系统, 通过并联补偿环节平抑风电输出功率波动, 利用串联补偿机制抑制电压暂降, 从而实现电压稳定性的有效保障[15]; 郑新昊等人针对光伏直流微电网并网运行工况, 提出了基于超级电容的并网电流脉动补偿控制策略, 显著改善了并网电能质量[16]。

电磁储能(含超导磁储能 SMES 与超级电容器)通过毫秒级双向功率响应与独立无功调节能力, 直接解决微电网电压骤降、频率突变等动态稳定问题: SMES 以超导线圈构建虚拟惯性, 快速补偿功率偏差并维持电压锚点; 超级电容器则凭借高功率密度与无化学衰减特性, 精准抑制电压暂降与频率瞬时波动, 二者均不参与日级能量转移, 而是作为“电能质量守护者”与“系统惯性替代者”, 在并离网切换、黑启动等场景中实现无缝过渡与暂态稳定, 显著优于传统储能的能量型削峰填谷功能。

3.4. 化学与其他储能

1. 氢能储能

通过电解水制氢储存电能，再通过燃料电池发电。具备高能量密度和长期储存能力，且零碳排放，适合季节性能量调节。但整体效率偏低(约 30%~40%)，系统复杂。在频率稳定方面，氢能发电单元可配置为“虚拟同步机”模式，模拟传统发电机的转子惯性，提供持续数小时的频率支撑，尤其适用于风光出力连续不足或恢复期的微电网；在电压控制上，燃料电池输出稳定直流电，经 PCS 并网时可实现恒压恒频(V/F)控制，在离网模式下作为主电源维持母线电压稳定。郭宇豪等人使用遗传算法迭代求解最优配置的方法，提出一种面向电-热-氢多能耦合的微电网双层优化配置方法。基于所构建的多能模型，仿真验证了氢能储能用于多能耦合微网时能够有效提升系统净收益与风光消纳率[17]。

2. 热能储能

热能储能一般是将电能转化为热能储存在熔盐、相变材料中，适用于冷热电联供(CCHP)系统。可在工业园区中实现能源梯级利用，提升综合能效。当电压上升时，储能系统优先启动电加热装置消耗多余电能，避免逆变器限发，实现“电压主动抑制”；在工业园区微电网中，热能储能可与燃气轮机耦合，通过调节发电与供热比例，灵活响应 AGC 指令，参与二次调频；针对这方面的研究，郭建平提出热能储能技术是支撑新型能源体系构建的关键使能技术，在促进高比例可再生能源消纳方面具有重要战略价值。通过多类型热储能技术的协同优化与系统集成，可有效平抑新能源出力的间歇性与波动性，提升能源供给的安全稳定性[18]。

3. 天然气储能

将可再生电力转化为合成天然气储存，后续用于发电或供热，具备调节性强、储存时间长的优点。可以通过分布式燃气发电单元在微电网中形成多点电压支撑节点，增强局部电网强度，减少电压跌落风险。

3.5. 混合储能系统趋势

单一储能难以兼顾能量与功率需求，因此微电网中常采用混合储能架构，如“锂电池 + 超级电容”、“飞轮 + 电池”组合等。前者可同时满足长时间供电与瞬时功率支撑，后者则提升系统动态响应能力，目前研究大多基于这种思路进行研究。以一种超级电容 - 蓄电池混合储能系统为例，其双向 DC/DC 变换器建模如图 2 所示[19]。

