DOI：10.19666/j.rlfd.202511025

电化学储能电站与新能源发电耦合系统设计、评价及规划配置研究综述

王佳佳[1,2]，李　昊[1,2]，王伟佳[1,2]，陈　磊[1,2]，孔艳强[1,2]，
张冬月[1,2]，崔　柳[1,2]，杨立军[1,2]
（1. 华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室，北京　102206；
2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院，北京　102206）

［摘　　要］【意义】目前我国风电和光伏装机容量已达到 1 680 GW，其发电波动性和间歇性对电力系统灵活性调节提出了更高要求。电化学储能技术因其响应能力强、能量转换效率高、经济性好等优势，成为支撑高比例新能源并网的关键技术。【评论】本文系统综述了电化学储能与新能源发电耦合系统的核心问题。在设计方面，对比了储能电站与风电、光伏及风光互补系统在不同位置（如直流侧、交流侧及升压站侧）接入的拓扑结构及其技术经济性，明确了交流侧集中式接入的工程主导地位，以及直流侧、交直流混合组网的技术潜力。在运行评价方面，本文围绕平抑功率波动、提升发电预测精度和增强调峰能力三大典型应用场景，将技术性指标（如波动平抑效果、储能充放电特性）与经济性指标（如成本效益、投资回报）置于同一框架下分析，为“源-储”耦合系统的优化运行与科学决策提供了量化依据。在规划配置方面，提出了“场景驱动-策略耦合-容量适配”的共性方法论，总结了不同场景下储能运行控制策略及功率与容量的配置方法。【展望】最后，本文展望了耦合电力市场机制、融合人工智能技术、发展多类型储能互补集成等未来重点方向。本综述旨在为新型电力系统中“源-储”协同的规划、设计与运行提供系统的理论参考与技术指引。

［关　键　词］电化学储能；新能源发电；系统耦合；评价指标；配置及运行策略

［引用本文格式］王佳佳，李昊，王伟佳，等. 电化学储能电站与新能源发电耦合系统设计、评价及规划配置研究综述[J]. 热力发电，2026，55(7)：1.　Wang J J，Li H，Wang W J，et al. A review on the design，evaluation，and planning configuration of integrated electrochemical energy storage power stations and renewable power plants[J]. Thermal Power Generation，2026，55(7)：1.

A review on the design, evaluation, and planning configuration of integrated electrochemical energy storage power stations and renewable power plants

Wang Jiajia[1,2], Li Hao[1,2], Wang Weijia[1,2], Chen Lei[1,2], Kong Yanqiang[1,2],
Zhang Dongyue[1,2], Cui Liu[1,2], Yang Lijun[1,2]
(1. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Significance] The installed capacity of wind and photovoltaic power has reached 1 680 GW in China. However, their inherent volatility and intermittency pose higher demands on the flexibility and regulation capability of the power system. Electrochemical energy storage (EES) has emerged as a key technology to support high-penetration renewable energy integration owing to its advantages such as rapid response capability, high energy conversion efficiency, and favorable economics. [Discussion] This review systematically explores the core issues

收 稿 日 期：2025-11-10　修 回 日 期：2025-12-19　接 受 日 期：2025-12-25
基 金 项 目：中央高校基本科研业务费专项资金资助（2025JC003）；北京市自然科学基金项目（3242022）
Supported by：Fundamental Research Funds for the Central Universities (2025JC003); Beijing Municipal Natural Science Foundation (3242022)
第一作者简介：王佳佳（2001），女，硕士，主要研究方向为新能源发电、电化学储能，13166938918@163.com。
通信作者简介：王伟佳（1990），女，博士，副教授，主要研究方向为化学储能，wangwj@ncepu.edu.cn。

of integrated electrochemical energy storage power stations and renewable power plants. In terms of system design, different topological configurations of EES connected to wind power, photovoltaics, and hybrid wind-photovoltaic power plants are compared, with their technical and economic performances being assessed for connection at different locations (DC side, AC side, and substation side). The analysis indicates that centralized AC-side integration holds an engineering-dominant position, while DC-side coupling and AC/DC hybrid configurations also show technical potential. For operational evaluation, focusing on three typical application scenarios (smoothing power fluctuations, improving generation forecast accuracy, and enhancing peak-shaving ability), this paper places technical indicators (e.g., fluctuation suppression effect, charge/discharge characteristics) and economic indicators (e.g., cost-effectiveness, investment return) within the same framework for analysis, thereby providing a quantitative basis for the optimal operation and informed decision-making of source-storage coupled systems. With regard to planning and configuration, a generalized methodology characterized as “scenario-driven, strategy-coupled, and capacity-adapted” is proposed, and the control strategies for energy storage operation as well as the power and capacity sizing methods under different scenarios are summarized. [Prospect] Finally, this review highlights future key directions including coupling with electricity market mechanisms, integration of artificial intelligence technologies, and development of multi-type energy storage complementary integration. This review aims to provide a systematic theoretical reference and technical guidance for the planning, design, and operation of source-storage coordination in new-type power systems.

Key words: electrochemical energy storage; renewable energy power generation; system coupling; evaluation indicators; configuration and operation strategies

国家能源局数据显示，2025 年 1—5 月我国光伏发电装机容量已达 10.8 亿千瓦，同期增长 56.9%；风电装机容量为 5.7 亿千瓦，同比增长 23.1%。截至 5 月底，全国发电装机容量已达 36.1 亿千瓦，同比增幅为 18.8%[1]。根据“双碳”战略部署，预计到 2060 年，风电与光伏装机比例将超过七成，发电量占比将突破 55%[2]，成为我国能源结构主导力量。然而，风能和太阳能资源固有的强波动性和随机性[3]，会使其在大规模并网时导致电网频率偏移、电压闪变等问题，直接威胁电力系统的安全稳定运行。2025 年西班牙极端天气导致电网崩溃，该国 70%的电力依赖可再生能源却因风电骤降、储能不足而陷入瘫痪，基础设施老化与跨国互联缺陷加速了系统崩溃，警示全球—绿色转型必须同步提升电网韧性[4]。

储能作为破解新能源消纳难题的关键技术，可显著提升间歇性电源可控性与电网兼容性[5]。当前，我国储能示范项目正聚焦“新能源+储能”，重点围绕发电侧、电网侧与用户侧三大应用场景展开，展现了储能技术向大规模、高效率、长时化、国产化发展的趋势。表 1 总结了近年来我国典型新能源配套电化学储能示范项目概况[6-10]。新能源-储能联合系统聚焦新能源波动平抑与消纳提升，可直接适配新能源的波动特性，但在实际应用中仍面临拓扑优化、容量配置与经济性平衡等多重挑战。

表 1 我国典型电化学储能示范项目
Tab.1 Typical EES demonstration projects in China

项目名称	规模/类型	特点/关键技术	投运时间
新疆吉木萨尔光储一体化项目[6]	200 MW/100 MW·h 全钒液流体系	我国最大全钒液流光储一体化项目，具备超长循环寿命、高安全性、长时储能能力	2025 年 9 月进入调试
吉林松原乾安中卉玉字储能电站	100 MW/400 MW·h 全钒液流体系	我国严寒地区首座全钒液流电池共享储能电站，–30 ℃稳定运行，年消纳新能源电量约 3 亿千瓦时	2025 年初正式投产
内蒙古磴口储能电站项目[7]	605 MW/1 410 MW·h 磷酸铁锂体系	国内当前单体容量最大的新能源配储项目/满足长时调峰需求的同时实现快速响应	2025 年 12 月并网
大唐湖北潜江储能电站项目[8]	100 MW/200 MW·h 钠离子体系	国内首个百兆瓦时级钠离子储能示范/核心装备国产化，系统效率≥80%	2024 年 6 月一期工程投运
云南永仁储能电站项目[9]	300 MW/1 200 MW·h 全钒液流体系	全国规划规模最大的长时储能项目，运行期 25 年，可实现年平均放电量 3.6 亿千瓦时	2025 年 2 月开工
三峡乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目[10]	550 MW/1 100 MW·h 磷酸铁锂体系	全国首个“源网荷储”一体化示范工程，年发电量可达 63 亿千瓦时	2025 年 9 月完成 50 MW/100 MW·h 数字储能示范工程验收

