XXXX

考虑新能源中长期履约的AA-CAES代储租赁与多市场协同运营策略

李咸善[1]，钱震辉[1]，钟　浩[1]，赵　亮[1]，唐郅炫[2]，王秋杰[1]，杨楚原[1]
（[1]梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室（三峡大学），湖北省 宜昌市 443002；[2]国网重庆市电力公司永川供电分公司，重庆市 402160）

摘　要：针对新能源市场化运营中长期合约履约偏差与弃电问题，提出一种先进绝热压缩空气储能（AA-CAES）代储租赁与多市场协同运营策略。首先，区分新能源代储电量和储能自营电量，建立考虑储气、储热状态耦合及电量来源追踪的AA-CAES运行模型；其次，构建AA-CAES运营商与联合市场的主从博弈模型，上层优化代储租赁、电能量套利和调频策略，下层以系统运行成本最小为目标完成市场联合出清，并利用KKT条件和Big-M方法实现双层模型单层化求解。算例结果表明，代储租赁可促进新能源富余电量跨时段转移，降低弃电率和履约缺额风险；多市场协同能够拓展AA-CAES收益来源并提高其综合收益，但调频容量预留会与代储履约释放产生竞争。进一步的租赁价格分析表明，租赁价格需兼顾新能源参与意愿、储能运营收益和系统运行经济性。

关键词：先进绝热压缩空气储能；新能源履约偏差；租赁储能；多市场协同出清
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0665
中图分类号：TM 73　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-15

AA-CAES Shared Leasing Mechanism and Multi-market Collaborative Operation Strategy Considering Medium- and Long-term Contract Fulfillment Risk of Renewable Energy

LI Xianshan[1], QIAN Zhenhui[1], ZHONG Hao[1], Zhao Liang[1], TANG Zhixuan[2], WANG Qiujie[1], YANG Chuyuan[1]
([1]Hubei Provincial Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations(China Three Gorges University), Yichang 443002, Hubei Province, China; [2]State Grid Chongqing Electric Power Company, Yongchuan Power Supply Branch, Chongqing 402160, China)

Abstract: To address the medium- and long-term contract deviation and curtailment issues in the market-oriented operation of renewable energy, this paper proposes a coordinated operation strategy for advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) that combines entrusted storage leasing with multi-market participation. First, distinguishing between renewable-entrusted electricity and self-operated electricity of the storage, an AA-CAES operation model is established that accounts for the coupling of air-storage and thermal-storage states as well as electricity source tracing. Second, a Stackelberg game

收稿日期：2026-07-29；修改稿日期：2026-09-20。
基金项目：将下层原始可行条件、对偶可行条件、式（A.3）驻点条件及经式（A.6）线性化后的互补松弛条件嵌入上层AA-CAES运行模型后，即可将原双层主从博弈模型转换为单层混合整数线性规划模型。国家自然科学基金项目（52307109）；湖北省自然科学基金国际科技合作项目（2025EHA066）；江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目（XTCX202408）。
通信作者：钱震辉（2002），男，通信作者，硕士研究生，研究生方向为压缩空气储能优化调度，E-mail：3203749561@qq.com
引用本文：李咸善, 钱震辉, 钟浩, 等. 考虑新能源中长期履约的AA-CAES代储租赁与多市场协同运营策略[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-15.
Citation：LI Xianshan, QIAN Zhenhui, ZHONG Hao, et al. AA-CAES Shared Leasing Mechanism and Multi-market Collaborative Operation Strategy Considering Medium- and Long-term Contract Fulfillment Risk of Renewable Energy[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-15.

model between the AA-CAES operator and the joint market is constructed: the upper level optimises entrusted storage leasing, energy arbitrage and frequency regulation strategies, while the lower level minimises the system operation cost to clear the joint market; the bi-level model is transformed into a single-level problem using KKT conditions and the Big-M method. Case study results show that entrusted storage leasing facilitates the inter-temporal shifting of surplus renewable energy, reducing the curtailment rate and the risk of contract shortfall. Multi-market coordination expands the revenue sources of AA-CAES and increases its overall profit, but frequency regulation capacity reservation may compete with the discharge for contract fulfilment. Further leasing-price analysis indicates that the leasing price should balance the renewable energy's willingness to participate, the storage operator's revenue, and the overall system economy.

Keywords: advanced adiabatic compressed air energy storage; renewable energy contract deviation; energy storage leasing; multi-market joint clearing

0 引 言

我国“双碳”目标下的新型电力系统建设快速发展，新能源加速从“保障性收购”迈向“市场化交易”。国家发展改革委、国家能源局明确提出，新能源上网电量原则上全部进入电力市场，上网电价通过市场交易形成[1]。与此同时，新型储能在“十五五”时期被进一步定位为新型能源体系的重要支撑，长时储能技术在提升新能源消纳能力和系统调节能力中的作用日益突出[2]。在此背景下，新能源场站不再只是被动消纳角色，而是需要主动进入市场运营，并面对现货市场价格波动、中长期合约履约偏差结算风险的挑战[3]。尤其在午间光伏大发、负荷晚峰的“鸭型曲线”工况下，新能源出力波动性与长周期预测误差的叠加，更易造成中长期合约曲线与实际可交付电量之间的偏离，进而引发履约缺额偏差风险和富裕电量的弃电损失。因此，如何借助储能调节实现新能源电量跨时段转移的高效消纳，并对冲其中长期市场合约履约偏差风险；以及通过市场机制发现储能调节及其多市场运营价值，提升储能综合运营效益，是新型电力系统市场化运营亟需解决的关键问题。

针对上述问题，本文提出AA-CAES代储租赁与多市场协同运营策略。新能源场站租赁AA-CAES存储富余电量，并在后续时段释放，用于中长期合约履约或日前市场交易；AA-CAES运营商在提供代储服务的同时，参与电能量市场和调频辅助服务市场，以拓展收益来源。本文所称“多市场”是指日前电能量市场和调频辅助服务市场；中长期合约作为新能源履约与结算基准嵌入联合出清模型，不作为独立优化出清市场。AA-CAES通过协调电能量套利、代储电量释放和调频容量配置，实现不同市场业务之间的协同运营。

目前，储能通过容量共享复用提高利用效率已受到广泛关注。已有研究分别开展了光伏电站集群储能租赁配置[4]、风电场群与共享储能协同运行[5]、面向多场景调节需求的集中式共享储能配置[6]，以及多新能源场站共享储能运行与成本分摊研究[7]。上述研究表明，共享储能能够吸收新能源富余电量并改善系统调节能力，但主要关注新能源的物理消纳和储能容量配置，较少涉及被转移电量对中长期合约履约的支撑作用。

在共享储能市场化运营方面，相关研究进一步考虑了绿色证书和虚拟储能交易[8]、电力—碳市场协同运行[9]、合作博弈容量配置[10]、主从博弈与收益分配[11]，以及社区储能参与本地交易、电能量和调频服务市场等问题[12]。双层优化与Stackelberg博弈也被用于多综合能源系统运营决策[13]，文献[14]则研究了配电网自平衡条件下的共享储能配置。上述研究为共享储能商业化运营提供了基础，但较少区分新能源代储电量与储能运营商自营电量，难以准确核算不同来源电量的履约贡献和收益归属。

先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage，AA-CAES)具有单站容量大、储能时长长、寿命周期长和适合集中式调节等特点，是支撑高比例新能源消纳的重要长

时储能技术。在压缩空气储能研究方面，已有文献对火电耦合压缩空气储能、先进压缩空气储能基本原理与应用、地下储气技术及储能技术发展进行了系统研究[15-18]。在运行优化方面，相关研究分别考虑了AA-CAES备用特性、随机滚动调度、温度动态特性、多场景调节动态和强化学习调度[19-23]。与电化学储能不同，AA-CAES运行涉及压缩、膨胀、储气、储热和热量损失等过程，其充放电能力受储气、储热状态及机组工况共同影响。因此，将AA-CAES简化为普通电池式模型，难以准确反映代储租赁、电能量套利和调频容量预留对设备运行状态的共同影响。

在多时间尺度市场运营方面，已有研究分别分析了风光水储联合体市场化调度、中长期合约与现货交易比例以及我国多时间尺度电力市场之间的耦合关系[24-26]。然而，现有研究较少将新能源中长期合约履约、代储电量归属、AA-CAES储气储热状态以及电能量与调频市场运营纳入统一框架。特别是在AA-CAES同时承担代储租赁、自营套利和调频服务时，不同业务将共同占用其压缩、膨胀、储气和储热能力，可能产生容量竞争和收益分配问题。