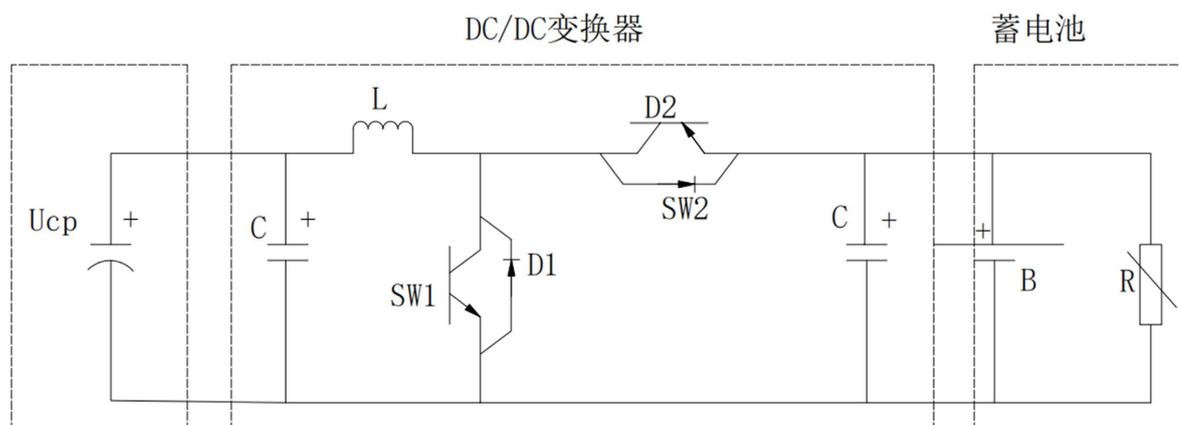


Figure 2. Bidirectional DC/DC converter for supercapacitor-battery hybrid energy storage system
图 2. 自超级电容 - 蓄电池混合储能系统双向 DC/DC 变换器

李太方聚焦于飞轮储能与压缩空气储能组成的混合储能系统,开展其在直流微电网中的应用及协调控制研究,构建光伏、风机、飞轮储能、压缩空气储能等模型并设计优化控制策略,通过仿真验证方案有效性并表明飞轮与压缩空气储能优势互补,融合后可充分发挥前者快速响应、后者大容量储能的特性,有效提升直流微电网运行稳定性与控制性能,为风光储微电网的高效运行提供支撑[20]。李煜鑫等人针对风光微电网负荷突变、风光功率波动引发的电压不稳、储能响应慢等问题,提出混合储能自适应功率分配与功率预测控制方案。构建模糊控制自适应功率分配模型及三步长功率预测模型,协调锂电与飞轮储能,依托飞轮快速响应特性降低突变功率对锂电的影响,仿真验证了所提策略可有效维持直流母线电压稳定、提升系统响应速度,凸显二者融合后互补赋能的优势[21]。步兆彬等人通过一阶滤波器实现功率初次分配提出一种基于SOC分区的混合储能功率协调分配策略,依据超级电容荷电状态划分五区域进行二次调节,利用功率守恒原理动态修正锂电池出力,实现系统功率均衡配置。并验证了该方法有效平抑功率波动、稳定母线电压、均衡荷电状态变化的能力,避免了过充过放及环流现象,显著提升了混合储能运行可靠性[22]。张攀等人针对孤网系统因设备故障、负荷波动及环境因素导致的供电不稳定问题,研究了储能技术提升供电可靠性的策略。基于事件树分析法,量化评估不同储能技术在孤网中的应用风险与可靠性,提出优化配置方案。仿真结果表明:合理配置锂电、铅酸电池、抽水蓄能及飞轮储能,可有效抑制供电波动、缩短响应时间,提升系统稳定性与持续供电能力,为偏远及特殊场景供电提供技术支撑[23]。

3.6. 微电网储能技术选型对比及典型应用场景匹配推荐

基于以上各种储能技术的特性,列出对应的储能技术参数对比,并根据不同特性,总结了对应的使用场景,并基于其运行特点总结出决策矩阵表,如表1、表2。

Table 1. Comparison of energy storage technology parameters and their applicable scenarios
表 1. 储能技术参数对比及其适用场景

技术类别	典型技术	单位成本 (2026年)	能量密度	功率密度	循环寿命	响应速度	适用场景
电化学储能[24]	锂离子电池(磷酸铁锂)	0.42~0.55 元/Wh	90~160 Wh/kg	300~800 W/kg	5000~7000 次	毫秒级	削峰填谷、工商业储能、应急备用、光伏配套
	液流电池(全钒)	0.80~1.20 元/Wh	20~40 Wh/kg	50~150 W/kg	10,000+次	秒级	长时储能(≥ 4 h)、调频调峰、可再生能源平滑
	钠离子电池	0.35~0.48 元/Wh	70~120 Wh/kg	200~500 W/kg	3000~5000 次	毫秒级	中小型储能、低成本替代锂电
电磁储能[25]	超级电容器	1.50~3.00 元/Wh	5~10 Wh/kg	5,000~10,000 W/kg	500,000+次	微秒级	瞬时功率支撑、电压稳定、频率调节
	超导磁储能(SMES)	>5 元/Wh	1~5 Wh/kg	10,000+ W/kg	100,000+次	微秒级	高精度调频、电能质量治理
物理储能[26]	抽水蓄能	0.30~0.45 元/Wh	10~20 Wh/kg	50~200 W/kg	50,000+次	分钟级	大规模削峰填谷(>100 MWh)
	飞轮储能	0.60~1.00 元/Wh	5~15 Wh/kg	1,000~5,000 W/kg	200,000+次	毫秒级	高频调频、瞬时功率补偿
化学与其他储能[27]	氢能储能	1.20~2.00 元/Wh	120~140 Wh/kg	50~100 W/kg	10,000+次(系统)	小时级	季节性储能、跨日/周调节