储能与新能源场站耦合的接入方式直接影响系统性能及经济效益。文献[11]指出储能在风电场交流侧集中式接入比分散式更具成本优势，所需配置的最大功率和容量可分别降低 41.62%、86.56%。文献[12]表明，光伏直流侧分散式接入可显著提升储能系统的充放电效率。其中，铅炭电池、磷酸铁锂电池储能系统平均日效率可分别达 86.6%、90.8%。西北地区并网风光储系统采用先进荷电状态控制，在风电波动 30%情况下精准调节储能，保障供电持续稳定，其年均发电效率可提升 15%，经济与环境效益显著[13]。本文系统梳理了新能源场站接入储能时，集中式/分散式、交流/直流、混合接入模式对耦合系统技术经济性能的影响以及拓扑结构优化选择，为新能源场站科学配储提供决策依据。

在耦合系统运行评价方面，现有研究多聚焦特定环节，所提出的评价指标具有明确的目标导向性和应用价值。然而，随着“源-储”耦合系统规划、设计与运行优化需求日益复杂，亟需建立一套统筹考虑新能源发电能力、储能系统技术性能与耦合系统经济性等多维目标的综合评价视角。本综述旨在系统梳理并整合现有文献中分散于不同侧重点的关键指标，通过将技术性指标（如波动平抑效果、储能充放电特性）与经济性指标（如成本效益、投资回报）纳入同一框架，以期为相关研究者与从业者提供兼具系统性与针对性的参考范式。

风储、光储及风光储系统在平抑功率波动、提高预测精度与增强调峰能力这三类典型应用场景中，其控制目标与方法框架展现出显著的共性特征。基于对现有文献进行系统梳理，本综述聚焦于识别并归纳这些共性，总结出“场景驱动-策略耦合-容量适配”这一递进式的分析视角。通过系统阐述其适用性，为新能源场站接入储能系统时的设计及运行提供可落地的技术参考与路径指引。

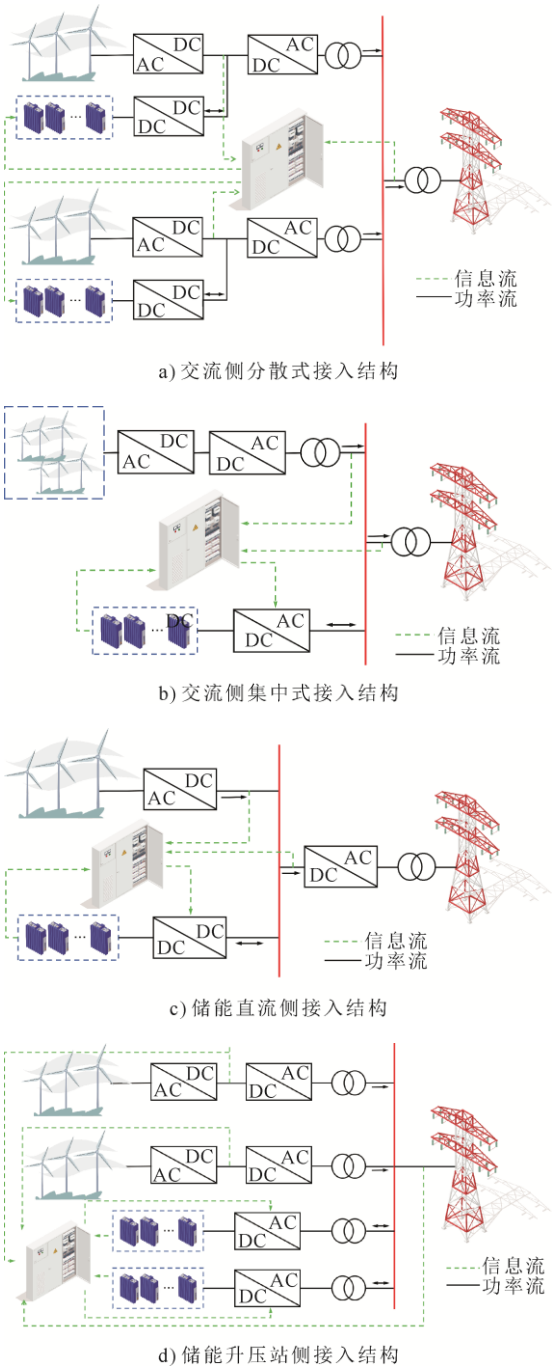
1 储能电站与新能源发电耦合系统设计

1.1 储能电站与风力发电耦合系统设计方式

风储耦合系统中储能接入位置主要分为风机交流侧、风机直流侧及升压站交流侧，其拓扑结构如图 1 所示。

1）配置在风机交流侧

风机交流侧，储能的接入主要有分散式与集中式 2 种模式，如图 1a)、图 1b)所示。分散式接入需为每台风机单独配置储能，成本高、应用范围受限且功率分配控制复杂[14]。在风电场中，受机组地理位置差异及尾流效应影响，各风机输出功率呈时空异步波动，叠加后形成互补，使场站层面的整体功率波动显著平滑。因此，在同等总容量下，集中式储能系统通常表现出更优的性能[15]。然而，由于风电场输出交流母线的功率等级高，系统所需储能装置的容量及额定功率非常大，其成本较高[16]。



a) 交流侧分散式接入结构

b) 交流侧集中式接入结构

c) 储能直流侧接入结构

d) 储能升压站侧接入结构

图 1 风储耦合系统的储能接入方式

Fig.1 Connection modes of the electrochemical energy storage system integrated with wind power station

2）配置在风机直流侧

储能系统在风机直流侧接入，可节省主变压器与线路资源，降低投资，有助于提升单台风机运行性能，其拓扑结构见图 1c)。在直流风电场中，永磁直驱机组因控制简便、维护需求低而更具应用优势[17]。储能配置通常按风机额定功率的 10%~30%设计功率容量，持续时长 2 h，以满足平抑功率波动、调频响应及有功功率调节等需求[18]。尽管直流侧配置储能具有降低极限负载、提供惯量支撑、调频及有功功率调节等优势[19]，但其主控系统需同步协调变桨控制、储能充放电与电压环调节、多参数耦合导致控制算法极为复杂，目前应用成熟度不高[20]。

3）配置在升压站交流侧

储能系统升压站交流侧接入采用集电线路结构，通过 PCS 与升压变压器实现集中调控，如图 1d)所示。该模式下，储能系统充放电策略以整个风电场控制为目标，不受单台风机或单个储能子系统影响，提高了系统可靠性与经济性；储能系统集中布置在升压站周边也便于开展运行维护工作。相较风机侧分散式接入，该方案可避免因机组停机检修导致储能资源闲置等问题。但该方案存在功能解耦不足，需部署智能协调控制系统以实现源储协同[21]。