综上所述，在新能源市场化运营背景下，AA-CAES代储租赁服务与市场化运营建模需要进一步解决以下关键问题：一是通过代储租赁机制，实现新能源富裕能量的时序迁移调节，协同满足新能源的中长期合约履约偏差调节需求和日前套利调节需求，助力新能源规避其金融风险与弃电风险；二是储能参与双市场运营的自营充放电量需求与其代储租赁服务充放电量需求之间的协同优化，发现储能调节价值，以提升储能的综合运营效益；三是区分新能源代储电量与储能自营电量影响的AA-CAES调节运行精细化建模，满足市场约束和储能物理约束，包括AA-CAES热力学约束、租赁服务、调频容量占用和中长期履约价值之间的耦合关系，以实现各种电量的来源追踪及其效益归属核算。为此，本文提出一种考虑中长期履约约束的AA-CAES代储租赁并参与多市场协同运营策略，主要工作如下：

1）提出面向新能源日前消纳与中长期合约履约协同的AA-CAES代储租赁机制。日前市场阶段，新能源场站根据日前预测出力、中长期合约曲线、弃风弃光风险、代储租赁价格和AA-CAES可用容量，决策AA-CAES租赁容量与吸纳富余电量策略，通过富裕电量的时序迁移，综合支撑新能源中长期合约履约需求及其日前低储高放套利运营需求。

2）构建区分充电来源和放电归属的AA-CAES多电量追踪模型。将AA-CAES内部电量划分为新能源代储电量和储能自营电量，分别刻画其充电来源、状态占用、释放去向和收益归属，使新能源租赁充电形成的代储电量能够在后续时段用于新能源履约核算和套利核算。

3）构建区分新能源代储电量与储能自营电量影响的AA-CAES调节运行模型。综合考虑各种电量的市场运营约束、储气—储热状态耦合下的可用出力约束，通过等效储气状态、等效储热状态和分段线性出力折减系数，描述AA-CAES压缩、膨胀、储气、储热和日末状态回归等运行特性，刻画其在不同运行状态下的可用储能和发电能力及其调频服务能力。

4）构建AA-CAES与双市场之间的主从博弈优化调度模型。主体AA-CAES以其代储租赁和多市场运营综合收益最大为目标，决策其代储租赁与多市场投标策略；从体联合市场以市场购能成本最小为目标，满足新能源履约约束和市场负荷及调频需求联合出清，决策市场购能策略。采用KKT条件实现主从博弈模型单层化求解。通过多场景算例，进行收益结构、时序运行和租赁价格敏感性对比分析，验证所提方法在新能源消纳、履约风险缓解和AA-CAES收益提升方面的有效性。

1 AA-CAES代储租赁与多市场协同运营策略及其优化模型框架

如图1所示，为AA-CAES储能租赁并参与多市场协同运营的系统场景框架图。在此框架下，新能源电站及火电厂参与中长期市场并签订中长期合约电量，以锚定大部分日前市场的交易电量。日前市场进行中长期合约结算及其合约电量支撑后的剩余负荷支撑电量的交易平衡。

由于新能源长时间尺度预测误差大，据此签订的中长期合约在日前市场履约结算时将面临较大的合约偏差风险；同时，其中长期合约履约后的剩余电量难以适配日前市场的负荷需求与电价波动，面临低电价售电甚至弃电风险。为此，针对含压缩空

气储能(AA-CAES)的新型电网，以AA-CAES为灵活性资源，提出一种考虑新能源中长期合约履约约束的AA-CAES代储租赁与多市场协同运营策略，解决AA-CAES代储租赁机制、区分代储电量与自营电量影响的AA-CAES调节运行特性建模以及AA-CAES多品种协同运营策略及其优化模型等关键问题，以规避新能源履约偏差与弃电风险，促进新能源高效消纳和AA-CAES高效运营。

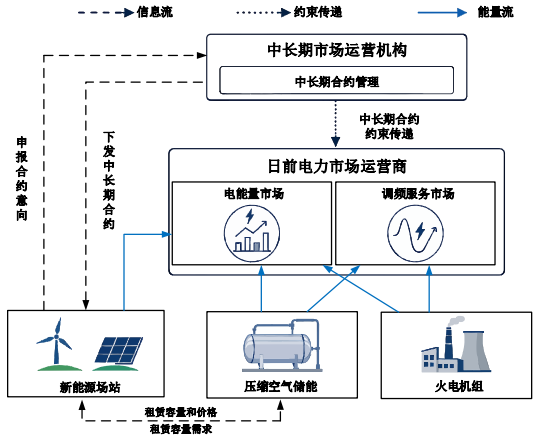

图1 AA-CAES代储租赁和多市场协同运营框架

Fig.1 Operation Framework for AA-CAES Leasing and Multi-market Coordination

1.1 基于储能代储租赁机制的AA-CAES运营策略及新能源市场化消纳策略

1）AA-CAES代储租赁机制

为了规避新能源履约偏差风险与弃电风险，促进新能源高效消纳，提出了储能代储租赁机制。该机制下，考虑新能源的反调峰特性及其引发的源荷“鸭型曲线”特性，在新能源大发的低电价甚至负电价时段，新能源租赁储能容量代为存储其履约后的富裕电量，规避弃电风险；在新能源小发的高电价时段，释放其代储电量，对冲其履约的不足电量，规避履约不足惩罚风险；同时，对冲履约不足后的剩余放电量可获得高电价售电收益。

2）AA-CAES代储租赁与双市场协同运营策略

储能作为高成本灵活性资源，需要考虑其市场背景下的高效运营，以激励储能参与调节运营的积极性。为此，将储能在提供代储租赁服务的同时，参与日前电能量市场和调频辅助服务市场运营，在代储租赁服务与自营套利和调频服务之间分配容量，决策其代储租赁容量及其租赁价格，提升其综合运营效益。

3）新能源租赁储能的市场化高效消纳策略

日前市场阶段，新能源电站租赁储能的核心动机在于通过储能的时移能力缓解其弃电风险、对冲其中长期合约履约不足偏差，并将低价值时段电量转移至高价值时段释放，提升其高效消纳能力。新能源场站租赁AA-CAES容量的多寡，取决于储能租赁服务价格、新能源弃电损失、电量时移套利收益以及中长期履约缺额惩罚成本之间的权衡，并受到火电及AA-CAES的双市场运营策略的影响。

因而，在中长期市场合约已经锚定日前市场大部分交易电量的前提下，新能源的日前市场高效消纳实质是双市场多主体联合运营策略的优化，实现多主体中长期合约履约条件下的剩余电量交易以及调频需求交易，满足双市场需求出清，达到双市场的系统运营成本最小。

1.2 AA-CAES代储租赁与新能源市场化消纳之间的主从博弈双层优化模型框架

基于上述AA-CAES和新能源运营策略，以新能源中长期履约为约束条件，决策AA-CAES代储租赁容量及其租赁价格，达到AA-CAES综合运营效益最大和新能源消纳的双市场运营成本最小。

如此，AA-CAES代储租赁服务决策与新能源市场化消纳决策之间存在着主从博弈双层优化关系。为此，构建“上层AA-CAES收益最大化-下层双市场出清成本最小化”的主从博弈双层优化模型框架，如图2所示。上层为AA-CAES运营决策模型，以综合收益最大化为目标，决策租赁容量及租赁价格、充放电计划以及调频容量等。同时，为保证新能源主体参与代储租赁的经济可接受性，在双层优化模型中设置新能源运营约束，即新能源租赁AA-CAES代储服务后的净收益不低于其未租赁储能时的独立运营基准收益。下层为考虑新能源中长期履约的电能量市场和调频市场联合出清模型，以系统运行成本最小为目标，根据上层给定的租赁价格和容量边界，满足双市场需求出清，决定新能源直接上网电量、代储充电电量、弃风弃光电量，以及火电的发电出力与调频容量分配等策略。

2 AA-CAES代储租赁及其多市场运行特性模型

基于AA-CAES代储租赁及其多市场运营策略，AA-CAES运行需同时承担代储租赁、自营套利和

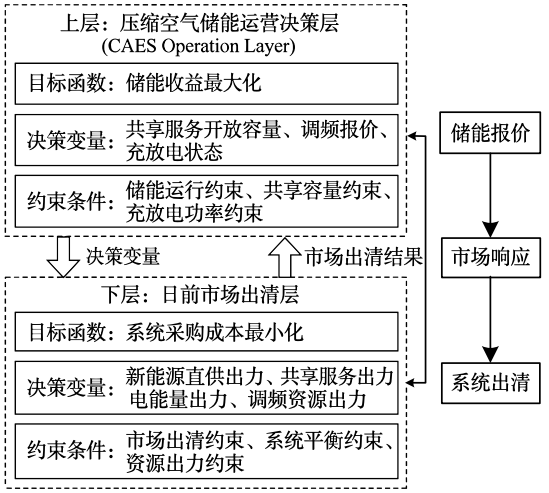

图2 AA-CAES租赁和多市场协同运营模型框架

Fig.2 Framework of AA-CAES Leasing and Multi-market Collaborative Operation Model

调频辅助服务功能。与常规电化学储能不同，AA-CAES充放电运行过程涉及压缩储气储热和膨胀发电等环节，均受到其代储电量、自营套利电量和调频辅助服务电量的影响。为了实现三种电量的协同优化并区分其利益归属，本文将AA-CAES实际压缩储能功率和实际膨胀发电功率分解区分为自营电量、代储电量和调频实际调用电量三部分，并建立考虑三种电量影响的储气、储热状态递推和运行约束模型。