续表

	热能储能(熔盐/相变)	0.40~0.70 元/Wh	80~150 Wh/kg	100~300 W/kg	10,000+次	分钟级	冷热电联供(CCHP)、工业微电网
新兴技术 [28]	固态电池	0.60~0.90 元/Wh (预计 2027)	250~400 Wh/kg	300~600 W/kg	5000+次	毫秒级	高安全、高密度储能
	重力储能	0.35~0.50 元/Wh (预计)	10~30 Wh/kg	50~150 W/kg	50,000+次	秒级	长时储能、替代抽蓄

Table 2. Decision matrix table of microgrid under different operation modes

表 2. 微电网不同运行模式下的决策矩阵表

运行模式	关键需求	推荐技术组合	理由
并网模式	削峰填谷 参与电力市场套利 提供辅助服务(调频、调压)	锂离子电池 + 飞轮/超级电容	电池承担能量调度, 飞轮或超级电容提供毫秒级调频响应, 提升电网服务质量
	大规模新能源消纳	压缩空气储能 + 锂电	利用盐穴资源实现百兆瓦级储能, 配合锂电池平滑出力波动
	长周期调节、跨季节储能	氢储能	可储存数周甚至数月, 适合风光资源季节性差异大的地区
离网模式	供电独立性高 抗扰动能力强	锂离子电池 + 柴油发电机(备用)	电池为主电源, 柴油机作为黑启动和应急保障, 确保持续供电
	极端环境、高可靠性要求	氢储能 + 燃料电池	如南极科考站场景, 氢系统可实现零碳、长周期运行
	无地理限制的小型系统	重力储能 + 锂电	新兴技术, 环保且部署灵活, 适合海岛、偏远山区
混合模式 (并离网切换)	自动切换、无缝供电	并离网混合逆变器+锂电/液流电池	系统可在电网故障时自动转为孤岛运行, 保障关键负荷
	多能互补、智能调度	“光伏 + 储能 + 氢能” 微电网	实现风 - 光 - 氢 - 储 - 荷一体化, 提升能源自给率与系统韧性

4. 结束语

当前研究呈现技术多元与系统协同特征。电化学储能中, 磷酸铁锂电池成主流, 钠离子电池乡村推广, 全钒液流电池成大型长时储能优选; 机械储能方面, 压缩空气储能突破地理依赖, 飞轮储能成频率调节核心。控制策略上, 智能储能管理系统融合数字孪生与人工智能, 精准预测并优化充放电策略, 边缘计算增强系统能力。多能耦合趋势显著, 微电网融合多种能源形式提升能效。政策与市场机制完善, 多地试点储能容量补偿政策, 虚拟电厂聚合分布式储能参与调峰, 推动微电网由单向受电模式向源荷双向互动模式转变。未来研究预计整体将迈向“储能核心化、技术协同化、场景多元化”。微电网规划将转向“储能统筹调度”, 储能成核心枢纽, 通过 AI 算法实现端到端智能调度提升能源配置效率。长时储能技术成本将降低, 液流电池、压缩空气储能成本有望 2030 年降至 0.3 元/kWh 以下, 支撑 10 小时以上调峰, 固态电池推动家庭微网普及。“光储充氢”一体化模式成主流, 提升可再生能源消纳率, 氢储能实现跨日、跨周、跨季节能量调节, 适用于离网场景。区块链技术通过分布式交易机制优化微电网能量管理,