1.2 储能电站与光伏发电耦合系统设计方式

光储耦合系统中储能接入位置主要分为光伏交流侧、光伏直流侧及升压站交流侧，如图 2 所示。

1）配置在光伏交流侧

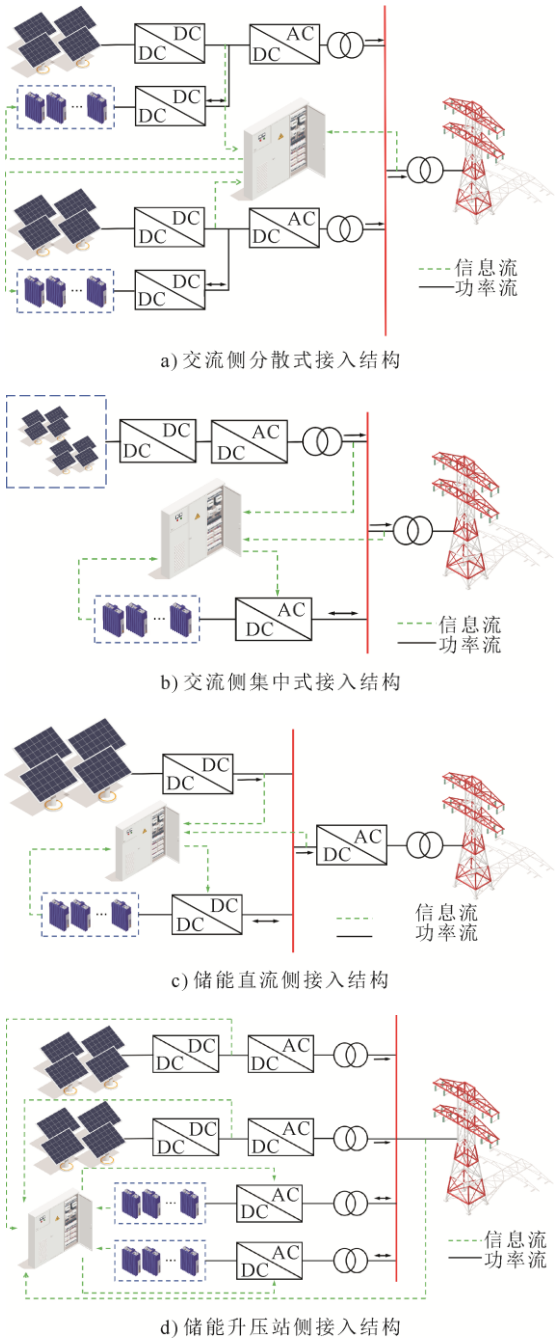
在光伏交流侧配置的储能系统同样可采用分散式或集中式接入，如图 2a)、图 2b)所示，其特点与 1.1 节中风机交流侧类似。交流侧接入方式有效克服了直流侧储能在电力统一调度方面的限制，便于在役光伏电站进行升级改造；同时兼容并/离网运行模式，通过智能控制或电网调度实现站内余电存储及站外低谷电力调用，显著提升经济性。

2）配置在光伏直流侧

该方案将储能装置配置在光伏阵列直流侧，如图 2c)。系统中的光伏发电单元和储能单元共享一个逆变器，结构简单且减少了交直流的转换损耗，提高了整体能量转换效率。然而，此类系统需对常规光伏并网逆变器进行改造或重新设计[22]，使其在实现光伏阵列逆变功能的基础上，同时具备对储能单元的充放电控制与能量管理等能力。

3）配置在升压站交流侧

升压站交流侧接入的特点是兼容性强，适配新建及已建电站改造，结构清晰可独立部署，运维便捷。但需配置专用智能协调控制系统以实现功能联动，建设成本较高[23]，其结构示意如图 2d)。



a) 交流侧分散式接入结构

b) 交流侧集中式接入结构

c) 储能直流侧接入结构

d) 储能升压站侧接入结构

图 2 光储耦合系统的储能接入方式

Fig.2 Connection modes of the electrochemical energy storage system integrated with photovoltaic power station

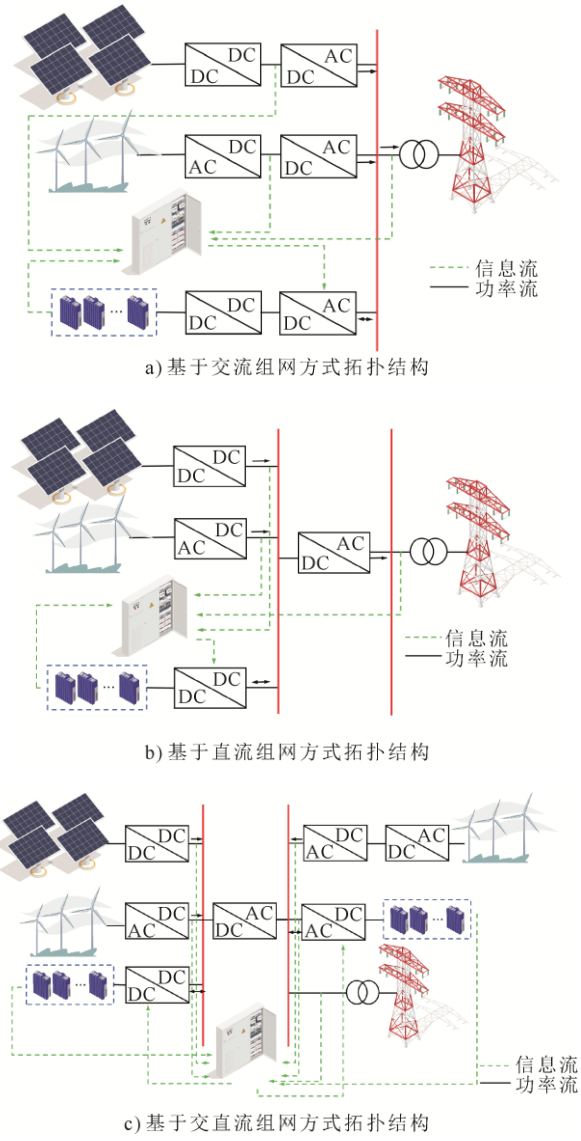
1.3 储能电站与风光发电耦合系统设计方式

风光储耦合系统组网方式主要包括交流组网、直流组网及交直流混合组网，其结构如图 3 所示。

1）基于交流组网方式拓扑结构

基于交流组网的风光储系统并网拓扑结构如

图 3a)所示。系统中各发电单元与储能单元经变流器汇集于同一交流母线。这种接入方式中，能源单元首先通过独立逆变器完成直-交流转换，之后以并联方式接入公共电网。目前这种技术应用较为广泛且发展较为完善，但光伏组件和蓄电池等直流型电源必须通过逆变设备才能实现交流并网，增加了系统初期的建设投入[24]。



a) 基于交流组网方式拓扑结构

b) 基于直流组网方式拓扑结构

c) 基于交直流组网方式拓扑结构

图 3 风光储耦合系统的储能接入方式

Fig.3 Connection modes of the electrochemical energy storage system integrated with hybrid wind-photovoltaic power station

2）基于直流组网方式拓扑结构

图 3b)展示了一种采用直流组网架构的风光储发电系统拓扑结构。风、光、储单元通过变流器集中汇入直流母线，通过并网逆变器实现交直流转换后经变压器接入配电网。直流配电网结构较为单一，使用较少的电力电子变换单元，降低了投资与损耗，且无谐波/无功问题，控制方便，无需相位同步。但当直流配电网发生故障时，可能产生非常高的故障电流，为故障单元的设计带来巨大挑战[25-26]。

3）基于交直流混合组网方式拓扑结构

交直流组网方式融合了交流与直流组网的技术优势，使网架结构更具灵活性与拓展性，其结构如图 3c)所示。相较于单一供能模式，交直流组网方式显著减少了电能转换层级，特别是在应对分布式发电设备与储能系统多样化接入需求及容量持续增长方面展现显著技术优势[27]。该组网方式能够显著提升综合经济效益，有效控制初始投资，并通过减少功率转换环节及相关设备，使系统操作更具灵活性。同时，该结构有助于降低运行耗能，从而全面提升电网在安全性、经济性及可靠性等方面的整体性能[28]。

1.4 不同接入方式对比分析与讨论

储能系统接入方式的选择需综合考虑技术成熟度、经济成本、电网要求及具体应用场景。集中式接入在平滑场站整体功率波动方面具有明显优势，且更易于调度和维护，是当前大型新能源场站的主流选择。直流侧接入虽能提升效率，但控制复杂，适用于对效率和响应速度要求极高的特定场景。交直流混合组网代表了未来多能互补系统的发展方向，但其设计与控制复杂度高，需进一步开展关键技术攻关与工程示范。