2.1 代储租赁电量流向与容量占用关系

新能源场站电量可分配为直接上网电量（日前市场交易电量）、租赁储能充电电量和弃电电量，如式(1)所示。

$$\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{RE}} = P_{i,t}^{\mathrm{dir}} + \sum_{j\in J} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}} + P_{i,t}^{\mathrm{cur}} \tag{1}$$

式中：$\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{RE}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{dir}}$、$P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{cur}}$分别为新能源场站$i$在$t$时段的预测出力、直接上网电量、租赁AA-CAES电站j的代储充电功率和弃电功率。

新能源场站在日前阶段可用于中长期履约支撑的电量由直接上网电量和代储释放电量共同构成，如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\mathrm{rel}} = \sum_{j\in J} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,d}} \\ P_{i,t}^{\mathrm{del}} = P_{i,t}^{\mathrm{dir}} + P_{i,t}^{\mathrm{rel}} + P_{i,t}^{b} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{rel}}$为新能源场站i在时段t的总代储释放功率；$P_{i,t}^{\mathrm{del}}$为新能源场站i在时段t可用于市场交付和履约核算的电量；$P_{i,t}^{b}$是新能源场站在时段t的补购电量，该电量可作为新能源中长期合约履约支撑电量。不计入代储释放电量。

在日前多市场协同运行中，AA-CAES同时承担自营套利、代储租赁和调频辅助服务功能。为统一刻画不同业务对机组实际充放电功率的影响，本文将AA-CAES电站j的总压缩充电功率和总膨胀放电功率分别分解成由代储充放和自营充放以及调频实际充放功率三部分构成，如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_{j,t}^{\mathrm{c}} = P_{j,t}^{\mathrm{g,c}} + \sum_{i\in I} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}} + P_{j,t}^{fr,\mathrm{c}} \\ P_{j,t}^{\mathrm{d}} = P_{j,t}^{\mathrm{g,d}} + \sum_{i\in I} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,d}} + P_{j,t}^{fr,\mathrm{d}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$P_{j,t}^{\mathrm{c}}$、$P_{j,t}^{\mathrm{d}}$分别为AA-CAES电站j在时段t的总压缩充电功率和总膨胀放电功率；$P_{j,t}^{\mathrm{g,c}}$、$P_{j,t}^{\mathrm{g,d}}$分别为AA-CAES运营商从电网购电形成的自营套利充电、放电功率；$P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}}$、$P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,d}}$为新能源场站$i$在时段$t$向AA-CAES电站$j$租赁的代储充电、放电功率。$P_{j,t}^{fr,\mathrm{c}}$、$P_{j,t}^{fr,\mathrm{d}}$分别为AA-CAES电站$j$在时段$t$的调频实际调用的压缩充电功率和膨胀放电功率。

考虑调频调用方向差异，调频压缩充电功率和膨胀放电可进一步表示，如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_{j,t}^{\mathrm{fr,c}} = P_{j,t}^{\mathrm{d,c}} - P_{j,t}^{\mathrm{u,c}} \\ P_{j,t}^{\mathrm{fr,d}} = P_{j,t}^{\mathrm{u,d}} - P_{j,t}^{\mathrm{d,d}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$P_{j,t}^{\mathrm{d,c}}$、$P_{j,t}^{\mathrm{u,c}}$分别为压缩侧增加充电提供向下调频、减少充电提供向上调频时形成的等效压缩功率；$P_{j,t}^{\mathrm{u,d}}$、$P_{j,t}^{\mathrm{d,d}}$为膨胀侧增加发电提供向上调频、减少发电提供向下调频时形成的等效发电功率。

AA-CAES向上和向下调频容量分别由压缩侧和膨胀侧共同提供，如式(5)所示。

$$\begin{cases} R_{j,t}^{\mathrm{up}} = R_{j,t}^{\mathrm{up,d}} + R_{j,t}^{\mathrm{up,c}} \\ R_{j,t}^{\mathrm{dn}} = R_{j,t}^{\mathrm{dn,d}} + R_{j,t}^{\mathrm{dn,c}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$R_{j,t}^{\mathrm{up}}$、$R_{j,t}^{\mathrm{dn}}$分别为AA-CAES电站j向上和向下调频容量；$R_{j,t}^{\mathrm{up,c}}$、$R_{j,t}^{\mathrm{dn,c}}$分别为AA-CAES电站j压缩侧提供的向上、向下调频容量；$R_{j,t}^{\mathrm{up,d}}$、$R_{j,t}^{\mathrm{dn,d}}$分别为AA-CAES电站j膨胀侧提供的向上、向下调频容量。

调频容量表示AA-CAES在调频市场中标的可调能力，调频实际调用功率表示该容量在运行过程中被调用后形成的等效充放电功率，二者满足如式(6)所示的容量约束。

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{u,c}} \leqslant R_{j,t}^{\mathrm{up,c}} \\ 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{u,d}} \leqslant R_{j,t}^{\mathrm{up,d}} \\ 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{d,c}} \leqslant R_{j,t}^{\mathrm{dn,c}} \\ 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{d,d}} \leqslant R_{j,t}^{\mathrm{dn,d}} \end{cases} \tag{6}$$

需要说明的是，调频市场收益按中标调频容量结算，而不是按实际调用电量结算，实际调用电量仅用于刻画调频服务对AA-CAES实际充放功率以及储气、储热状态的影响。

AA-CAES电站同一时段不能同时处于压缩和膨胀状态，如式(7)所示。

$$\begin{cases} u_{j,t}^{\mathrm{c}} + u_{j,t}^{\mathrm{d}} \leqslant 1 \\ 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{c}} \leqslant u_{j,t}^{\mathrm{c}} \bar{P}_j^{\mathrm{c}} \\ 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{d}} \leqslant u_{j,t}^{\mathrm{d}} \bar{P}_j^{\mathrm{d}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$u_{j,t}^{\mathrm{c}}$、$u_{j,t}^{\mathrm{d}}$分别为AA-CAES电站j的压缩状态和膨胀状态变量；$\bar{P}_j^{\mathrm{c}}$和$\bar{P}_j^{\mathrm{d}}$分别为AA-CAES电站j的额定压缩功率和额定膨胀功率。

由于压缩侧减少充电提供向上调频时，其调用功率不能超过当时的基准压缩充电功率；同理膨胀侧减少放电提供向下调频时，其调用功率不能超过当时基准膨胀放电功率，如式(8)所示。

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{u,c}} \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{g,c}} + \sum_{i \in I} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}} \\ 0 \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{d,d}} \leqslant P_{j,t}^{\mathrm{g,d}} + \sum_{i \in I} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,d}} \end{cases} \tag{8}$$

2.2 电量来源追踪与代储释放归属模型

AA-CAES同时参与代储租赁、自营套利和调频服务时，其实际储气、储热状态由三类电量共同影响。其中，代储电量需要进一步追踪其新能源场站归属，以保证代储释放不超过历史租赁充电形成的库存，并为后续中长期履约核算提供依据。

参考AA-CAES调度优化文献中对储气、储热状态的等效建模方法[20-21,24]，本文采用等效储气状态和等效储热状态描述AA-CAES动态能量转换过程。进一步地，针对代储租赁场景下电量来源追踪和收益归属核算需求，本文将新能源代储电量、自营电量和调频实际调用等效电量对储气、储热状态的影响分别刻画，如式(9)所示。

$$\begin{cases} S_{i,j,t}^{\mathrm{sh}} = S_{i,j,t-1}^{\mathrm{sh}} + \alpha_j^{\mathrm{c}} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}} \Delta t - \alpha_j^{\mathrm{d}} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,d}} \Delta t \\ H_{i,j,t}^{\mathrm{sh}} = (1 - \lambda_j^{\mathrm{h}}) H_{i,j,t-1}^{\mathrm{sh}} + \beta_j^{\mathrm{c}} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}} \Delta t - \beta_j^{\mathrm{d}} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,d}} \Delta t \\ S_{i,j,t}^{\mathrm{sh}} \geqslant 0 \,;\, H_{i,j,t}^{\mathrm{sh}} \geqslant 0 \end{cases} \tag{9}$$

式中：$S_{i,j,t}^{\mathrm{sh}}$、$H_{i,j,t}^{\mathrm{sh}}$分别为新能源场站i在AA-CAES电站j在时段t的中形成的等效代储储气状态和等效代储储热状态。α_j^{c}、α_j^{d}分别为AA-CAES电站j压缩充电和膨胀放电对储气状态影响的等效转换系数；β_j^{c}、β_j^{d}分别为AA-CAES电站j压缩产热和膨胀耗热的等效转换系数；α_j^{c}、α_j^{d}、β_j^{c}、β_j^{d}均为正值；$\lambda_j^{\mathrm{h}} \in (0,1)$为储热损耗系数；$\Delta t$为调度时长设定为1 h。

