

DOI: 10.61369/NPS.2025030005

计及电网形态演变的新能源场站群共享储能 长期规划策略

刘双硕, 李笑竹, 马成, 尹纯亚

(可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830047)

Long-Term Planning Strategy for Shared Energy Storage in Renewable Energy Plant Clusters Considering Power Grid Configuration Evolution

LIU Shuangshuo, LI Xiaozhu, MA Cheng, YIN Chunya

(Engineering Research Center of Ministry of Education for Renewable Energy Generation and Grid Connection Technology (Xinjiang University), Urumqi Xinjiang 830047)

摘要:【目的】针对新能源场站配套储能规划中存在的单一时间尺度局限性问题, 本文提出了一种创新的集中式共享混合储能长期多阶段规划策略。主要解决了现有研究忽视多类型储能时间尺度互补特性, 以及新能源装机容量、负荷增长对储能规划影响的关键问题。【方法】基于集中式共享储能建设时序及长期运营模式的深入分析, 研究团队构建了具有时序递进特征的长期多阶段规划模型。该模型通过动态优化机制, 实现了储能系统在不同发展阶段与电源、负荷的协同演进, 显著提升了规划方案的适应性。【结果】研究成果通过实际算例验证, 显示出显著的可行性与竞争优势。与传统静态规划方法相比, 多阶段规划能够根据市场需求变化和技术进步动态调整储能容量配置, 有效解决了提前规划导致的容量衰减问题。研究表明, 该策略通过全生命周期的动态优化配置, 不仅提高了储能资产利用率, 更增强了系统运行的可持续性和稳定性。【结论】本研究为新型电力系统建设提供了一种科学有效的储能规划方法, 具有重要的理论价值和实践指导意义。

关键词: 新能源场站; 共享储能; 电网形态演变; “源荷”动态需求; 时序递进; 集中式; 规划¹

ABSTRACT:[Objectives]Aiming at the limitation of single time scale in the energy storage planning of new energy stations, this paper proposes an innovative long-term multi-stage planning strategy for centralized shared hybrid energy storage. It mainly solves the key problems that the existing

research ignores the complementary characteristics of multi-type energy storage time scales, as well as the impact of new energy in- stalled capacity and load growth on energy storage planning. [Methods]Based on the in-depth analysis of the construction sequence and long-term operation mode of centralized shared energy storage, the research team constructed a long-term multi-stage planning model with sequential progressive characteristics. Through the dynamic optimization mechanism, the model realizes the coordinated evolution of energy storage system with power supply and load in different development stages, and significantly improves the adaptability of planning scheme. [Results]The research results show significant feasibility and competitive advantage through practical examples. Compared with the traditional static planning method, the multi stage planning can dynamically adjust the energy storage capacity configuration according to market demand changes and technological progress, which effectively solves the problem of capacity attenuation caused by early planning. The research shows that the strategy not only improves the utilization rate of energy storage assets, but also enhances the sustainability and stability of system operation through the dynamic optimization configuration of the whole life cycle. [Conclusion]This study provides a scientific and effective energy storage planning method for the construction of new power systems, which has important theoretical value and practical guiding significance.

KEY WORDS: new energy station; shared energy storage; the evolution of power grid form; ‘Source load ‘ dynamic demand; timing progression ; centralized ; planning

基金项目: 国家自然科学基金(2307108); 北京市自然科学基金(L242008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52307108), Beijing Natural Science Foundation (L242008).

0 引言

随着新能源发电规模不断扩大,电力系统在多时间尺度下的稳定运行面临新的挑战。研究表明,通过整合长时储能与短时储能的优势,构建多时间尺度储能系统,可以同时满足日内功率平衡、数日新能源出力平抑以及跨季节能量调节等不同需求,为新型电力系统的灵活运行提供重要支撑^[1]。储能系统在可再生能源发展中具有关键作用^[2],其规划容量的合理性直接影响系统经济性和可靠性:容量不足将导致供需失衡并加速设备损耗,而容量过剩又会增加投资成本。

基于系统实际需求对不同储能技术进行合理的协调规划,对促进新能源消纳^[3]和新型电力系统发展^[4]具有重要意义。文献^[5]研究了孤立型可再生能源微电网基于氢能的最佳规模化问题,采用混合整数线性优化框架,考虑了一年时间范围内的季节性储能,通过分析系统子组件的效率和投资成本曲线,实现了更精确的技术经济评估,验证了氢能长期储存可实现能源自给自足。文献^[6]提出了一种利用时间卷积网络处理长期不确定性的风电输出预测方法,采用数据驱动方法考虑不确定性以准确评估混合储能风电系统的长期成本规划,结果表明微网中混合储能规划需考虑多重不确定性。文献^[7]针对混合储能系统在提升分布式系统电能质量和降低新能源基地弃电量方面的作用,建立了综合考虑生命周期经济成本、节点电压偏差和系统有功功率损耗的多目标优化模型,证实了混合储能能有效解决多时间尺度供需失配问题。

文献^[8]基于多微电网储能共享模式,提出了双层优化配置方法,通过多能协同实现能源高效利用,促进微电网可持续发展,结果显示该混合储能服务能降低用户成本、节省储能资源,实现用户与运营商双赢。文献^[9]针对区域综合能源系统中可再生能源波动和用户需求问题,提出了多元混合储能的多时间尺度容量配置方法,相比单一锂电储能,该方法有效降低了投资成本。文献^[10]建立了氢储能与电化学储能协同运行的混合整数线性规划模型,证明混合储能系统成本显著低于单一储能。