2 储能电站与新能源发电耦合系统运行指标

2.1 平滑新能源发电波动方面

为表征新能源并网功率平抑效果及储能系统运行性能，可从新能源功率平抑技术指标、储能电站运行技术指标、耦合系统运行经济指标三方面进行量化评价，相关指标见表 2[29-33]。表 2 中：$P(k)$为采样点 k 的新能源发电功率；$\Delta P(t)$为功率波动量；P_N 为新能源发电场额定装机容量；N 为并网周期内的采样次数；P_{ave} 为新能源发电平均功率；$P_g(k)$为 k 时刻系统流入电网功率；T 为储能出力周期内的采样周期数；$C_{SOE,b(k)}$为 k 时刻储能系统 SOE；$C_{SOE,max}/C_{SOE,min}$ 为储能系统放电上/下限值；T_c 为表示储能系统的控制周期；$S_x(t)$为 t 时刻储能系统荷电状态；$S_{x,ref}$ 为储能系统荷电状态期望值；$S_{x,max}/S_{x,min}$ 为储能运行处于 SOC 上/下限；$P_b(k)$为储

能电池 k 时刻输出功率；$P'_{\mathrm{x}}(t)$为储能系统 x 在 t 时刻实际出力；P_{rate} 为新能源发电装机容量；χ为新能源发电功率预测可信度；P_{c} 为单位弃风弃光惩罚价格；$b(t)$为采样区间 t 上的惩罚函数；$|\Delta P_{\mathrm{G}}-L|$为采样区间 Δt 上的功率波动越限量；$r(t)$为区间 t 上的新能源发电入网电价；α 为惩罚系数。

表 2 储能电站平抑新能源并网功率波动评价指标

Tab.2 Assessment metrics for smoothing the renewable energy integration power fluctuations

类型	名称	公式	意义
新能源功率平抑技术指标[29]	功率波动量	$\Delta P(t)=\max\limits_{k\in t}[P(k)]-\min\limits_{k\in t}[P(k)]$	新能源发电波动变化幅度或强度
	功率变化率	$v(t)=\dfrac{\Delta P(t)}{\Delta t}$	新能源发电波动变化快慢
	功率波动率	$\gamma(t)=\dfrac{\Delta P(t)}{P_N}\times 100\%$	新能源发电功率变化程度
	功率标准差	$\sigma=\sqrt{\dfrac{1}{N}\sum\limits_{k=1}^{N}[P(k)-P_{\mathrm{ave}}]^2}$	新能源发电功率平滑程度
	平滑度	$\lambda_{\mathrm{level}}=\dfrac{\sum\limits_{k=2}^{N}\lvert P(k)-P(k-1)\rvert}{P_N}$	新能源发电功率曲线平滑程度
	并网功率波动均值	$\Delta P_{\mathrm{g,mean}}=\dfrac{1}{N-1}\sum\limits_{k=0}^{N-1}\lvert P_{\mathrm{g}}(k+1)-P_{\mathrm{g}}(k)\rvert$	新能源发电功率波动平均水平
储能电站运行技术指标[30-31]	储能电池出力能力	$C_{\mathrm{o,b}}=\sqrt{\dfrac{1}{T-1}\sum\limits_{k=0}^{T-1}(C_{\mathrm{SOE,b}}(k)-0.5)^2}$	储能工作过程中出力能力强弱
	SOC 平衡指标	$\varepsilon_{\mathrm{x}}(t)=\dfrac{2\times(S_{\mathrm{x}}(t)-S_{\mathrm{x,ref}})}{S_{\mathrm{x,max}}-S_{\mathrm{x,min}}}$	电池组中各个单体电池充放电状态均衡程度
	储能电池死区时间	$T_{\mathrm{d}}=T_{\mathrm{C}}\times\sum\limits_{k=0}^{N-1}\left[1-h\left(\dfrac{C_{\mathrm{SOE,b}}(k)}{C_{\mathrm{SOE,min}}}\right)\times h\left(\dfrac{C_{\mathrm{SOE,max}}}{C_{\mathrm{SOE,b}}(k)}\right)\right]$ $h(x)=\begin{cases}1, & x\geqslant 1\\ 0, & x<1\end{cases}$	储能系统失去波动抑制能力的时间
	储能电站充放电总能量	$E_{\mathrm{b}}=\sum\limits_{k=0}^{N-1}P_{\mathrm{b}}(k)\lvert T_{\mathrm{c}}$	过去电池能量交流强度
	储能电站充放电次数	$N_{\mathrm{loop}}=\sum\limits_{t=1}^{N-1}g([P'_{\mathrm{x}}(t+1)\cdot P'_{\mathrm{x}}(t)])$ $g(u)=\begin{cases}0, & u\geqslant 0\\ 1, & u<0\end{cases}$	储能电站的充、放电次数
耦合系统运行经济指标[32-33]	减小旋转备用效益	$P_{\mathrm{spi}}(d)=\begin{cases}\sum\limits_{t=1}^{d}(1-\chi)P(t), & (1-\chi)P(t)\leqslant P_{\mathrm{rate}}\\ \sum\limits_{t=1}^{d}P_{\mathrm{rate}}, & (1-\chi)P(t)<P_{\mathrm{rate}}\end{cases}$ $B_{\mathrm{xz}}=\sum\limits_{t=1}^{y}P_{\mathrm{rate}}$	配置储能系统降低新能源发电场对旋转备用的依赖所产生的收益
	缓建并网通道效益	$B_{\mathrm{bw}}=p_{\mathrm{c}}\max\{0,\{\max(P(t)-\max(P(t)-P_{\mathrm{b}}(t))\}\}$	配置储能系统降低新能源发电波动以降低电网建设容量需求所产生的收益
	并网功率波动越限惩罚成本	$F_{\mathrm{P}}=b(t)\times\sum\limits_{t=0}^{T}\{\lvert\Delta P_{\mathrm{G}}-L\rvert\times r(t)\times\alpha\}$ $b(t)=\begin{cases}1, & \Delta P_{\mathrm{G}}>L\\ 0, & \Delta P_{\mathrm{G}}\leqslant L\end{cases}$	电池储能系统平抑新能源发电功率波动的效果

2.2 提高新能源发电预测精度方面

为有效对比不同模型对新能源发电功率预测误差的精度，常用均方根误差、均方误差以及平均绝对误差等指标分析预测模型的性能，其他相关指标见表 3[34-35]。由于利用储能系统提高新能源发电预测精度需要与其他应用场景协同优化以提升新能源并网的效率与可靠性，故其经济性指标需根据不同应用场景来建立，本节将不对其经济性指标做其他说明。

设有 N 个待评价预测模型，模型的预测误差为 $e_i(t)=\hat{p}_i(t)-p(t)$。其中，$p(t)$为 $t(t=1,2,\ldots,T)$时刻新能源发电实际功率，$\hat{p}_i(t)$ 为 t 时刻第 $i(i=1,2,\ldots,N)$个模型的发电预测功率。

表 3 储能电站提高新能源发电预测精度评价指标
Tab.3 Assessment metrics for improving the renewable energy generation forecasting accuracy

类型	名称	公式	意义
新能源发电预测技术指标[34-35]	均方根误差	$\delta_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}[\hat{p}_i(t)-p(t)]^2}$	预测功率与实际功率之间偏差的分散程度
	均方误差	$\delta_{\mathrm{MSE}}=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}[\hat{p}_i(t)-p(t)]^2$	预测功率与实际功率之间差异的平均值
	平均绝对误差	$\delta_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\lvert\hat{p}_i(t)-p(t)\rvert$	模型预测误差平均幅值的预测性能
	平均绝对百分比误差	$\delta_{\mathrm{MAPE}}=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left\lvert\frac{\hat{p}_i(t)-p(t)}{p(t)}\right\rvert$	预测模型的总体平均性能
	最大绝对百分比误差	$\delta_{\mathrm{MAX}}=\max\left\lvert\frac{\hat{p}_i(t)-p(t)}{p(t)}\right\rvert$	预测误差占实际功率值的最大比重
	标准差	$\delta_{\mathrm{SDE}}=\sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(e_i(t)-\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}e_i(t)\right)^2}$	预测误差自身的离散程度