同理，AA-CAES自营充放电量和调频实际调用电量也会影响储气、储热状态。其中，自营状态由$P_{j,t}^{\mathrm{g,c}}$和$P_{j,t}^{\mathrm{g,}d}$按式(9)相同形式递推，记为$S_{j,t}^{g}$和$H_{j,t}^{g}$；调频调用状态由$P_{j,t}^{fr,\mathrm{c}}$、$P_{j,t}^{fr,\mathrm{d}}$按相同形式递推，记为$S_{j,t}^{fr}$和$H_{j,t}^{fr}$。

AA-CAES电站j的总储气和总储热状态分别记为$S_{j,t}$和$H_{j,t}$，分别由代储电量、自营电量和调频实际调用电量共同决定，如式(10)所示。

$$\begin{cases} S_{j,t} = S_{j,t}^{\mathrm{g}} + \sum_{i \in I} S_{i,j,t}^{\mathrm{sh}} + S_{j,t}^{\mathrm{fr}} \\ H_{j,t} = H_{j,t}^{\mathrm{g}} + \sum_{i \in I} H_{i,j,t}^{\mathrm{sh}} + H_{j,t}^{\mathrm{fr}} \end{cases} \tag{10}$$

如此，新能源代储电量和AA-CAES自营电量以及调频实际电量在物理上共同影响总储气、储热状态，但在市场属性上保持区分，从而为代储释放归属和收益核算提供依据。

2.3 AA-CAES储气-储热状态与运行边界约束

AA-CAES的能量转换过程包括压缩储气、储热和膨胀发电。根据式(9)，AA-CAES总储气状态递推如式(11)所示。

$$\begin{cases} S_{j,t} = S_{j,t-1} + \alpha_j^{\mathrm{c}} P_{j,t}^{\mathrm{c}} \Delta t - \alpha_j^{\mathrm{d}} P_{j,t}^{\mathrm{d}} \Delta t \\ H_{j,t} = (1 - \lambda_j^{\mathrm{h}}) H_{j,t-1} + \beta_j^{\mathrm{c}} P_{j,t}^{\mathrm{c}} \Delta t - \beta_j^{\mathrm{d}} P_{j,t}^{\mathrm{d}} \Delta t \end{cases} \tag{11}$$

储气储热边界约束如式(12)所示。

$$\begin{cases} S_j^{\min} \leqslant S_{j,t} \leqslant S_j^{\max} \\ H_j^{\min} \leqslant H_{j,t} \leqslant H_j^{\max} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$S_j^{\max}$、$S_j^{\min}$分别为AA-CAES电站j的储气状态上限和下限；$H_j^{\max}$、$H_j^{\min}$分别为AA-CAES电站j的储热状态上限和下限。

AA-CAES的实际压缩功率应满足储气剩余空间和储热剩余容量约束，如(13)式所示。

$$\begin{cases} \alpha_j^{\mathrm{c}} P_{j,t}^{\mathrm{c}} \Delta t \leqslant S_j^{\max} - S_{j,t-1} \\ \beta_j^{\mathrm{c}} P_{j,t}^{\mathrm{c}} \Delta t \leqslant H_j^{\max} - H_{j,t-1} \end{cases} \tag{13}$$

AA-CAES的可用放电能力受储气状态和储热状态共同约束，实际膨胀发电功率应满足约束，如式(14)所示。

$$\begin{cases} \alpha_j^{\mathrm{d}} P_{j,t}^{\mathrm{d}} \Delta t \leqslant S_{j,t-1} - S_j^{\min} \\ \beta_j^{\mathrm{d}} P_{j,t}^{\mathrm{d}} \Delta t \leqslant H_{j,t-1} - H_j^{\min} \end{cases} \tag{14}$$

AA-CAES参与电能量市场、代储租赁和调频辅助服务时，其实际充放电功率均受到储气、储热状态限制。

3 考虑新能源中长期履约约束的AA-CAES储能租赁与多市场运营协同优化模型

依据图2所示模型框架，本文构建AA-CAES储能租赁与多市场运营双层优化模型。上层以AA-CAES运营商收益最大为目标，优化租赁价格、租赁容量、自营充放电计划及调频容量申报；下层以系统运行成本最小为目标，在满足新能源中长期履约约束的基础上，联合出清电能量市场和调频服务市场，确定新能源、火电机组及AA-CAES的中标电量与调频服务量。该模型刻画了AA-CAES在代储租赁、电能量套利和调频辅助服务间的容量协同分配关系，并通过新能源参与约束，保证新能源租赁储能后的净收益不低于不租赁时的基准收益。

3.1 上层AA-CAES报价与运行决策模型

3.1.1 上层目标函数

上层AA-CAES运营商主体以其多品种运营综合收益F^{up}最大化为目标，包括租赁储能服务收益F^{sh}、电能量市场套利收益F^{e}和调频服务市场收益F^{fr}，扣除其运行维护成本C^{om}和机组启停成本C^{su}，如式(15)所示。

$$\max F^{up} = F^{\mathrm{sh}} + F^{\mathrm{e}} + F^{\mathrm{fr}} - C^{\mathrm{om}} - C^{\mathrm{su}} \tag{15}$$

$$\begin{cases} F^{\mathrm{sh}} = \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\rho_t^{\mathrm{sh}} P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}}\Delta t \\ F^{\mathrm{e}} = \sum_{t\in T}\sum_{j\in J}\lambda_t^{\mathrm{e}}\left(P_{j,t}^{\mathrm{g,d}}\Delta t - P_{j,t}^{\mathrm{g,c}}\Delta t\right) \\ F^{\mathrm{fr}} = \sum_{t\in T}\sum_{j\in J}\left(\lambda_t^{\mathrm{up}} R_{j,t}^{\mathrm{up}} + \lambda_t^{\mathrm{dn}} R_{j,t}^{\mathrm{dn}}\right)\Delta t \\ C^{\mathrm{om}} = \sum_{t\in T}\sum_{j\in J} c_j^{\mathrm{om}}\left(P_{j,t}^{\mathrm{c}} + P_{j,t}^{\mathrm{d}}\right)\Delta t \\ C^{\mathrm{su}} = \sum_{t\in T}\sum_{j\in J}\left(c_j^{\mathrm{c,su}} v_{j,t}^{\mathrm{c}} + c_j^{\mathrm{d,su}} v_{j,t}^{\mathrm{d}}\right) \end{cases} \tag{16}$$

式中，ρ_t^{sh}为储能租赁服务价格；λ_t^{e}为日前电能量市场价格；λ_t^{up}、λ_t^{dn}分别为时段t的向上、向下调频服务价格；c_j^{om}、$c_j^{\mathrm{c,su}}$、$c_j^{\mathrm{d,su}}$分别为AA-CAES电站j的单位运行成本、压缩侧和膨胀侧单位启动成本；$v_{j,t}^{\mathrm{c}}$、$v_{j,t}^{\mathrm{d}}$分别为压缩侧和膨胀侧启动状态变量，满足式(17)。

$$\begin{cases} v_{j,t}^{\mathrm{c}} \geqslant u_{j,t}^{\mathrm{c}} - u_{j,t-1}^{\mathrm{c}} \\ v_{j,t}^{\mathrm{d}} \geqslant u_{j,t}^{\mathrm{d}} - u_{j,t-1}^{\mathrm{d}} \end{cases} \tag{17}$$

3.1.2 上层约束条件

1）租赁价格上下限约束，如式(18)所示。

$$\underline{\rho}^{\mathrm{sh}} \leqslant \rho_t^{\mathrm{sh}} \leqslant \bar{\rho}^{\mathrm{sh}} \tag{18}$$

式中：$\bar{\rho}^{\mathrm{sh}}$、$\underline{\rho}^{\mathrm{sh}}$分别为租赁价格上下限。

2）AA-CAES租赁开放容量约束和调频容量申报约束，如式(19)所示。

$$\begin{cases} 0 \leqslant \bar{P}_{j,t}^{\mathrm{sh}} \leqslant \bar{P}_j^{\mathrm{c}} \\ 0 \leqslant \bar{R}_{j,t}^{\mathrm{up}} \leqslant \bar{P}_j^{\mathrm{d}} \\ 0 \leqslant \bar{R}_{j,t}^{\mathrm{dn}} \leqslant \bar{P}_j^{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{19}$$

式中：$\bar{P}_{j,t}^{\mathrm{sh}}$为AA-CAES电站$j$在时段的租赁开放容量；$\bar{R}_{j,t}^{\mathrm{up}}$、$\bar{R}_{j,t}^{\mathrm{dn}}$分别为AA-CAES向上、向下调频申报容量。