文献^[11]结合储能全生命周期成本和用户多时间尺度需求,提出了兼顾多类储能优势的层次化配

置方法,结果表明该方法可降低储能置换成本。文献^[12]以最小化全生命周期成本为目标,采用两阶段随机规划与场景生成方法优化氢储能的跨季节能量转移规划,实现了制氢-储氢与混氢燃气轮机容量匹配及投资-运行-碳成本全局最优。文献^[13]考虑储能寿命衰减和能量循环约束,通过分级储氢架构和时序聚合优化氢能长短周期互补,结果显示该方法能有效缓解多时间尺度源荷失配,提升经济性和可再生能源消纳能力。文献^[14]以多能互补系统收益最大化为目标,提出基于全年时序模拟的多类储能协同规划方法,案例分析表明该方法可减少储能充放电频次,提高经济性和运行寿命。

上述研究主要优化传统模式下多时间尺度的储能运行配置,但储能电站发展仍受长期回报低和商业模式不成熟等因素限制^[15],亟需研究兼顾经济性与灵活性、适应电网形态演变的储能规划方法。

综合上述分析,针对当前新能源场站配套储能规划仅考虑单一时间尺度,未能充分计及多类型储能的时间尺度互补特性,以及新能源装机容量和负荷增长对储能规划的影响等问题,本文提出了一种考虑建设时序并兼顾“源-荷”增长需求的集中式共享混合储能长期多阶段规划策略。该研究的主要技术贡献体现在以下三个方面:

(1) 突破了能量交互与收益共享的壁垒,建立了多新能源场站储能共享运营模式,通过该模式能够有效应对多场站灵活性资源调节需求,显著提升储能利用率;

(2) 综合考虑未来“新能源+储能”模式发展的环境因素以及多类储能在时间尺度上的互补特性,构建了服务于多新能源场站的集中式共享储能长期规划模型;

(3) 在集中式共享储能长期规划的各实施阶段实现最优配置,同时兼顾电网形态演变与储能技术革新等关键因素,从而有效避免了因过度规划或规划不足导致的成本浪费及技术滞后等问题。

1 新能源场站群集中式共享储能运营模式

新能源场站群集中式共享储能电站由第三方投资方投资运营,旨兼顾运营收益与满足多新能源场站对于灵活性调节资源的需求,其运营模式如图1所示:

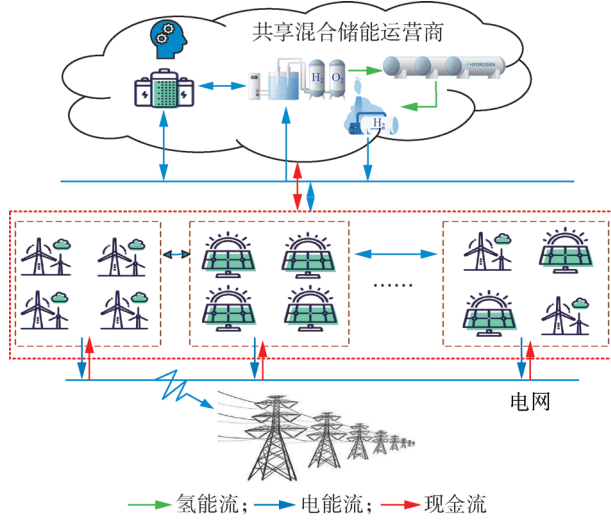


图1 新能源场站群集中式共享储能运营模式

Fig.1 Cluster shared energy storage operation mode of new energy stations

图1显示，集中式共享储能内部存在两种不同时间尺度的储能设备，具有长时储能特点的氢储能与短时储能特点的电池储能，以此可以满足新能源场站多时间尺度的调节需求，实现各新能源场站之间电能互补相济^[16]。当新能源场站存在弃电时将富余能量存入储能内部，产生对共享储能的电能存储需求；当新能源场站发电不足时将产生用电缺额，产生对共享储能的电能使用需求。

共享储能容量取决于新能源场站的灵活性需求。运营商基于风光出力和负荷增长数据，结合未来成本变化，优化规划期内分阶段投资方案。

2 集中式共享储能时序规划

集中式共享储能的长期规划需要综合考虑负荷变化、设备投资及技术变化成本、设备使用效率衰减等多方面因素。如图2所示：

图2显示，根据负荷增长情况将集中式共享储能的规划周期划分为W阶段，多阶段时序集合， $S = \{s_1, s_2, \dots, s_w\}$ ，相应阶段m型设备容量规划序列集合 $E_{\text{set}}^m = \{E_{\text{set}1}^m, E_{\text{set}2}^m, \dots, E_{\text{set}w}^m\}$ ，得到相应设备累计配置容量集合 $E^m = \{E_1^m, E_2^m, \dots, E_w^m\}$ 和m型设备时序出力集合 $P_t^m = \{P_{1,t}^m, P_{2,t}^m, \dots, P_{y,t}^m\}$ ，y为规划期内的年份，t为规划小时序列，在规划中考虑共享储能设备使用效率衰减，当共享储能设备的使用年限超过其全寿命周期，则需考虑共享储能设备更替。共享储能各子组件容量累计 $E_{s_w, \text{usc}}^m$ 计算如式(1)，共享储能各子组件更替约束及各子组件容量衰减率 $\beta_{s_w, m}^{\text{loss}}$ 如式(2)