注：储能电站运行技术指标同表 2。

2.3 增加新能源调峰能力方面

为评估储能系统提升新能源调峰能力的优化模型及控制策略性能，常采用绝对峰谷差、峰谷差率与低储高发套利收益等作为评价指标，其他相关指标见表 4[36-38]。表 4 中：$P_{\max}$、$P_{\min}$ 分别为负荷曲线的峰值和谷值，P 越小，则表示负荷曲线在峰谷内的偏差越小；峰谷差率 β 是表征负荷波动程度的关键指标，其值越小，表明周期内负荷曲线的波动范围越窄；P_t 为 t 时刻负荷采样值；P_{av} 为日负荷功率平均值；a_{c}、a_{f} 分别为储能系统的充、放电效率；$P_{\mathrm{c}}(t)$、$P_{\mathrm{f}}(t)$分别为 t 时刻储能设备从电网充、放电功率；C_{f}、C_{g} 分别为调度日的峰、谷电价。

表 4 储能电站增加新能源调峰能力评价指标
Tab.4 Assessment metrics for enhancing the renewable energy peak shaving capability

类型	名称	公式	意义
新能源调峰技术指标[36-37]	绝对峰谷差	$\Delta P=P_{\max}-P_{\min}$	负荷曲线在峰谷内的偏差
	谷峰系数	$\alpha=\frac{P_{\min}}{P_{\max}}$	负荷曲线的平滑程度
	峰谷差率	$\beta=\frac{P_{\max}-P_{\min}}{P_{\max}}$	负荷曲线波动程度
	负荷标准差	$\begin{cases}S=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{T}(P_t-P_{\mathrm{av}})^2}\\ P_{\mathrm{av}}=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{T}P_t\end{cases}$	负荷曲线的离散程度
耦合系统运行经济指标[38]	储能低储高发套利收益	$I_1=\int_0^t(a_{\mathrm{f}}P_{\mathrm{f}}(t)C_{\mathrm{f}}-P_{\mathrm{c}}(t)C_{\mathrm{g}}/a_{\mathrm{c}})\mathrm{d}t$	在低负荷时段充电、高负荷时段放电，利用峰谷电价差获得的收益
	储能调峰补偿收益	$I_2=P_{\mathrm{a}}\int_0^t(a_{\mathrm{f}}P_{\mathrm{f}}(t)+P_{\mathrm{c}}(t)/a_{\mathrm{c}})\mathrm{d}t$	储能系统参与调峰所获得的收益

注：储能电站运行技术指标同表 2。

2.4 评价指标的综合分析与对比

不同应用场景下评价指标有所不同，但其目标均为提升“源-储”耦合系统的技术可行性、运行稳定性及经济合理性。针对平抑新能源发电波动性，指标侧重于功率曲线的短期平滑以及储能系统实时出力能力；针对提高新能源发电预测精度，指标多侧重于误差统计特性及模型性能评估；针对提升新能源调峰能力，指标主要集中在负荷曲线形态特性与储能调峰收益上。虽然评价对象与应用场景不同，相关指标在时间尺度、响应特性及经济效益 3 个层面仍展现出明显的共性与互补性：技术性指标多用于衡量系统在秒至分钟级的动态性能；经济性指标则多面向小时至年度的长期收益分析。在系统实际运行评估过程中，应根据不同应用场景需求，统筹选取并组合适用指标，构建多层次、多尺度的评价体系，同时需注意要在技术可行性与经济最优性

之间寻求平衡，从而更科学、全面地指导“源-储”系统优化与决策。

3 储能电站规划配置方法及运行策略

3.1 平滑新能源发电波动规划配置方法及运行策略

3.1.1 储能系统平抑新能源出力策略

平抑新能源并网功率波动，需提取原始功率$P_{w(PV)}$中的稳定分量P_{ref}和波动分量ΔP_{ref}，其流程见图 4。储能系统通过实际输出功率ΔP 补偿波动分量，最终输出平滑后的并网功率 P_{out}[39]，其核心在于滤波算法和储能充放电控制策略的协同优化。

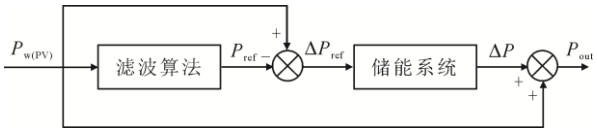


图 4 平滑新能源功率波动的简化流程
Fig.4 Simplified process for smoothing renewable energy power fluctuations

1）滤波算法

当前，获取新能源并网期望值的主要方法包括基于传统滤波与信号分解方法及基于在线优化控制方法[40]。

基于传统滤波与信号分解方法通过设计滤波器或信号分解工具，从原始功率中直接分离出需补偿的高频波动分量。其中，一阶低通滤波因其结构简单而被广泛应用。文献[41]采用一阶低通滤波器结合电池储能系统平滑风电功率，分析储能容量与平滑时间常数的关系，为风电场配置储能系统提供了参考。但是这种方法存在相位滞后问题[42]，为此研究者引入了卡尔曼滤波器改善动态响应。文献[43]进一步将其与模型预测控制（MPC）结合，通过双调节反馈实现了储能出力的实时优化，同时使荷电状态（SOC）维持在最佳区间。另一种方法是利用信号处理技术，如小波包分解，通过将功率信号分解至不同频带，可直接将提取高频噪声作为储能系统需承担的功率任务。文献[44]利用自适应小波包分解实现了风电功率的最优分解，并通过仿真结果验证其平滑效果优于传统低通滤波算法。滑动平均及其改进算法（加权移动平均）通过计算信号在一定窗口内的数据均值以平滑波动数据，并结合储能 SOC 状态自适应调整参数，在平抑波动的同时维持储能系统自身稳定运行[45-46]。基于在线优化控制方法将功率平滑问题转化为一个在线滚动优化问题。MPC 通过预测模型进行滚动优化和反馈校正，可系统地处理多重目标与复杂约束。文献[47]提出一种基于 MPC 的风储联合运行策略，该策略通过构建一个同时考虑波动最小、储能出力最优及能量损耗最小的一体化模型实现系统优化。另一种方法则是将信号处理技术与实时计算相结合，如实时小波变换算法。该算法通过引入滑动窗口记录和缓存实时采样数据，并通过窗口内的数据进行小波变换分析。文献[48]利用该算法，并采用短时对称方法延展窗口数据，有效消除了边界失真与伪吉布斯现象，最终通过实时数字模拟器验证该策略的有效性。

2）储能充放电控制

在确定期望输出功率后，为避免储能系统因过充过放影响其使用寿命，需要采用实时反馈控制调整充放电功率。当前控制策略主要围绕 SOC 管理与功率分配来展开。常见方法包括基于规则的能量管理策略和基于优化的动态控制策略。研究重点已从单一的功率跟踪转向多目标协同优化，即在平抑波动的同时，兼顾 SOC 均衡、寿命衰减最小化等目标。文献[49]在利用小波包分解完成功率指令初次分配后，进而通过能量管理策略对混合储能的功率与充放电状态进行协调调整，从而将 SOC 维持在合理范围；文献[50]提出了双目标 MPC-WMA 策略，该策略可同步优化波动平抑效果与 SOC 恢复过程。

3.1.2 储能系统功率及容量配置

1）能量协调管理

利用储能系统平抑波动时的能量管理可分为 3 个方面：不同类型储能间的能量协调管理、同类储能的内部管理以及同类储能内部各单元的协调管理。文献[51]利用低通滤波对功率进行初始分配，然后根据不同类型储能的能量状态进行动态调整，有效减少了储能容量使用。文献[52]提出自适应调整低通滤波器时间常数 T，实时优化双 BESS 的 SOC 并保证系统长期稳定运行。文献[53]将电池储能系统分组并设计双层功率分配方法，显著加快了电池单元间 SOC 的均衡速度。

2）容量配置方法

储能容量配置过小则无法将新能源发电波动抑制至并网限制范围内，若过大则受制于经济成本也不可行。因此，储能容量配置的核心目标是以最小容量满足新能源发电的波动平抑需求。典型的配置方法包括理论计算法、仿真分析法和模型优化法[54]，其对比如表 5 所示。

表 5 容量配置方法对比
Tab.5 Comparison of capacity configuration methods

方法类型	核心思想	优势	局限性
理论计算法	基于时域、频域分析计算容量需求	求解速度快	忽略经济性与动态特性
仿真分析法	通过历史数据模拟配置效果	易于理解，便于实现	忽略经济性
模型优化法	多目标优化权衡成本与平抑效果	求解精度高	求解复杂度高