提升系统经济性与运行效率，为碳中和目标提供技术支撑。安全与韧性成系统设计首要考量，模块化设计提升可维护性。全球化适配推动“区域定制化”储能方案，满足不同地区需求。

参考文献

- [1] Ember (2024) Global Electricity Review 2024: Global Crosses 30% Renewable Electricity Milestone.
- [2] 国际可再生能源署. 可再生能源储能分析: 锂离子电池成本显著下降及市场扩张[R]. IRENA, 2023.
- [3] 中国能源研究会核能专委会. 国际能源署发布《2050年净零排放: 全球能源行业路线图》[Z]. <https://www.china-nea.cn/site/content/39330.html>, 2021-06-04.
- [4] 高春雷. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(5): 394-396+426.
- [5] 付冬, 苗桂喜, 王鑫, 等. 含小型抽水蓄能电站的乡村微电网鲁棒优化调度策略[J]. 水电能源科学, 2026(3): 216-221.
- [6] 胡厚鹏. 分布式微电网中压缩空气储能系统的动态建模[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [7] 方颖聪, 莫春兰, 党玉荣, 等. 微电网与压缩空气储能系统的多能流协同调度[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 605-615.
- [8] 姚海燕, 冯姗姗, 郭强, 等. 含飞轮储能不间断电源的新能源微网优化调度研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(12): 2006-2013.
- [9] 陈正建, 魏少帅, 纪虎军, 等. MW级飞轮在光储能基地中应用分析[J]. 新能源科技, 2025, 6(6): 37-44.
- [10] 何超智. 基于IMOSSA的含重力储能的微电网优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
- [11] 李起伟, 李忠奎, 王海南. 基于锂离子蓄电池的煤矿井下储能微电网设计研究[J]. 煤炭技术, 2024, 43(6): 233-237.
- [12] 厉震. 全钒液流电池在光储微网系统的应用[J]. 吉林电力, 2025, 53(2): 1-4.
- [13] 马永泉, 柯克, 顾大明. “铅碳”电池在储能应用方向的概析[J]. 电化学, 2015, 21(5): 455-458.
- [14] 吕志敏. 自动控制与储能技术在智能微电网中的应用[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3581-3582.
- [15] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4.
- [16] 郑新昊, 祝龙记. 光伏直流微电网超级电容储能控制策略研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(4): 497-501.
- [17] 郭宇豪, 刘新刚, 田易之. 考虑电-热-氢多元储能的微电网系统双层容量优化配置[J/OL]. 发电技术: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20251223.1756.006>, 2026-01-31.
- [18] 郭建平. 新能源中热能储能技术的集成与优化[J]. 科技与创新, 2025(13): 101-104.
- [19] 高铮. 超级电容——蓄电池混合储能系统应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [20] 李太方. 飞轮与压缩空气混合储能系统协调控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [21] 李煜鑫, 何志琴, 范强, 等. 风光微电网中混合储能系统功率配置及预测控制改进策略[J/OL]. 南方电网技术: 1-13. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=JITIT-mCwHjKGbo3McmDaprHOfuhY1I4MBF7_cFvrX93i5_yiEXIctbMT9YZ6tevS4lgZrm4VKf-bOQ3Aadn6U6sRY9b5KD6ifWLQC4WIZbmuV-nXhXKUZegxM92QxeMqc4PCrtdb2BWQ4rY6xi50ZVw-bArTPsLNQIs3B8rhB9PPg=&uniplatform=NZKPT, 2026-01-31.
- [22] 步兆彬, 蒋东伟, 王生, 等. 含锂电池和超级电容的混合储能系统功率均衡分配方法[J]. 电器工业, 2026(1): 95-99.
- [23] 张攀, 丁光远, 盛辉. 储能技术在孤网运行下提升供电可靠性的策略研究[J]. 电力设备管理, 2025(3): 60-62.
- [24] 中关村储能产业技术联盟(CNESA). 2026储能产业白皮书[Z]. 2026.
- [25] 国家电网企业. Q/GDW 564-2023 储能系统接入电网技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2025.
- [26] 电力规划设计总院. 中国电力发展报告 2020 [R]. 北京: 人民日报出版社, 2021.
- [27] 国际可再生能源署(IRENA). Hydrogen Innovation Outlook 2025.
- [28] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2023(摘要版) [Z]. 2023.