所示：

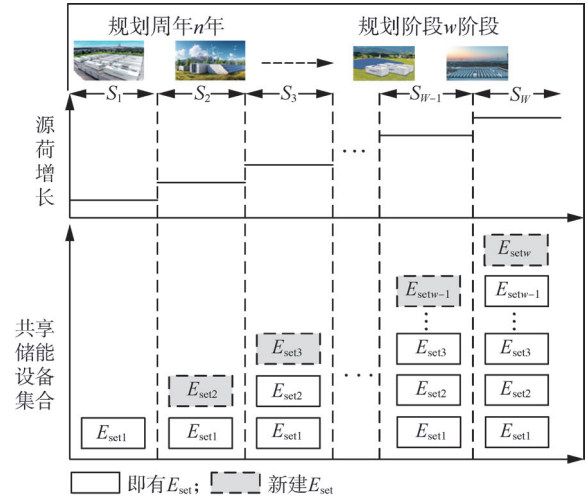


图2 共享储能长期多阶段规划时序图

Fig.2 Timing diagram of long-term multi-stage planning of shared energy storage

$$E_{s_w, m}^m = \sum_{w=1}^w \beta_{s_w, m}^{\text{loss}} \cdot E_{s_w}^m \quad (1)$$

$$\beta_{s_w, m}^{\text{loss}} = \begin{cases} \beta_{s_w, m}^{\text{loss}}, y \leq s_w \perp (s_w - y + 1) \leq K_{\text{life}}^m \\ 0, y > K_{\text{life}}^m \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\beta_{s_w, m}^{\text{loss}}$ 表示共享储能m型子组件使用效率衰减率， K_{life}^m 为共享储能m型子组件的全周期运行寿命，其规划期内各阶段共享储能各自子组件容量可使用约束，如式(3)所示：

$$0 \leq E_{\text{usc}, w}^{i, m} \leq \sum_{j=1}^j \beta_{w, m}^{\text{loss}} E_w^{i, m} \quad (3)$$

3 集中式共享储能长期多阶段规划模型

如图1所示集中式共享储能内部存在氢储能设备，氢储能包含电解槽、储氢罐、燃料电池等多种能量转换设备，将其能量转换过程建模如下：

3.1 能量转换模型

其电-氢能量转换数学模型如公式(4)所示：

$$G_{s, t}^{\text{hE}} = \eta_s^{\text{E}} \cdot \delta_s^{\text{hE}} \cdot E_{s, t}^{\text{hE}} \quad (4)$$

式中，s、t为共享储能规划阶段索引、共享储能运行时间，h为氢储能系统子组件索引，在规划期s阶段t时刻电解槽的制氢量和电解槽的电解功

率分别用 $G_{s,t}^{h,EL}$ 、 $E_{s,t}^{h,EL}$ 表示； η_s^{EL} 为电解槽的制氢电效率； $\delta_s^{h,EL}$ 为电解槽的电-氢能量转换系数。

共享储能系统中氢储能燃料电池作为发电单元，当短时储能设备无法满足各主体的用能需求时，通过燃料电池将储氢罐中的氢能转换为电能，向参与能量共享的各主体提供电能，其氢-电能量转换数学模型如公式（5）所示：

$$E_{s,t}^{h,FC} = \frac{G_{s,t}^{h,FC}}{\delta_s^{h,FC}} \cdot \eta_s^{FC} \quad (5)$$

式中，在规划期 s 阶段 t 时刻燃料电池的耗氢量和燃料电池释放功率分别用 $G_{s,t}^{h,FC}$ 、 $E_{s,t}^{h,FC}$ 表示， η_s^{FC} 为燃料电池氢-电转换效率， $\delta_s^{h,FC}$ 为电解槽的氢-电能量转换系数。

3.2 共享储能长期规划模型

共享储能投资运营商利用长短时储能互补特性调节多主体的不同需求，构建以利益最大化 TI 为目标共享储能长期规划模型，其中包含新能源场站利益 CP^{SES} 、储能投建补贴 CS^{SES} 、共享储能投资成本 CI^{SES} 、储能运维成本 CO^{SES} 、共享储能设备残值回收 CV^{SES} 。其中，共享储能设备残值回收由残值回收系数和设备剩余价值系数决定，设备剩余价值系数由设备剩余价值与全周期寿命之比得到，如式（6）所示：