文献[55]基于功率指令绝对值的统计特性分配混合储能功率。文献[56]采用经验模态分解（EMD）将风电功率波动分解，利用神经网络模型通过最小化目标函数来确定混合储能系统（HESS）的存储容量。文献[57]采用机会约束对风电预测不确定性进行量化与解析，建立了计及误差的储能容量优化模型，之后结合两阶段随机规划方法求解出最优配置方案。未来容量配置方法将更强调在高不确定性环境下，统筹考虑全生命周期成本、技术约束与多重应用价值的鲁棒优化。

3.2 提高新能源发电预测精度规划配置方法及运行策略

3.2.1 储能系统提高新能源发电预测精度控制策略

确定储能系统充放电规则是其控制策略的核心，现有策略主要分为传统控制策略与智能控制策略 2 大类。

传统控制策略利用确定性数学模型构建控制框架，并通过经典控制理论追踪目标。此类方法逻辑明确、响应迅速，但由于其模型简化导致误差累积，具有一定局限性。主流方法包括：双层控制策略、超前控制策略、基于超级电容器控制策略等[58]。文献[59]构建预测误差补偿与并网波动抑制的双层优化模型，有效缓解了新能源波动性对电网的冲击；文献[60]通过超前控制与滚动时域优化构建了结合风功率预测的动态优化控制策略，有效平抑了并网功率波动，并提升储能的容量裕度、利用效率及使用寿命。

智能控制策略具有自适应能力，求解过程通常较为复杂，适用于结构和参数不确定的复杂系统。典型的智能控制方法包括模糊控制、神经网络控制及遗传算法等。文献[61]通过构建光伏发电预测模型并结合升压转换器开关信号以实现最大功率点跟踪，同时采用基于时序相关性的改进分数阶算法来提升预测精度。当前趋势是将传统模型与智能算法相结合，旨在结合二者优势，开发出既能保证稳定性又具备强自适应能力的复合型控制策略。

3.2.2 储能系统功率及容量配置

储能系统的功率及容量配置，需基于功率预测误差分析、储能类型选择及控制策略设计，其目标是在满足系统补偿要求的前提下，实现容量最小化与经济效益最大化。当前主流方法包括差额补偿法和经济特性优化法[62]。

差额补偿法通过直接补偿预测发电与实际发电的功率差额来配置储能，该方法过程简单但未考虑动态过程，使得配置精度不高。经济特性优化法通过建立目标函数与约束条件进行优化求解，其中储能功率与容量为关键变量。目标函数可设为投资成本最小化或发电收益最大化，但由于后者受多重外部因素影响致使计算复杂，当前研究多以投资成本最小作为主要目标。文献[63]选用机会约束规划方法，以最低费用为目标，确定了风储能联合系统的容量配置方案。未来配置研究可深入耦合电力市场规则、政策激励以实现规划方案的综合效益最大化。

3.3 增加新能源调峰能力规划配置方法及运行策略

3.3.1 储能参与系统调峰控制策略

随着新能源在电力系统中渗透率的不断提升，传统基于单一时间尺度的系统规划方法逐渐难以满足新型电力系统运行需求。为应对这一挑战，需在时间维度上充分体现新能源统计特性与调节资源的响应能力[64]。典型多时间尺度协同运行滚动优化框架如图 5 所示。针对高比例新能源接入带来的系统调峰难题，文献[65]为深度挖掘源-荷-储资源的调节潜力，构建了日前-日内双阶段滚动优化模型。通过多类型资源在不同时间尺度上的协同配合，显著提升了新能源消纳能力。文献[66]提出将风电与负荷整合为统一预测对象，并构建了日前-超短期双时间尺度滚动预测的储能调峰策略。该策略有效平抑了净负荷波动，减轻了常规机组调峰负担。

多源互联电力系统的跨区协同运行已成为现代电网发展的必然趋势。当前，负荷需求的持续增长与资源在空间分布上的不均衡构成了系统运行的主要矛盾，传统单区域调度模式难以有效应对。

通过建立多区域动态协调机制，可实现跨区资源优化配置，有效缓解电源与负荷在时空上的不匹配问题，进而提升系统运行效率与经济可靠性[67]。文献[68]提出一种考虑联合需求侧响应的多区域协同优化模型，利用多时段优化算法，显著增强了区域间能量交互协调能力，同时降低了需求侧响应成本。

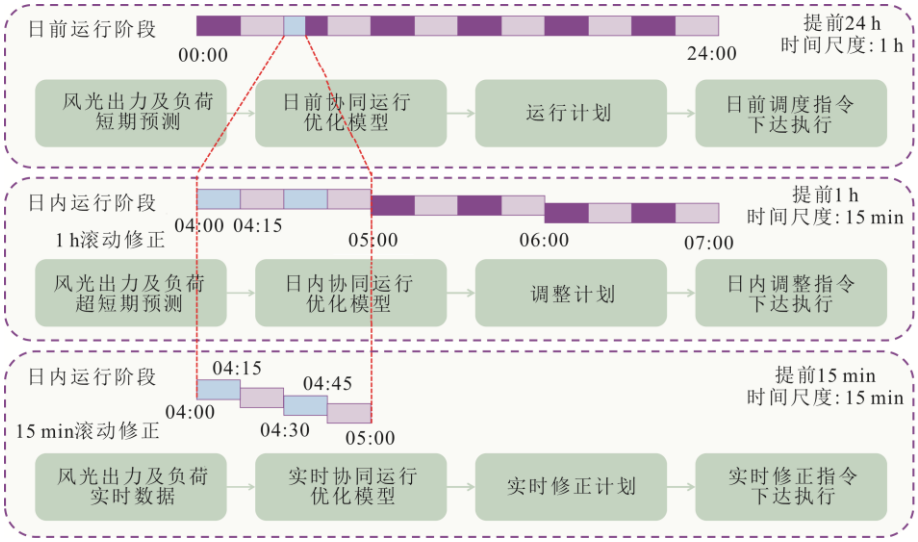


图 5 多时间尺度协同运行滚动优化框架

Fig.5 A multi-time-scale collaborative operation rolling optimization framework

3.3.2 储能系统功率及容量配置

储能容量优化配置的核心，是在满足调峰需求的前提下，通过合理容量规划实现经济效益与可再生能源消纳的最大化[69]，故其与 3.1 节利用储能系统平滑新能源发电波动中功率容量配置方法一致。但二者也存在一定差异：利用储能系统平抑新能源发电波动时，需通过快速充放电平滑功率曲线，降低电网频率偏差和电压波动，要求储能系统具备高功率密度及长循环寿命；而利用储能系统增加新能源调峰能力旨在解决新能源日内或跨日的峰谷差问题，储能需在数小时尺度内充放电，其配置更关注能量容量和持续放电时长，且调峰策略更侧重经济性调度，如结合分时电价进行“低充高放”等。

文献[70]针对风电并网场景，构建了计及弃风处罚与储能总成本的调峰效益评价模型，用于优化配置，并分析了弃风处罚力度与装置成本对配置结果的影响。文献[71]基于给定负荷特性，研究了储能容量与负荷波动改善程度的关系，并以投资成本和经济效益为约束、综合效益最大化为目标，提出了一种用于松弛调峰瓶颈的大规模储能容量优化配置方法。综上所述，目前调峰场景下的储能配置已不再是单纯的技术优化问题，而是转变为与市场环境、政策导向深度结合的技术经济综合性问题。

4 结论与展望

在系统设计方面，储能接入方式直接影响耦合系统性能及经济效益。目前，储能在新能源场站交流侧集中式接入因便于调度维护、平抑波动效果显著而成为主流；直流侧/交直流混合组网在效率提升/多源互补方面存在一定潜力，但由于控制难度较高，仍需在关键技术与工程示范方面进一步提升。未来研究可与电力市场机制、政策激励、全生命周期成本相结合，以提升系统的综合性能。