3）AA-CAES运行约束

AA-CAES实际运行还需满足第2节建立的代储租赁电量流向、代储电量追踪、储气-储热状态、可用出力和调频能力约束，如式(3)-(14)。

3.2 下层市场联合出清模型

下层联合市场基于上层优化申报的储能代储租赁价格、共享服务开放容量和调频容量策略，以双市场联合运营的电网系统运行成本最小为目标，满足新能源中长期合约履约偏差平衡、火电中长期合约履约平衡、系统电能量平衡、系统调频需求平衡和机组运行约束条件，进行联合市场统一出清，获得新能源、火电机组和AA-CAES的中标策略。其中，包括AA-CAES申报的代储容量和双市场充放策略的中标量，体现了多品类市场化运营背景下的AA-CAES运营效益。

3.2.1 下层目标函数

下层以市场运营系统总成本F^{M}最小为目标，包括火电发电成本C^{th}、火电调频成本$C^{\mathrm{fr,th}}$、AA-CAES调频成本$C^{\mathrm{fr,A}}$、储能代储租赁服务成本C^{sh}、新能源履约补购成本C^{b}、新能源弃电成本C^{cr}和履约缺额惩罚成本C^{de}以及系统外购成本C^{et}，如式(20)所示。

$$\min F^{\mathrm{M}} = C^{\mathrm{th}} + C^{\mathrm{fr,th}} + C^{\mathrm{fr,A}} + C^{\mathrm{sh}} + C^{\mathrm{cr}} + C^{de} + C^{b} + C^{\mathrm{et}} \tag{20}$$

$$\begin{cases} C^{\mathrm{th}} = \sum_{t\in T}\sum_{g\in G} c_g^{\mathrm{th}} P_{g,t}^{\mathrm{th}}\Delta t \\ C^{\mathrm{fr,th}} = \sum_{t\in T}\sum_{g\in G}\left(c_g^{\mathrm{up}} R_{g,t}^{\mathrm{up}} + c_g^{\mathrm{dn}} R_{g,t}^{\mathrm{dn}}\right)\Delta t \\ C^{\mathrm{fr,A}} = \sum_{t\in T}\sum_{j\in J}\left(\lambda_t^{\mathrm{up}} R_{j,t}^{\mathrm{up}} + \lambda_t^{\mathrm{dn}} R_{j,t}^{\mathrm{dn}}\right)\Delta t \\ C^{\mathrm{sh}} = \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\left(\rho_t^{\mathrm{sh}} + c_{ij}^{\mathrm{tr}}\right) P_{i,j,t}^{\mathrm{sh,c}}\Delta t \\ C^{\mathrm{cr}} = \sum_{t\in T}\sum_{i\in I} c^{\mathrm{cr}} P_{i,t}^{\mathrm{cr}}\Delta t \\ C^{de} = \sum_{t\in T}\sum_{i\in I} c_i^{de} P_{i,t}^{de}\Delta t \\ C^{b} = \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\lambda_t^{e} P_{i,t}^{b}\Delta t \\ C^{\mathrm{et}} = \sum_{t\in T}\lambda_t^{\mathrm{et}} P_t^{\mathrm{et}}\Delta t \end{cases} \tag{21}$$

式中：c_g^{th}、$P_{g,t}^{\mathrm{th}}$为火电机组g的单位发电成本及其t时段出力；c_g^{up}、c_g^{dn}为火电机组g向上、向下调频成本系数；$R_{g,t}^{\mathrm{up}}$、$R_{g,t}^{\mathrm{dn}}$为火电机组g在时段t的向上和向下调频容量；$c_{i,j}^{\mathrm{tr}}$为新能源场站i对AA-CAES电站j之间的单位传输成本系数；$P_{i,t}^{\mathrm{cr}}$、c^{cr}为新能源场站i在时段t的弃电功率和单位弃电惩罚系数；$P_{i,t}^{de}$、c_i^{de}为新能源场站i在时段t的缺额电量及其履约缺额惩罚成本系数；λ_t^{et}为系统从外部购电价格；P_t^{et}为系统在时段t的外部购电功率。需说明的是补购电量为新能源场站为履约补购的功率；外部购电功率为系统物理供需不足时的向上一级电网购电功率。

3.2.2 下层约束条件

1）新能源出力约束

新能源中长期履约约束如式(22)所示。

$$P_{i,t}^{\mathrm{del}} + P_{i,t}^{de} \geqslant P_{i,t}^{\mathrm{ml}} \tag{22}$$

式中：$P_{i,t}^{ml}$为新能源场站i在时段t的中长期签约功率。

共享服务成交容量受AA-CAES开放容量约束如式(23)所示：

$$\sum_{i \in I} P_{ij,t}^{\mathrm{sh,c}} \leqslant \bar{P}_{j,t}^{\mathrm{sh}} \tag{23}$$

新能源补购功率约束如式(24)所示。

$$0 \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{b}} \leqslant \bar{P}_{i,t}^{\mathrm{b}} \tag{24}$$

式中：$\bar{P}_{i,t}^{\mathrm{b}}$为市场允许新能源场站$i$在时段$t$的补购功率上限。

2）新能源代储租赁参与约束

为保证新能源主体参与代储租赁的积极性，设置新能源参与约束，使新能源场站群参与AA-CAES代储租赁后的净收益不低于不参与代储租赁时的基准收益，并可进一步设置最低收益增量，如式(25)所示。

$$F^{\mathrm{RE}} \geqslant F^{\mathrm{RE},0} + \Delta F_{\min}^{\mathrm{RE}} \tag{25}$$

式中：F^{RE}为新能源场站群参与AA-CAES代储租赁后的净收益；$F^{\mathrm{RE},0}$为新能源场站群不参与代储租赁时的基准收益；$\Delta F_{\min}^{\mathrm{RE}}$为新能源场站群接受代储服务所要求的最低收益增量。

新能源场站群参与代储租赁后的净收益由中长期合约结算收益和日前市场偏差结算收益，扣除代储租赁服务费用、代储电量传输成本、弃电成本、履约补购成本以及履约缺额惩罚成本构成，如式(26)所示。

$$F^{\mathrm{RE}} = \sum_{t \in T}\sum_{i \in I}\left[\lambda_i^{\mathrm{ml}} P_{i,t}^{\mathrm{ml}} + \lambda_t^{e}\left(P_{i,t}^{\mathrm{del}} - P_{i,t}^{\mathrm{ml}}\right)\right]\Delta t - C^{\mathrm{sh}} - C^{\mathrm{cr}} - C^{b} - C^{\mathrm{de}} \tag{26}$$

式中：λ_i^{mlt}为中长期合约电价。

3）火电机组约束

火电机组约束主要包括出力上下限、调频容量预留约束以及上下爬坡约束，如式(27)-(29)所示。火电中长期合约作为结算基准参与收益核算，不作为日前出清的物理出力下限，以避免合约基线与调频容量预留约束叠加造成出清不可行。

$$\underline{P}_g^{\mathrm{th}} \leqslant P_{g,t}^{\mathrm{th}} \leqslant \bar{P}_g^{\mathrm{th}} \tag{27}$$

$$\begin{cases} P_{g,t}^{\mathrm{th}} + R_{g,t}^{up} \leqslant \bar{P}_g^{\mathrm{th}} \\ P_{g,t}^{\mathrm{th}} - R_{g,t}^{dn} \geqslant \underline{P}_g^{\mathrm{th}} \end{cases} \tag{28}$$

$$-r_g^{\mathrm{dn}} \leqslant P_{g,t}^{\mathrm{th}} - P_{g,t-1}^{\mathrm{th}} \leqslant r_g^{\mathrm{up}} \tag{29}$$

式中：$\bar{P}_g^{\mathrm{th}}$、$\underline{P}_g^{\mathrm{th}}$分别为火电机组$g$的出力上限和下限；$r_g^{\mathrm{up}}$、$r_g^{\mathrm{dn}}$分别为火电机组$g$的向上、向下爬坡限值。

4）电能量市场与调频市场平衡约束

电能量平衡约束如式(30)所示。

$$\sum_{g \in G} P_{g,t}^{\mathrm{th}} + \sum_{i \in I}\left(\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{re}} - P_{i,t}^{\mathrm{cr}}\right) + \sum_{j \in J} P_{j,t}^{\mathrm{d}} + P_t^{\mathrm{et}} = P_{L,t} + \sum_{j \in J} P_{j,t}^{\mathrm{c}} \tag{30}$$

式中：P_L为系统在时段t的负荷需求。

AA-CAES调频成交容量受上层申报容量约束满足式(31)。

$$\begin{cases} 0 \leqslant R_{j,t}^{\mathrm{up}} \leqslant \bar{R}_{j,t}^{\mathrm{up}} \\ 0 \leqslant R_{j,t}^{\mathrm{dn}} \leqslant \bar{R}_{j,t}^{\mathrm{dn}} \end{cases} \tag{31}$$

系统向上、向下调频需求约束如式(32)所示。

$$\begin{cases} \sum_{g \in G} R_{g,t}^{\mathrm{up}} + \sum_{j \in J} R_{j,t}^{\mathrm{up}} \geqslant F_t^{\mathrm{up}} \\ \sum_{g \in G} R_{g,t}^{\mathrm{dn}} + \sum_{j \in J} R_{j,t}^{\mathrm{dn}} \geqslant F_t^{\mathrm{dn}} \end{cases} \tag{32}$$