$$\begin{cases} \max TI = CP^{SES} + CS^{SES} - CI^{SES} - CO^{SES} + CV^{SES} \\ CP^{SES} = \sum_{s \in \Omega_{S_w}} \sum_{r \in \Omega_{RES}} \sum_{t \in \Omega_T} \left(\xi_{s,r,t}^{res,buy} \cdot P_{s,r,t}^{RES,D} - \xi_{s,r,t}^{res,sel} \cdot P_{s,r,t}^{RES,C} \right) \cdot \Delta t \\ CI^{SES} = \sum_{s \in \Omega_{S_w}} \sum_{m \in \Omega_m} k_{s,life}^m \cdot c_s^{m,inv} \cdot CI_s^m \\ CS^{SES} = \sum_{s \in \Omega_{S_w}} \sum_{m \in \Omega_m} \xi_s^{m,sub} \cdot CI_s^m \\ CO^{SES} = \sum_{m \in \Omega_m} \xi_s^{m,om} \cdot CI_s^m \\ \begin{cases} CV^{SES} = \xi_s^{m,svr} \cdot \xi_{s,om}^{m,rem} \cdot CI^{SES} \\ \xi_{s,om}^{m,rem} = R_{s,life}^m / K_{life}^m \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中， r 为新能源场站索引， $\xi_{s,r,t}^{res,buy}$ 、 $\xi_{s,r,t}^{res,sel}$ 分别为 s 阶段 t 时段共享储能运营商与新能源场站 r 交互单位功率购售电价； $c_s^{m,inv}$ 为共享储能系统 m 型子组件的单位投资成本； $\xi_s^{m,sub}$ 、 $\xi_s^{m,om}$ 、 $\xi_s^{m,svr}$ 分别为共享储能系统 m 型子组件的投建补贴成本系数、运行维护成本系数、残值回收成本系数； $P_{s,r,t}^{RES,D}$ 、 $P_{s,r,t}^{RES,C}$ 分别为新能源场站 r 在 s 阶段 t 时段使用共享储能的充、放电功率； $R_{s,life}^m$ 为共享储能系统

m 型子组件在 s 阶段的剩余价值；共享储能各子组件年均值率的 $k_{s,life}^m$ 将初始投资成本折算等年值支付成本^[17]， γ 为贴现率：

$$k_{s,life}^m = \frac{\gamma \cdot (1 + \gamma)^{K_{life}^m}}{(1 + \gamma)^{K_{life}^m} - 1} \quad (7)$$

假设共享储能中电化学储能在规划期 s 阶段可使用容量 $E_{s,use}^b$ 与额定功率 $P_{s,use}^b$ 之间存在线性关系，即式（8）所示：

$$P_{s,use}^b = \varepsilon \cdot E_{s,use}^b \quad (8)$$

其中， b 为电化学储能子组件索引， ε 代表电化学储能电池的容量与功率间的能量倍率系数。

储能共享模式下为各参与主体提供充放电服务时，共享储能运营商根据各参与主体的需求，调节共享储能充放电功率，但充放电功率不能超过额定功率，其电化学储能充放电功率上下限约束如式（9）所示

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,t}^{RES,C} \leq w_{s,t}^{bcha} \cdot P_{s,use}^b \\ 0 \leq P_{s,t}^{RES,D} \leq w_{s,t}^{bcha} \cdot P_{s,use}^b \\ 0 \leq w_{s,t}^{bcha} + w_{s,t}^{bchs} \leq 1, \quad w_{s,t}^{bcha}, w_{s,t}^{bchs} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (9)$$

式中， $w_{s,t}^{bcha}$ 、 $w_{s,t}^{bdis}$ 为规划期 s 阶段 t 时段共享储能充放电二进制变量，当 $w_{s,t}^{bcha} = 1$ 时共享储能放电，当 $w_{s,t}^{bdis} = 1$ 时共享储能充电。电解槽的运行约束和燃料电池的运行约束如公式（10）所示：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,t}^{RES,C} \leq w_{s,t}^{h,EL} \cdot P_{s,use}^{h,EL} \\ 0 \leq P_{s,t}^{RES,D} \leq w_{s,t}^{shs,FC} \cdot P_{s,use}^{h,FC} \\ 0 \leq w_{s,t}^{h,EL} + w_{s,t}^{shs,FC} \leq 1, \quad w_{s,t}^{h,EL}, w_{s,t}^{shs,FC} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (10)$$

式中， $w_{s,t}^{h,EL}$ 为规划期 s 阶段 t 时段电解槽运行状态的二进制变量，其为 1 时表示在规划期 s 阶段 t 时段电解槽启动运行，反之停止运行； $w_{s,t}^{shs,FC}$ 为 1 时表示在规划期 s 阶段 t 时段燃料电池释放功率，反之停止运行。

在共享储能运行过程中需要对其能量连续性进行约束，以确保共享储能的安全稳定运行， $E_{s,t}^{b,E}$ 表示在规划期 s 阶段 t 时段的电化学储能内部电量，不仅与当前时刻共享储能的充放电功率相关还与上时刻储能的电量相关，具体计算如式（11）