在运行评价方面，本文综合了现有研究中技术性指标（如波动平抑效果、充放电特性）与经济性指标（如成本效益、投资回报），为统筹评估新能源发电能力、储能系统性能与耦合系统经济性提供了参考。现有指标大部分适用于静态场景，未来可进一步结合动态响应、系统韧性、寿命衰减及环境效益等因素，推动指标体系的标准化。

在规划配置与运行策略方面，本文总结出“场景驱动-策略耦合-容量适配”的共性框架。研究表明，不同应用场景对储能的功率/能量特性、时间尺度及控制策略要求不同。当前研究在多类型储能协同、跨区域协调调度以及高比例新能源接入下系统韧性构建等方面仍存在不足。未来可依托大数据、人工智能及数字孪生等技术，开发具有自适应能力

的智能控制策略与规划方法；同时，单一储能技术难以满足所有场景需求，未来可重点关注电化学储能与氢储能、压缩空气储能等多类型储能的互补集成，以应对新能源的跨日、季节性波动，提升系统整体经济性与可靠性。

[参 考 文 献]

[1] 廖睿灵. 一升一降, 彰显能源转型新成就[N]. 人民日报海外版, 2025-06-28(003).
Liao R L. One increase and one decrease highlight new achievements in energy transition[N]. People's Daily Overseas Edition, 2025-06-28(003).

[2] 高洁, 王彤, 赵伟, 等. 提升电力系统安全稳定水平的风电光伏场站主动支撑技术发展及展望综述[J]. 新型电力系统, 2024, 2(2): 201.
Gao J, Wang T, Zhao W, et al. Review on the development and prospect of active support technologies for wind power and photovoltaic stations to improve the security and stability level of power system[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(2): 201.

[3] 田松峰, 姚静, 杨智好, 等. 基于混合储能的风光储联合发电系统优化调度策略及评价[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 21.
Tian S F, Yao J, Yang Z H, et al. Optimal dispatching strategy and evaluation of wind-solar-storage combined power generation system based on hybrid energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 21.

[4] 邱伟, 孙凯祺, 丁肇豪, 等. 西葡"4·28"停电事故原因初探及对中国电力系统发展的启示[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(24): 1.
Qiu W, Sun K Q, DING Z H, et al. Preliminary exploration of causes of Spain-Portugal blackout on April 28, 2025 and its enlightenment for development of China's power system[J]. Automation of Power Systems, 2025, 49(24): 1.

[5] 葛士宇, 史汪洋, 徐钢, 等. 压缩空气储能辅助太阳能电站调峰性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 35.
Ge S Y, Shi W Y, Xu G, et al. Performance analysis of peak load balancing for compressed air energy storage assisted solar power station[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 35.

[6] 毛恒山, 刘晓杰, 刘浩骥, 等. 迈向长时储能: 液流电池技术的研究进展与挑战[C]//2025 中国建筑经济研讨会论文集（下册）. 2025: 213.
Mao H S, Liu X J, Liu H J, et al. Toward long-duration energy storage: research progress and challenges in flow battery technology[C]//Proceedings of the 2025 China Construction Economics Symposium (Volume II). 2025: 213.

[7] 季敏. 磴口县: 以高质量发展激活区域新动能[N]. 巴彦淖尔日报(汉), 2025-11-07(001).
Ji M. Dengkou county: activating new regional driving forces through high-quality development[N]. Bayannur Daily (Chinese), 2025-11-07(001).

[8] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149.
Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149.

[9] 姚美娇. 液流电池商业化还需攻克"成本关"[N]. 中国能源报, 2025-04-21(004).
Yao M J. The commercialization of flow batteries still needs to overcome the "cost barrier"[N]. China Energy News, 2025-04-21(004).

[10] 王新宇, 卢韦伟, 石睿杰, 等. 三峡集团乌兰察布"源网荷储一体化"示范项目设计[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(4): 41.
Wang X Y, Lu W W, Shi R J, et al. Design of China Three Gorges Corporation-Ulanqab "Source-Grid-Load storage Integration" demonstration project[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(4): 41.

[11] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊 1): 88.
Sun Y S, Tang X S, Sun X Z, et al. Research on energy storage capacity allocation method for smoothing wind power fluctuations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 88.

[12] 曹曦, 朱勇, 刘明义, 等. 光伏电站直流侧分布式储能系统研发及应用[C]//2019 第一届中国储能学术论坛暨风光储创新技术大会论文集. 2019: 1.
Cao X, Zhu Y, Liu M Y, et al. Development and application of the DC side energy storage system in photovoltaic power station[C]//Proceedings of the First China Energy Storage Academic Forum and Wind-Solar-Storage Innovation Technology Conference in 2019. 2019: 1.

[13] 程跃森, 王润和, 辛晓瑜, 等. 并网型风光储联合发电系统荷电状态控制方法研究[J]. 电力设备管理, 2024(17): 93.
Cheng Y S, Wang R H, Xin X Y, et al. Research on the state of charge control method of grid-connected wind-solar-storage combined power generation system[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(17): 93.

[14] 张从谦. 功率预测及混合储能在风电系统中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 1.
Zhang C Q. Research on application of power forecasting and hybrid energy storage in wind generation system[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 1.

[15] Li W, Joos G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL, USA, 2007: 1280.

[16] 李旺. 大型风电场储能装置容量规划及控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 1.
Li W. Research on capacity planning and control method of large-scale wind farm energy storage unit[D]. Changsha: Hunan University, 2018: 1.

[17] 崔学深, 罗慧达, 刘其辉, 等. 双馈风电系统连接柔直电网电压频率协调控制策略[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 427.
Cui X S, Luo H D, Liu Q H, et al. A coordinated control strategy of voltage and frequency for doubly-fed wind power generation system connected to flexible HVDC grid[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 427.

[18] GB/T 51437—2021 风光储联合发电站设计标准[S].
GB/T 51437—2021 Standard for design of wind/PV/storage power plant[S].

[19] 王日成, 张国俊, 林权, 等. 分散式储能在新能源风电场站的应用[J]. 电力与能源, 2023, 44(1): 52.
Wang R C, Zhang G J, Lin Q, et al. Application of distributed energy storage in new energy wind farm stations[J]. Power & Energy, 2023, 44(1): 52.