式中：F_t^{up}、F_t^{dn}分别为系统在时段t的向上和向下需求。

3.3 双层协同优化模型求解

本文构建AA-CAES运营决策与市场联合出清耦合的双层协同优化模型。首先，独立求解新能源不参与AA-CAES代储租赁时的运营问题，获得新能源基准净收益$F^{RE,0}$，并将其作为式（25）新能源参与理性约束的参考值。

给定上层AA-CAES运行状态、租赁报价、开放容量及调频申报容量后，下层联合市场出清模型为线性规划问题。本文采用KKT条件将下层最优响应替换为原始可行性、对偶可行性、驻点条件和互补松弛条件，并采用Big-M方法线性化互补条件，

将双层模型转化为单层混合整数优化模型，具体推导见附录A。单层模型以AA-CAES综合收益最大化为目标求解；KKT条件保证下层市场出清满足系统运行成本最小，新能源参与理性约束保证其租赁后的净收益不低于基准收益。模型在MATLAB/YALMIP环境下调用Gurobi求解。

4 算例分析

4.1 算例设置

为验证所提策略的有效性，以我国东部某新能源富集省份典型夏季日为研究对象，调度周期为24 h，步长为1 h。算例系统包含3座光伏电站和2座风电场，其中光伏总装机容量为600MW，风电总装机容量为400MW；常规电源包括3台燃煤火电机组，额定容量分别为300、200、150MW；储能资源包括2座异构AA-CAES电站，其中电站1的额定功率和容量为50MW/200MWh，充电等效效率为72%，电站2的额定功率和容量为100MW/400MWh，充电等效效率为70%。

市场参数设置：新能源中长期合约签约比例为其中长期预测出力的90%[26]；弃电惩罚系数取日前最高电价；履约缺额惩罚系数取日前最高电价的1.5倍；系统外部购电价格取日前最高电价。新能源履约补购电量上限为逐时中长期签约量的5%，补购电价采用“日前电价加成+中长期合约价格下限”的方式确定。AA-CAES代储租赁价格由上层模型优化决策，并设置协商价格上限，取日前最高电价的0.95倍。系统调频需求按负荷水平分段设置：低谷时段向上/向下调频需求分别为负荷的3%/2%，高峰时段分别为5%/4%，其余时段分别为4%/3%。AA-CAES上、下调频容量价格分别为15、10元/(MW·h)，火电机组上调频报价分别为18、22、28元/(MW·h)，下调频报价为对应上调频报价的70%。本文采用MAPE=10%的日前新能源预测结果进行确定性优化，将预测出力作为已知参数输入。

为了体现本文所提的AA-CAES参与市场运营策略的有效性以及优势，设置4种典型算例分析，对比各场景方案的运行效益。

场景1：无储能时的新能源独立入网消纳。

场景2：AA-CAES作为独立储能电站参与电能量市场进行峰谷套利。

场景3：AA-CAES作为独立储能电站同时参与电能量市场并进行租赁共享服务。

场景4（本文方法）：AA-CAES同时参与代储租赁和多市场运营策略。

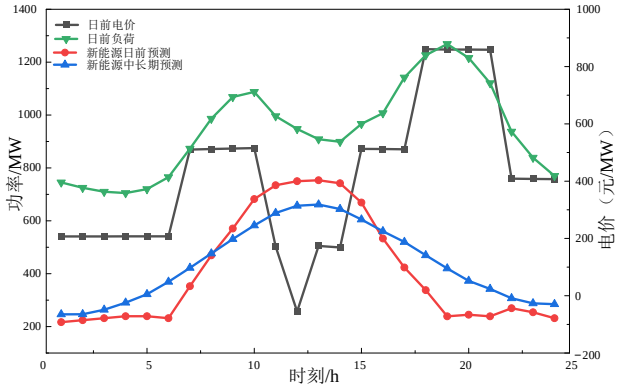

图3 中长期与日前预测曲线及日前电价

Fig.3 Medium-term and long-term forecasting curves, day-ahead forecasting curves and day-ahead electricity prices

4.2 仿真结果与分析

4.2.1 新能源消纳与中长期履约风险对冲效果

为验证AA-CAES代储租赁机制对新能源消纳和中长期履约风险的影响，表1给出了不同场景下各主体收益与系统运行结果。

由表1可知，场景1中由于系统缺乏灵活调节资源，新能源弃电量达到660.75 MWh，弃电率为6.69%，履约缺额惩罚为39.46万元，新能源收益仅为266.42万元，系统社会成本达到573.89万元。这表明，在无储能参与时，新能源出力与负荷需求存在明显时序错配，系统消纳能力不足，进而导致较高的弃电损失和中长期履约风险。

场景2中，AA-CAES仅参与电能量市场自营套利。相比场景1，新能源收益提高至333.83万元，系统社会成本降至491.31万元，弃电量由660.75MWh降至240.36MWh，弃电率降至2.43%，履约缺额惩罚也降至12.90万元。其原因在于，AA-CAES在低价、新能源大发时段充电，增加了低谷消纳空间，使部分原本弃电的新能源电量得以上网并参与中长期合约履约。同时，AA-CAES通过峰谷套利获得22.98万元净收益，说明即使不开展代储租赁业务，其自营套利也能改善系统经济性和新能源消纳水平。

场景3在场景2基础上引入新能源代储租赁机

表1 不同场景下主体收益与系统运行结果对比

Tab.1 Comparison of Entity Revenue and System Operation Results Under Different Scenarios

指标	场景1	场景2	场景3	场景4
新能源收益/万元	266.42	333.83	337.16	337.24
AA-CAES净收益/万元	0	22.98	32.36	35.99
系统社会成本/万元	573.89	491.31	475.22	465.70
弃电量/MWh	660.75	240.36	103.08	74.08
弃电率/%	6.69	2.43	1.04	0.75
履约缺额惩罚/万元	39.46	12.90	12.95	16.87

制。相比场景2，新能源收益进一步提高至337.16万元，AA-CAES净收益提高至32.36万元，系统社会成本降至475.22万元，弃电量和弃电率分别降至103.08MWh和1.04%。这表明，代储租赁机制能够引导新能源在低价值时段租赁AA-CAES充电，并在高价值时段释放，实现新能源电量跨时段转移。新能源侧通过减少弃电提升结算收益，AA-CAES则通过提供代储服务获得额外租赁收益。

场景4进一步考虑AA-CAES参与调频辅助服务市场。相比场景3，AA-CAES净收益提高至35.99万元，系统社会成本降至465.70万元，弃电量和弃电率分别降至74.08 MWh和0.75%。说明AA-CAES在提供代储租赁服务的同时，仍可利用快速响应能力参与调频市场，并通过调频收益提升综合运营效益；同时，调频服务增强了系统运行灵活性，进一步降低了社会成本。

从场景2与场景4对比可见，本文所提完整协同策略使新能源收益由333.83万元提高至337.24万元，AA-CAES净收益由22.98万元提高至35.99万元，系统社会成本由491.31万元降至465.70万元，弃电率由2.43%降至0.75%。这说明该策略能够在改善新能源收益的同时，提高AA-CAES运营收益并降低系统运行成本，实现新能源场站、储能运营商和系统侧的协同优化。

需要指出的是，场景4中AA-CAES参与调频会占用部分代储释放能力，使履约缺额惩罚较场景3有所增加。但新能源侧通过减少弃电和获得代储释放收益，弥补了履约惩罚增加带来的影响，其净收益仍不低于不租赁基准，并高于场景2和场景3。因此，本文策略并非单纯追求履约缺额惩罚最小，而是在满足新能源参与约束的前提下，实现AA-CAES收益提升、新能源收益改善和系统运行成本降低的综合优化。

4.2.2 AA-CAES多市场协同收益

为分析AA-CAES在不同市场机制下的收益变化，表2给出了不同场景下AA-CAES的收益结构。

表2 不同场景下AA-CAES收益来源

Tab.2 Revenue Sources of AA-CAES Under Different Scenarios

指标	场景2	场景3	场景4
租赁服务收益/万元	0	26.39	27.23
电能量套利净收益/万元	32.30	14.83	11.89
调频收益/万元	0	0	5.37
AA-CAES净收益/万元	22.98	32.36	35.99

由表2可知，场景2中AA-CAES仅依靠电能量市场套利获得收益，其电能量套利净收益为32.30万元，扣除运维成本和启停成本后净收益为22.98万元。

场景3中，AA-CAES向新能源提供代储租赁服务，获得26.39万元租赁服务收益。由于部分容量被代储业务占用，其自营电能量套利空间受到压缩，电能量套利净收益由场景2的32.30万元降至14.83万元。但租赁服务收益弥补了自营套利机会成本，使AA-CAES净收益提高至32.36万元。说明代储租赁能够为长时储能提供新的收益来源，改善其单一套利盈利不足的问题。