（12）第一行（为简化计算忽略不计各储能单元的内自放电率，将其充放电率近似为 1）。

$$\begin{cases} E_{s,t}^{b,E} = E_{s,t-1}^{b,E} + \left(\eta_s^{b,cha} \cdot P_{s,r,t}^{RES,C} + \frac{P_{s,r,t}^{RES,D}}{\eta_s^{b,dis}} \right) \Delta t \\ \alpha_s^{b,E,min} \cdot E_s^{b,E} \leq E_{s,t}^{b,E} \leq \alpha_s^{b,E,max} \cdot E_s^{b,E} \\ E_{s,t=star}^{b,E} = E_{s,t=end}^{b,E} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_{s,t}^{h,sh,t} = G_{s,t-1}^{h,sh,t} + (G_{s,t}^{b,EL} - G_{s,t}^{b,FC}) \cdot \Delta t \\ \alpha_{s,t}^{h,sh,t,min} \cdot E_{s,t}^{h,sh,t} \leq G_{s,t}^{h,sh,t} \leq \alpha_{s,t}^{h,sh,t,max} \cdot E_{s,t}^{h,sh,t} \\ G_{s,t=star}^{h,sh,t} = G_{s,t=end}^{h,sh,t} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\eta_s^{b,cha}$ 和 $\eta_s^{b,dis}$ 分别表示电化学储能充、放电转换效率; $\alpha_s^{b,E,min}$ 和 $\alpha_s^{b,E,max}$ 分别表示电化学储能内部电量最小、大系数; $E_{s,t=star}^{b,E}$ 和 $E_{s,t=end}^{b,E}$ 表示在规划期 s 阶段电化学储能内部始、末电量; $G_{s,t}^{h,sh,t}$ 、 $\alpha_{s,t}^{h,sh,t,min}$ 、 $\alpha_{s,t}^{h,sh,t,max}$ 表示在规划期 s 阶段 t 时段储氢罐内部能量、内部可存储能量最小系数、内部可存储能量最大系数; $G_{s,t=star}^{h,sh,t}$ 和 $G_{s,t=end}^{h,sh,t}$ 分别表示在规划期 s 阶段 t 时段储氢罐内部能量始、末状态。

共享储能运营商投建短时储能和长时储能以满足多主体多时间尺度的调节需求,因而,共享储能和与之交互的新能源场站间存在一定的功率平衡关系如式(13)所示:

$$\begin{cases} P_{s,t}^{SES,IN} = P_{s,t}^{b,C} + P_{s,t}^{h,EL} = \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,r,t}^{RES,C} \\ P_{s,t}^{SES,OUT} = P_{s,t}^{b,D} + P_{s,t}^{h,FC} = \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,r,t}^{RES,D} \end{cases} \quad (13)$$

此外,还应满足参与能量共享的各新能源场站电量供需平衡,以保障各新能源场站安全稳定运行,功率平衡约束如式(14)所示:

$$\begin{aligned} \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,t,r}^{RES} - \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,r,t}^{RES,CUR} - \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,r,t}^{RES,C} = \\ \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,t,r}^{RES,L} - \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,r,t}^{RES,SL} - \sum_{r \in \Omega_R} P_{s,r,t}^{RES,D} \end{aligned} \quad (14)$$

4 算例分析

4.1 算例基础参数设置

为验证模型有效性,选取我国西北新能源富集区域的8 760 h历史风速和辐照数据。为简化计算,从中提取96 h典型时序数据进行共享储能多阶段规划研究。各新能源基地的预测和实际功率通过风速、辐照强度关系计算获得^[18],具体见图3。模型参数设置包括:储能初始投资成本、运维成本、转换效率及残值回收率等(详见表1)^[19]。参考现行

政策,储能补贴收益按总投资额的10%计入模型。

为验证本文方法的有效性,设置以下两种规划方案:

方案1:传统的单阶段共享混合储能长期规划方法;

方案2:改进的多阶段共享混合储能长期规划方法。

假设储能电站总规划期为15年,3年为一个阶段,分为五个阶段,并且仅考虑在规划阶段初期投建储能设备,集中式共享储能与各新能源基地间的交互费用按照年结算,共享储能与各新能源基地按照现货市场价格交易^[20]。假设参与能量共享的主体包括3个新能源场站,初始年份新能源场站1和新能源场站3的风电机组规模分别为600 MW和400 MW,新能源场站2的光伏组件规模为1 000 MW;新能

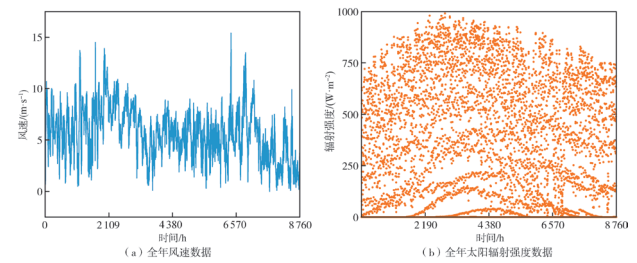


图3 全年风速、太阳光照辐射强度数据

Fig.3 Annual wind speed and solar radiation intensity

表1 参数设置

Tab.1 Parameter settings

参数	数值	参数	数值
$c_e^{shat,inv} /$ (万元 · MW ⁻¹)	130	$\eta^{echa} / \eta^{edis}$	0.95/0.95
$c_p^{shat,inv} /$ (万元 · MW ⁻¹ · h ⁻¹)	200	k_{life}^{shat}	12
$c_{EL,inv} /$ (万元 · MW ⁻¹ · h ⁻¹)	150	$\eta^{shs,EL} / \eta^{shs,FC} / \eta^{shs}$	0.75/0.60/0.95
$c_{FC,inv} /$ (万元 · MW ⁻¹ · h ⁻¹)	300	$\xi^{shs,EL} / \xi^{shs,FC} / \xi_{om}^{shs,hst}$	0.02
$c_{HST,inv} /$ (万元 · m ⁻³)	1.5	$\xi^{shat,EL} / \xi_{om}^{shat,PC}$	0.02