[20] 王健, 常雪剑, 高岩. 风电场储能工程应用研究[J]. 西北水电, 2021(1): 76.
Wang J, Chang X J, Gao Y. Research on the application of energy storage for wind farm[J]. Northwest Hydropower, 2021(1): 76.
[21] 乐可定, 许慧. 风电场储能工程的应用[J]. 电力系统装备, 2021(9): 6.
Yue K D, Xu H. Application of wind farm energy storage project[J]. Electric Power System Equipment, 2021(9): 6.
[22] 朴俊吉. 储能系统在光伏电站中的应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(12): 126.
Piao J J. Application of energy storage systems in photovoltaic power plants[J]. Application of IC, 2023, 40(12): 126.
[23] 乔俊强, 李世民, 虎学梅, 等. 光伏电站中储能系统接入与运行模式[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 1345.
Qiao J, Li S M, Hu X M, et al. Grid-connected photovoltaic power system with energy storage and operating mode[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(6): 1345.
[24] Justo J J, Mwasilu F, Lee J, et al. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 387.
[25] Mohamed S S, Youcef B, Nasim U, et al. Supervisory energy management of a hybrid battery/PV/tidal/wind sources integrated in DC-microgrid energy storage system[J]. Energy Reports, 2021, 7: 7728.
[26] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88.
Xu L, Ruan X B, Zhang B H, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88.
[27] Papari B, Timilsina L, Moghassemi A, et al. An advanced meta metrics-based approach to assess an appropriate optimization method for Wind/PV/Battery based hybrid AC-DC microgrid[J]. e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2024, 9: 100640.
[28] Dahane A S, Sharma R B. Hybrid AC-DC microgrid coordinated control strategies: a systematic review and future prospect[J]. Renewable Energy Focus, 2024, 49: 100553.
[29] 韩冬冬. 风电场储能电池的容量优化配置[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016: 1.
Han D D. Wind farm energy storage capacity of the battery optimization[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016: 1.
[30] 侯力枫. 风电功率波动平抑下储能出力与平滑能力的动态优化控制策略[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 134.
Hou L F. Dynamic optimization control strategy for energy storage output power and smoothing ability considering smoothing wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 134.
[31] 马伟. 含高渗透率光伏的配电网电压协调控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 1.
Ma W. Coordinated voltage control methods for distribution networks with high penetrations of photovoltaic[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 1.
[32] 张焜. 储能应用于风电功率平抑的优化配置与控制策略[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 1.
Zhang K. Optimal allocation and control strategy of energy storage for smoothing wind power fluctuations[D]. Changsha: Hunan University, 2020: 1.
[33] 赵爱云. 储能电池平抑风电功率波动控制策略及容量优化[D]. 青岛: 青岛大学, 2019: 1.
Zhao A Y. Control strategies and capacity optimization for energy storage batteries to stabilize wind power fluctuations[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019: 1.
[34] Chen Y X, Lin C J, Zhang Y L, et al. Proactive failure warning for wind power forecast models based on volatility indicators analysis[J]. Energy, 2024, 305: 132310.
[35] 魏爱雪, 田建艳, 王芳, 等. 风电功率预测模型的多指标融合评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 26.
Wei A X, Tian J Y, Wang F, et al. Multi-index fusion evaluation method of wind power prediction models[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(6): 26.
[36] 张帆. 风储微网中混合储能系统容量优化配置及控制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022: 1.
Zhang F. Research on capacity optimization configuration and control of hybrid energy storage system in wind-storage microgrid[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022: 1.
[37] Zhou H, Zhang P, Luo Y Y, et al. Evaluation index system and evaluation method of energy storage and regional power grid coordinated peak regulation ability[J]. Energy Reports, 2023, 9(Suppl.10): 609.
[38] 刘红. 基于改进粒子群算法的储能调峰容量优化配置研究[J]. 广东电力, 2023, 36(1): 68.
Liu H. Research on optimal configuration of energy storage peak shaving capacity based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(1): 68.
[39] 王远路, 杨超. 平滑风功率波动的储能配置及控制算法综述[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(5): 107.
Wang Y L, Yang C. Review of energy storage configuration and algorithms for smoothing wind power fluctuations[J]. Intelligent Computer and Applications, 2023, 13(5): 107.
[40] 孙凯胜. 风电-混合储能联合系统控制策略及其容量配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
Sun K S. Research on control strategy and capacity configuration of wind power-hybrid energy storage combined system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
[41] 靳文涛, 马会萌, 谢志佳. 电池储能系统平滑风电功率控制策略[J]. 电力建设, 2012, 33(7): 7.
Jin W, Ma H M, Xie Z J. Wind power smoothing control strategy of battery energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(7): 7.
[42] Gao F, Lu Y. A Kalman-filter based time-domain analysis for structural damage diagnosis with noisy signals[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 297(3/5): 916.
[43] 韩晓娟, 梁宇博, 王梦圆, 等. 基于 KF-MPC 的光储系统双调节反馈优化控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 56.
Han X J, Liang Y B, Wang M Y, et al. Dual-regulation feedback optimization control method of PV combined energy storage system based on KF-MPC[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 56.
[44] Ding M, Wu J. A novel control strategy of hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(12): 1265.
[45] 王刚, 邱晓燕, 张晓晨, 等. 平滑风电功率的电池储能

系统优化控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(8): 66.
Wang G, Qiu X Y, Zhang X C, et al. Optimized control strategy for battery energy storage system to smooth wind power output[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(8): 66.

[46] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22.
Ding M, Wu J F, Zhu C Z, et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22.

[47] 贺彬, 任永峰, 贾伟青, 等. 储能 MPC 平抑分散式风电并网功率波动策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 132.
He B, Ren Y F, Jia W Q, et al. Strategy of energy storage MPC to smooth grid-connected power fluctuation of distributed wind power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(6): 132.

[48] Trung T, Ahn S J, Choi J H, et al. Real-time wavelet-based coordinated control of hybrid energy storage systems for denoising and flattening wind power output[J]. Energies, 2014, 7(10): 6620.

[49] 张保明, 陈洁, 付菊霞, 等. 基于小波包混合储能系统的风功率波动控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 75.
Zhang B M, Chen J, Fu J X, et al. Control strategy of wind power fluctuation based on wavelet packet hybrid energy storage system[J]. Electric Machines and Control Application, 2020, 47(3): 75.

[50] Lin L, Cao Y P, Kong X Y, et al. Hybrid energy storage system control and capacity allocation considering battery state of charge self-recovery and capacity attenuation in wind farm[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 75: 109693.

[51] Abbey C, Strunz K, Joos G. A knowledge-based approach for control of two-level energy storage for wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 539.

[52] Li L, Jin X, Wang S S, et al. Long-term stable operation control method of dual-battery energy storage system for smoothing wind power fluctuations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106878.

[53] 余洋, 陈东阳, 吴玉威, 等. 风电波动平抑下考虑SOC均衡及收益的电池储能功率分配策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1714.
Yu Y, Chen D Y, Wu Y W, et al. Power allocation strategy considering SOC balance and income for battery energy storage in smoothing wind power fluctuations[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1714.

[54] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126.
Wang H J, Jiang Q Y. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(19): 126.

[55] Wang X Y, Meng Y, Muljadi E, et al. Probabilistic approach for power capacity specification of wind energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1215.

[56] Yuan Y, Sun C C, Li M T, et al. Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 323.

[57] Baker K, Hug G, Li X. Energy storage sizing taking into account forecast uncertainties and receding horizon operation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(1): 331.

[58] 王林刚, 戴武昌, 赵利权, 等. 应用储能系统补偿风电功率预测误差综述[J]. 吉林电力, 2019, 47(1): 1.
Wang L G, Dai W C, Zhao L Q, et al. Summary of applying energy storage system to compensate wind power forecasting error[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(1): 1.

[59] 陈阳, 谢丽蓉, 马兰, 等. 考虑光伏预测误差兼顾平抑波动的双层储能运行策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 70.
Chen Y, Xie L R, Ma L, et al. Double-layer energy storage operation strategy that takes into account PV output error and smooths out fluctuations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 70.

[60] 陈大准. 储能系统平抑风电功率波动及容量动态优化控制[J]. 电气应用, 2022, 41(1): 14.
Chen D Z. Energy storage system suppresses wind power fluctuation and capacity dynamic optimization control[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(1): 14.

[61] 陆沈雄, 范亚伟, 屠永辉, 等. 新能源储能波动下的光伏发电预测算法改进[J]. 电子设计工程, 2024, 32(3): 152.
Lu S X, Fan Y W, Tu Y H, et al. Improvement of photovoltaic power generation prediction algorithm under fluctuation of new energy storage[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(3): 152.

[62] 王梦宇. 整县光伏短期功率预测与储能配置研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023: 1.
Wang M Y. Research on photovoltaic energy storage configuration and optimal scheduling in the whole county[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023: 1.

[63] Roy A, Kedare S B, Bandyopadhyay S. Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty[J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2712.

[64] 冯智慧, 张雨津, 李万伟, 等. 多时间尺度的新型电力系统调峰分析[J]. 青海电力, 2023, 42(1): 1.
Feng Z H, Zhang Y J, Li W W, et al. Multi-time scale analysis of new power system peak regulation[J]. Qinghai Electric Power, 2023, 42(1): 1.

[65] 薄利明, 邹鹏, 郑惠萍, 等. 考虑源荷储联合调峰的日前-日内两阶段滚动优化调度[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 34.
Bo L M, Zou P, Zheng H P, et al. Two-stage day-ahead and rolling optimal scheduling considering source-load-storage joint peak shaving[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(1): 34.

[66] 王晓东, 张一龙, 刘颖明, 等. 基于双时间尺度净负荷预测的储能调峰控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 58.
Wang X D, Zhang Y L, Liu Y M, et al. Double time scale power prediction based peaking shaving control strategy of energy storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 58.

（下转第 121 页）