场景4在场景3的基础上进一步参与调频市场，获得5.37万元调频收益，AA-CAES净收益提高至35.99万元，较场景3增加3.63万元，表明调频服务能够进一步提升储能运营收益。然而，调频收益主要通过调频容量补偿直接归属于AA-CAES，新能源并不直接参与调频收益分配，只能通过弃电减少和代储释放间接受益。因此，场景3和场景4中新能源收益分别为337.16万元和337.24万元，仅增加0.08万元，调频服务带来的新增收益主要由AA-CAES获得，体现出不同市场主体之间存在收益分配差异。

同时，调频服务会占用AA-CAES的功率和储能裕度，与新能源代储履约形成容量竞争。场景4中，调频上调等效电量为272.31 MWh，新能源代储释放量为234.20 MWh，调频调用量约为代储释放量的116.27%。这表明部分原本可用于新能源中长期履约的释放能力被调频服务占用。相应地，场

景4的履约缺额惩罚由场景3的12.95万元增加至16.87万元。当调频需求与新能源履约缺额集中在相同时段，且AA-CAES剩余功率或储能状态不足时，调频服务可能挤压代储履约能力，从而增加新能源履约风险。

综上，AA-CAES在完整策略下的收益来源由单一电能量套利转变为“代储租赁收益—电能量套利收益—调频收益”相结合的多元结构。该结构既增强了储能运营商盈利能力，也通过代储服务支撑新能源跨时段消纳和高价释放。

4.2.3 场景4时序运行特性分析

为进一步揭示完整策略的运行机理，图4给出了场景4下系统24 h电能量市场功率平衡结果，图5给出了新能源代储充电、代储释放、弃电、补购及履约缺额的24 h时序结果，图6给出了场景4下双向调频功率平衡结果。

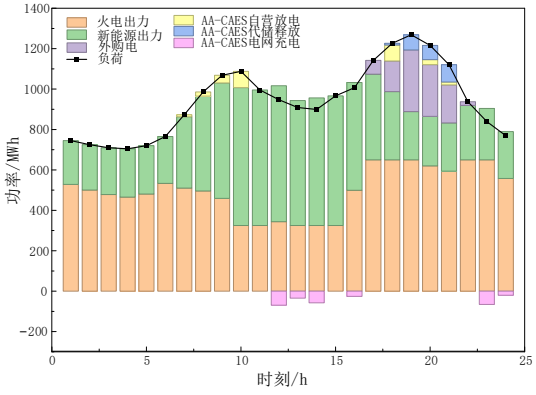

图4 电能量市场功率平衡图

Fig.4 Power Balance Diagram of Energy Market

由图4可知，场景4中AA-CAES的运行具有明显的削峰填谷特征。在新能源出力较高、电价较低的午间时段，AA-CAES主要进行充电；在负荷较高、电价较高的晚峰时段，AA-CAES进行放电，从而降低系统高峰时段的供电压力。系统外购电主要集中于晚峰负荷较高时段，说明外购电仅作为本地电源不足时的补充电源。AA-CAES的放电行为在一定程度上减少了系统对外部购电的依赖，提高了系统运行经济性。

由图5可知，新能源代储充电与释放呈现明显的跨时段转移特征。代储充电主要发生在低电价时段，累计充电量为340.34MWh。该时段光伏出力处于高位，系统净负荷较低，日前电价显著下降，其中第12时段电价降至最低。在此情况下，新能源直接上网的经济性较弱，部分电量通过租赁AA-CAES进行存储，从而减少低价消纳和弃电损失。

相应地，代储释放主要集中在高电价时段，累计释放电量为238.88MWh。代储充电量与释放量分别为340.34 MWh和238.88 MWh，差额101.46 MWh主要来自AA-CAES电站充放电效率（70%-72%）、储气储热损耗及日末剩余代储能量。本文按照实际释放量核算新能源履约贡献和收益。该时段负荷进入晚峰阶段，日前电价维持在最高水平。AA-CAES将午间存储的新能源电量转移至晚峰时段释放，实现新能源电量的跨时段价值提升，同时为系统高峰负荷提供支撑。上述结果表明，代储租赁机制能够有效缓解新能源出力与负荷需求、电价信号之间的时序错配，提高新能源电量利用价值和系统运行灵活性。

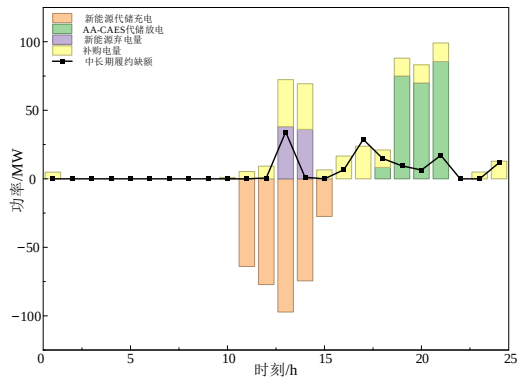

图5 新能源代储与履约时序结果

Fig.5 Results of New Energy Entrusted Storage and Performance Time Sequence

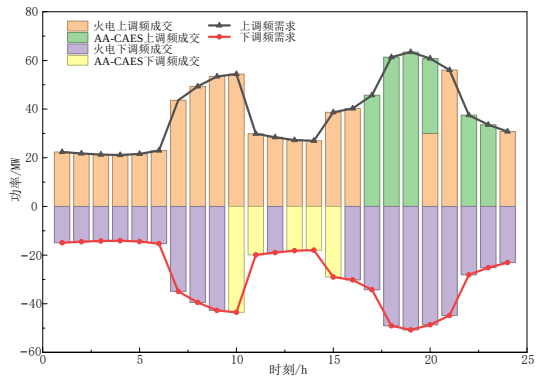

图6 调频市场功率平衡图

Fig.6 Power Balance Diagram of Frequency Regulation Market

由图6可知，场景4中AA-CAES在承担代储租赁和电能量市场运行的同时，还参与上、下调频服务。其上调频成交量为272.31MWh，下调频成交量为128.57MWh，对应调频收益为5.37万元。调频服务使AA-CAES的收益来源由单一电能量套利扩展为代储租赁、电能量套利和调频收益的多元结构，有助于提升储能资产利用率。

综上，场景4下AA-CAES能够在午间新能源大发时段吸收低价值电量，在晚峰高价时段释放代储电量，并进一步参与双向调频服务。该运行方式缓解了新能源出力与负荷、电价高峰之间的时序错配，是完整策略实现新能源弃电降低、AA-CAES收益提升和系统社会成本下降的重要原因。

4.2.4 租赁价格灵敏性分析

为进一步分析代储租赁价格对各主体运营决策和系统运行结果的影响，在其他参数保持不变的条件下，分别设置不同租赁价格水平进行对比。表3给出了不同租赁价格水平下各主体收益和系统运行指标的变化。

表3 不同代储租赁价格下主体收益与系统运行指标

Tab.3 Revenue and System Operation Indicators Under Different Lease Prices

租赁价格（元/MWh）	新能源收益（万元）	AA-CAES收益（万元）	系统运行成本（万元）	弃电率（%）	租赁电量（MWh）
450	348.14	26.25	466.17	1.04	229.96
550	344.26	28.55	466.38	1.03	242.31
650	343.64	30.85	464.09	0.91	241.05
750	343.24	33.85	466.02	0.84	334.03
800	337.69	35.86	465.20	0.79	333.82

由表3可知，随着租赁价格由450元/MWh提高至800元/MWh，AA-CAES净收益由26.25万元增至35.86万元，而新能源净收益由348.14万元降至337.69万元，表明租赁价格主要影响源储双方的收益分配。弃电率由1.04%降至0.79%，说明合理提高租赁价格能够增强AA-CAES提供代储服务的积极性，促进新能源消纳。系统运行成本则呈非单调变化，并在650元/MWh时达到最低值464.09万元。综合主体收益与系统运行效果，租赁价格并非越高越优，需在AA-CAES收益、新能源参与意愿和系统经济性之间进行协调。

5 结 论

在新能源和储能全面参与市场化运营背景下，本文提出了一种考虑新能源中长期合约履约约束的AA-CAES代储租赁与多市场协同运营策略，核心在于通过电量来源追踪和释放归属核算，将新能源富余电量的物理消纳价值进一步转化为合约履约支撑价值和市场结算价值。主要结论如下：

（1）代储租赁机制能够区别于传统共享储能容量租赁模式，将新能源履约后的富余电量以明确归属关系存入AA-CAES，并在后续时段释放用于履约支撑或日前市场交易，从而实现新能源电量由“物理消纳”向“履约支撑”的价值转化。

（2）区分代储电量与自营电量的AA-CAES运行模型能够刻画不同来源电量对储气、储热状态的共同影响，避免多来源电量混同导致的履约贡献不清和收益归属不明问题，为共享长时储能参与多市场运营提供了可核算的建模方法。