表2 不同规划方案容量配置结果

Tab.2 Capacity configuration results for different planning scenarios

方案	规划阶段	电化学储能 /MW	电解槽 /MW	燃料电池 /MW	储氢罐储能 /MW
方案1	—	811.91	487.14	386.56	2 899.83
方案2	S ₁	513.14	307.88	213.55	2 040.45

	S ₂	112.23	67.34	54.23	356.01
	S ₃	82.44	56.08	63.52	421.12
方案 2	S ₄	74.72	44.83	73.93	540.62
	S ₅	203.76	122.25	72.99	308.21
	总和	986.29	598.38	478.22	3 666.41

源装机规模和所承担负荷的增长率分别为7%和5%，共享储能各子组件单位投资年成本下降率为5%，共享储能各子组件容量年衰减率为2.5%。

4.2 配置结果

共享储能投资运营商采取单阶段混合储能长期规划与共享储能运营商采取多阶段混合储能长期规划结果如表2所示。

方案2中共享储能投建容量总体高于方案1，是由于在方案2中考虑到共享储能设备的容量衰减。在方案2中第二阶段，较第一阶段电化学储能、电解槽、燃料电池、储氢罐的规划容量均降低了78.12%、78.12%、74.46%、85.55%；由于考虑共享储能设备的全周期运行寿命，在规划周期内需更换共享储能子组件容量，且子组件容量的衰减及环境等因素的影响，在规划周期最后一个阶段，较前一阶段增长了172.69%；且在规划前期新增容量较多，随着负荷的饱和，新增储能容量逐渐降低，总体呈下降趋势，共享储能设备的投资成本将会减少，总体呈增长趋势。

在共享储能各子组件下氢储能系统中的能量转换组件包括燃料电池和电解槽的容量均低于电化学储能，而储氢罐储能在第一阶段的容量明显高于电化学储能容量，一方面由于氢储能系统的转换效率低，二是由于储氢罐的单位成本低以及全周寿命长，规划后期由于共享储能的平抑波动能力的加强，以及负荷逐渐趋于饱和趋势，第三阶段的将不再投建储氢罐。共享储能运营商采取单一阶段混合储能长期规划与共享储能运营商采取多阶段混合储能长期规划收益对比分析如表3所示。

表 3 不同规划方案收益

Tab.3 Benefits of different planning options

方案	规划阶段	收益 / 万元	运维成本 / 万元
方案 1	—	987 174.72	386 084.71
	S ₁	136 057.69	9 306.13
	S ₂	289 348.39	11 451.64
	S ₃	340 135.22	13 449.94
方案 2	S ₄	388 576.84	15 451.24
	S ₅	436 480.62	18 957.56
	总和	1 590 598.76	68 616.51

表3显示，相较于方案1，方案2整体收益高了61.13%，并且运行维护成本较降低了82.23%，主要原因是规划方案2避免了方案1的超前投建以及共享储能投建规模大导致较高的运维费用；总之，方案2在容量规划和收益反面均是优于方案1，从而验证基于时序规划的有效性。

4.3 不同规划方案下新能源上网偏差分析

不同规划方案下新能源的上网偏差功率如图5和图6所示。从图中整体来看，在四季典型日上午10:00到下午16:00时间段中3个新能源场站基本均出现上网偏差正功率情况，这是由于3个新能源场站是基于能量互补相济的运行策略，而白天光伏发电的新能源基地出力较大，进而导致各新能源均出现较高的上网偏差正功率，而在四季典型日晚上均出现上网负偏差，一方面是由于晚上光伏电站无出力，另一方面为满足电化学储能的短时功率平衡，因而导致凌晨时段风电新能源场站出现上网偏差负功率。

分析可知，从不同规划方案角度来看，方案1整体初始阶段的上网偏差功率均小于方案2，是由于方案1的规划需要满足规划后期的新能源调节需求，因而规划容量较大，可以更好的满足规划前期的新能源消纳，但是方案1整体规划后期的上网偏差功率均大于方案2，是由于方案1属于一次性投建储能设备，时间推移下新能源基地的调节需求增加以及共享储能各子组件的可用容量的下降双重因素影响下，导致规划后期共享储能对新能源基地的调节能力降低，进而加剧各新能源基地上网偏差功率的波动性。

从时序规划的角度来看，在共享储能规划方案2下，由图6可知各新能源基地在时间推移下的调节需求逐渐趋于平稳，因而规划后期相较于前期上网偏差负功率出现频率明显低于规划前期；图6显示，规划前期的上网偏差值虽有小于规划后期，但规划后期整体的偏差率是均低于规划前期；而共享储能规划方案1下，规划后期的整体的上网偏差正功率时段和偏差率均大于规划前期，但是其上网偏差负功率与规划方案2的趋势相似，是由于在规划方案1中未考虑共享储能各子组件的容量衰退等因素对调节需求的影响，即是处于理想规划环境中；因而，从整体的上网偏差分析可有效验证时序规划的有效性。

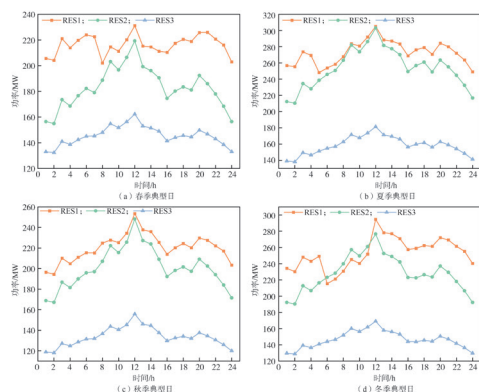


图4 典型小时新能源基地负荷功率

Fig. 4 Typical hourly load power of new energy base

5 结论

本文针对新能源场站群共享储能长期规划问题,提出了一种计及电网形态演变的多阶段规划策略。通过构建考虑储能技术成本下降和容量衰减的动态优化模型,实现了储能系统与“源-荷”需求的协同演进。主要结论如下:

(1) 规划适应性提升:与传统单阶段规划相比,多阶段规划能更精准地响应新能源装机增长(年增长率7%)和负荷变化(年增长率5%),使电化学储能配置量优化调整61.13%,可避免超前投资导致的78.12%容量冗余问题。

(2) 经济效益显著:算例表明,多阶段规划可使系统的总收益提升61.13%,运维成本降低82.23%。特别是储氢罐的配置方案,通过分阶段调整可使投资成本下降85.55%,验证了时序动态优化的经济优势。

(3) 系统稳定性保障:所提方法有效控制了新能源上网偏差,在15年规划期内将偏差率降低42%,解决了传统方法后期调节能力下降172.69%的问题,确保了储能系统全寿命周期的稳定运行。

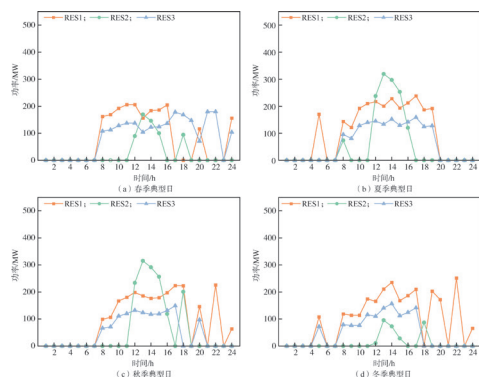


图5 方案1初始阶段新能源基地上网正偏差功率

Fig.5 Positive deviation power of new energy base in the initial stage of scheme 1

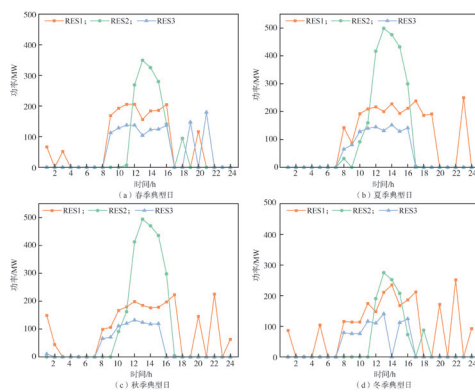


图6 方案2初始阶段新能源基地上网正偏差功率

Fig.6 Positive deviation power of the new energy base in the initial stage of scheme 2

参考文献

- [1] 唐西胜,李伟,沈晓东.面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J].电力系统自动化,2024,48(9):178-191.
TANG Xisheng,LI Wei,SHEN Xiaodong.Research Progress and Prospect of Energy Storage Planning Method for New Power System[J].Automation of Electric Power Systems,2024,48(9):178-191.
- [2] 王蓓蓓,胡维涵,牟玉亭,等.储能对高比例新能源电力系统的容量价值贡献及机制思考[J].电网技术,2024,48(6):2520-2531.
WANG Beibei,HU Weihang,MOU Yuting,et al.Contribution and Mechanism Consideration of Energy Storage to Capacity Value in High Proportion Renewable Energy Power Systems[J].Power System Technology,2024, 48(6):2520-2531.
- [3] 范越,冯松杰,魏韡,等.基于频谱拆分的高比例新能源电力系统火电-多类型储能容量优化匹配[J].中国电机工程学报,2024,44(9):3518-3531.
FAN Yue,FENG Songjie,WEI Wei,et al.Optimal Capacity Matching of Thermal Generation and Multi-Type Energy Storage in Power Systems with High Share of Renewable Energy Based on Spectrum Splitting[J].Proceedings of the CSEE,2024,44(9):3518-3531.
- [4] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1):158-169.
XIE Xiaorong,MA Ningjia,LIU Wei,et al.Functions of Energy Storage in Renewable Energy Dominated Power Systems:Review and Prospect[J].Proceedings of the CSEE,2023,43(1):158-169.
- [5] MAROCCO P,FERRERO D,MARTELLI E,et al.An MILP Approach for the Optimal Design of Renewable

- Battery-Hydrogen Energy Systems for Off-Grid Insular Communities[J].Energy Conversion and Management, 2021,245:114564.
- [6] ZHOU M G,MA F,JIN W X.Long-Term Cost Planning of Data-Driven Wind-Storage Hybrid Systems[J].Renew- able Energy,2024,223:120073.
- [7] XU X F,WANG K,MA W H,et al.Multi-Objective Parti- cle Swarm Optimization Algorithm based on Multi- Strategy Improvement for Hybrid Energy Storage Optimization Configuration[J].Renewable Energy,2024, 223:120086.
- [8] DENG H D,WANG J J,SHAO Y M,et al.Optimization of Configurations and Scheduling of Shared Hybrid Elec- tric- Hydrogen Energy Storages Supporting to Multi- Microgrid System[J].Journal of Energy Storage,2023, 74:109420.
- [9] GAO M F,HAN Z H,ZHANG C,et al.Optimal Configur- ation for Regional Integrated Energy Systems with Mu- lti-Element Hybrid Energy Storage[J].Energy,2023,277: 127672.
- [10] GIOVANNIELLO M A,WU X Y.Hybrid Lithium-Ion Battery and Hydrogen Energy Storage Systems for a Wind-Supplied Microgrid[J].Applied Energy,2023,345: 121311.
- [11] 贾欣怡.混合储能支撑风电场参与电网调频的容量优化配置[D].华北电力大学(北京),2024.
- JIA Xinyi.Capacity Optimization Configuration of Hybrid Energy Storage to Support Wind Farms to Participate in Grid Frequency Regulation[D].North China Electric Power University(Beijing),2024.
- [12] 鲁明芳,李咸善,李飞,等.季节性氢储能-混氢燃气轮机系统两阶段随机规划[J].中国电机工程学报,2023, 43(18):6978-6992.
- LU Mingfang,LI Xianshan,LI Fei,et al.Two-Stage Sto- chastic Programming of Seasonal Hydrogen Energy Storage and Mixed Hydrogen-Fueled Gas Turbine System[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(18): 6978-6992.
- [13] 李子晨,夏杨红,孙勇,等.考虑氢能长短周期储能特- 性的电氢综合能源系统容量配置方法[J].电网技术, 2025,49(1):12-21.
- LI Zichen,XIA Yanghong,SUN Yong,et al.Optimal Si- zing of Electricity-Hydrogen Integrated Energy System Considering Multi-Timescale Operation of Hydrogen Storage System[J]. Power System Technology,2025, 49(1):12-21.
- [14] 洪烽,贾欣怡,梁璐,等.面向风电场频率支撑的混- 合储能层次化容量优化配置[J].中国电机工程学- 报,2024,44(14):5596-5607.
- HONG Feng,JIA Xinyi,LIANG Lu,et al.Hierarchical Capacity Optimization Configuration of Hybrid Energy Storage for Wind Farm Frequency Support[J].Procee- dings of the CSEE,2024,44(14):5596-5607.
- [15] 郭子轩,林利祥,马乙歌.考虑高比例新能源接入的配- 电网网架多目标规划方法[J].电工技术,2024(18):67- 69.
- GUO Zixuan,LIN Lixiang,MA Yige.Multi-Objective Planning of Distribution Framework Considering Hi- gh- Proportion Integration of New Energy Generations [J]. Electric Engineering,2024(18):67-69.
- [16] 刘忠,黄彦铭,朱光明,等.含风-光-电氢混合储能的多- 微电网系统容量优化配置方法[J].发电技术,2025, 46(2):240-251.
- LIU Zhong,HUANG Yanming,ZHU Guangming,et al.Optimal Capacity Configuration Method for Multi- Microgrid System Utilizing Wind-Solar-Electric-Hy- drogen Hybrid Energy Storage[J].Power Generation Technology,2025,46(2):240-251.
- [17] HAN J P,FANG Y C,LI Y W,et al.Optimal Planning of Multi-Microgrid System with Shared Energy Storage Based on Capacity Leasing and Energy Sharing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2025,16(1):16-31.
- [18] 马溪原,吴耀文,方华亮,等.采用改进细菌觅食算法的- 风/光/储混合微电网电源优化配置[J].中国电机工- 程学报,2011,31(25):17-25.
- MA Xiyuan,WU Yaowen,FANG Hualiang,et al.Optimal Sizing of Hybrid Solar-Wind Distributed Generation in an Islanded Microgrid Using Improved Bacterial For- aging Algorithm[J].Proceedings of the CSEE,2011,31 (25):17-25.
- [19] 杨昶兴,李笑竹,陈来军,等.计及联盟合作成本的新- 能源场站共享储能优化配置策略[J].电网技术,2025, 49(4):1403-1412.
- YANG Changxing,LI Xiaozhu,CHEN Laijun,et al.Energy Storage Allocation Strategy for Renewable Energy Generation Station Clusters Co-Build and Share Considering the Cost of Alliance Cooperation[J].Power System Techno- logy,2025,49(4):1403-1412.
- [20] 喻颖倩,何川,刘天琪,等.计及储能调频与寿命损耗的- 多套餐共享储能主从博弈分布鲁棒定价方法研究[J].中- 国电机工程学报,2025,45(4):1450-1465.
- YU Yingqian,HE Chuan,LIU Tianqi,et al.Research on Robust Pricing Method of Shared Energy Storage Multi- Package Master-Slave Game Distributed Robust Considering Energy Storage Frequency Modulation and Life Loss[J]. Proceedings of the CSEE,2025,45(4): 1450-1465.

收稿日期：2025年7月8日

作者简介：



刘双硕(2000)，男，硕士研究生，
研究方向为共享储能的规划、运行及演
化分析，2146250480@qq.com。

刘双硕

李笑竹(1990)，女，博士，副教授，研究方向为新型
电力系统运行调控，lixiaozhu@xju.edu.cn。

马成(1999)，男，硕士研究生，研究方向为储能并网
运行控制，2697068392@qq.com。

尹纯亚(1994)，男，博士，副教授，研究方向为交直
流混联电网运行与控制，xjdxycy@xju.edu.cn。