（3）多市场协同运营能够提高AA-CAES综合收益并降低系统运行成本，但调频容量预留会占用代储释放能力。租赁价格敏感性分析表明，提高租赁价格有利于增加AA-CAES收益和促进新能源消纳，但会降低新能源收益，租赁价格应在储能收益、新能源参与意愿和系统经济性之间进行协调。

目前本文采用确定性日前预测和单节点典型日模型，尚未考虑新能源预测误差、调频调用不确定性以及电网潮流约束；同时，未进一步刻画AA-CAES连续多日运行和设备寿命损耗。后续将结合随机或鲁棒优化方法，构建考虑网络约束和长期运行特性的多时间尺度模型，以提高所提策略的实际适用性。

参 考 文 献

[1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知[R/OL]. (2025-02-09)[2025-05-12]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7002959.htm.
NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION,

NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION. Notice on deepening the market-oriented reform of renewable energy feed-in tariffs and promoting high-quality development of renewable energy[R/OL]. (2025-02-09) [2025-05-12]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7002959.htm (in Chinese)

[2] 国家能源局. 我国新型储能规模2030年将超3.7亿千瓦[EB/OL]. (2026-01-15) [2026-06-08]. https://www. nea. gov. cn/xxgk/xwfbd/202601/t20260115_495672.html.
NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION. China's new energy storage capacity will exceed 370 GW by 2030[EB/OL]. (2026-01-15) [2026-06-08]. https://www. nea. gov. cn/xxgk/xwfbd/202601/t20260115_495672.html (in Chinese).

[3] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191 (in Chinese).

[4] 鲁明芳, 李咸善, 李飞, 等. 基于双层博弈优化的光伏电站集群储能租赁配置策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5887-5898.
LU M F, LI X S, LI F, et al. Strategy of energy storage leasing configuration of photovoltaic power station cluster based on bi-level game optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (16): 5887-5898 (in Chinese).

[5] 江岳文, 郑晨昕. 风电场群联合共享储能两阶段协同并网优化[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3426-3439.
JIANG Y W, ZHENG C X. Two-stage operation optimization for grid-connected wind farm cluster with shared energy storage[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3426-3439 (in Chinese).

[6] 杜锡力, 李笑竹, 陈来军, 等. 面向多场景调节需求的集中式共享储能鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5911-5921.
DU X L, LI X Z, CHEN L J, et al. Robust and optimized configuration of centralized shared energy storage for multi-scenario regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5911-5921 (in Chinese).

[7] PEI N, SONG X L, ZHANG Z, et al. Optimizing the operation and allocating the cost of shared energy storage for multiple renewable energy stations in power generation side[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 302: 118148.

[8] JU L W, BAI X P, LI G, et al. Two-stage robust transaction optimization model and benefit allocation strategy for new energy power stations with shared energy storage considering green certificate and virtual energy storage mode[J]. Applied Energy, 2024, 362: 122996.

[9] SONG X L, WU H, ZHANG J L, et al. Optimal operation of shared energy storage-assisted wind-solar-thermal power generation systems under the electricity-carbon markets[J]. Energy, 2025, 330: 136614.

[10] 王再闯, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于合作博弈的产销者社区分布式光伏与共享储能容量优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5922-5932.
WANG Z C, CHEN L J, LI X Z, et al. Capacity optimization of distributed PV and shared energy storage of prosumer community based on cooperative game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5922-5932 (in Chinese).

[11] 田欣, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于主从博弈和改进Shapley值的分布式光伏社区共享储能优化运行策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2252-2261.
TIAN X, CHEN L J, LI X Z, et al. Optimal scheduling for energy storage sharing among communities with photovoltaic resource based on Stackelberg game and improved Shapley value[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2252-2261 (in Chinese).

[12] DORAHKI S, AMJADY N, MUYEEN S M. An adaptive bi-level optimization model for market integration of community energy storage in local trading and upstream energy and regulation services[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 123: 116715.

[13] XUE S Z, WANG Y C, LIU Y, et al. Bi-level optimization and Stackelberg game in multi-integrated energy systems[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 111: 115356.

[14] WANG W J, LIANG Y H, CI T J, et al. Operational optimization of shared energy storage configuration in village-level distribution networks considering self-balancing capability[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 141: 119385.

[15] 陈来军, 梅生伟, 王斌, 等. 火电耦合压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7264-7276.
CHEN L J, MEI S W, WANG B, et al. An overview and outlook on thermal power unit coupled with compressed air energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7264-7276 (in Chinese).

[16] ZHANG X J, GAO Z Y, ZHOU B Q, et al. Advanced compressed air energy storage systems: Fundamentals and applications[J]. Engineering, 2024, 34: 246-269.

[17] 葛鑫博, 黄俊, 赵同彬, 等. 基于知识图谱的地下压缩空气储能研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 80-103.
GE X B, HUANG J, ZHAO T B, et al. Research progress of underground compressed air energy storage based on knowledge graph[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 80-103 (in Chinese).

[18] 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): 2149-2192.
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress of energy storage technologies in China in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192 (in Chinese).

[19] 李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (18): 5392-5404.
LI Y W, MIAO S H, YIN B X, et al. Optimal dispatch strategy of power system considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5392-5404 (in Chinese).

[20] BAI J, WEI W, CHEN L, MEI S. Rolling-horizon dispatch of advanced adiabatic compressed air energy storage based energy hub via data-driven stochastic dynamic programming[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114322.

[21] LI Y, YAO F, ZHANG S, et al. An optimal dispatch model of adiabatic compressed air energy storage system considering its temperature dynamic behavior for combined cooling, heating and power microgrid dispatch[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104366.

[22] CUI S, CHEN L, CHEN S, et al. Dynamic modeling and analysis of compressed air energy storage for multi-scenario regulation requirements[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100: 113227.

[23] GARMROODI A D, NASIRI F, HAGHIGHAT F. Optimal dispatch of an energy hub with compressed air energy storage: A safe reinforcement learning approach[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106147.

[24] 李咸善, 胡家旗, 张远航, 等. 风光水储联合体多时间尺度市场化运营调度策略[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-17[2025-05-12].
LI X S, HU J Q, ZHANG Y H, et al. Optimal scheduling strategy for joint operation of wind-solar-water-storage consortium participating in power market under multiple time scales[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-17[2025-05-12] (in Chinese).

[25] WU Y, ZHAO X, YANG L, et al. Research on the optimal economic proportion of medium- and long-term contracts and spot trading under the market-oriented renewable energy context [J]. Energies, 2025, 18(23): 6085.

[26] WANG P, WANG W, JIANG K, et al. Modeling the coupling of China's multi-timescale electricity markets during the transition towards decarbonization and marketization[J]. Energy, 2025, 319: 134938.

附录A

下层联合市场出清模型KKT条件及单层化推导给定上层AA-CAES租赁报价、共享服务开放容量、充放电计划及调频申报容量后，下层联合市场出清模型的目标函数如正文式(20)-(21)所示，约束条件如正文式(1)、式(2)、式(22)- (24)以及式(27)- (32)所示。

令$\alpha_{i,t}$和λ_t^E分别为新能源电量分配等式和系统电能量平衡等式的对偶变量，二者均为自由变量。令$\omega_{i,t}$、$\gamma_{j,t}$、$\eta_{i,t}^{\mathrm{b}}$分别为新能源履约约束、共享服务开放容量约束和履约补购功率上限约束的非负对偶变量。令$\beta_{g,t}^{U}$、$\beta_{g,t}^{L}$为火电出力上、下限约束的非负对偶变量；$\tau_{g,t}^{U}$、$\tau_{g,t}^{D}$为火电出力与上、下调频容量耦合约束的非负对偶变量；$\theta_{g,t}^{RU}$、$\theta_{g,t}^{RD}$为火电上、下爬坡约束的非负对偶变量。令$\eta_{j,t}^{\mathrm{up}}$、$\eta_{j,t}^{\mathrm{dn}}$为AA-CAES上、下调频成交容量上限的非负对偶变量，ρ_t^{up}、ρ_t^{dn}为系统上、下调频需求约束的非负对偶变量。

新能源直接上网、代储充电、弃电、履约补购、履约缺额、火电调频、AA-CAES调频及系统外购电等非负变量的下界对偶变量分别记为$\mu_{i,t}^{\mathrm{dir}}$、$\mu_{ij,t}^{\mathrm{sh}}$、$\mu_{i,t}^{\mathrm{cur}}$、$\mu_{i,t}^{\mathrm{b}}$、$\mu_{i,t}^{\mathrm{de}}$、$\mu_{g,t}^{\mathrm{up}}$、$\mu_{g,t}^{\mathrm{dn}}$、$\mu_{j,t}^{\mathrm{up}}$、$\mu_{j,t}^{\mathrm{dn}}$及μ_t^{et}。

为简化表述，将正文中各约束左端减右端记为h或g，其中h表示等式约束，g表示不等式约束。下层联合市场出清模型的拉格朗日函数为：

$$\begin{aligned}L = {} & F^{M} + \sum_{t,i}\alpha_{i,t}h_{i,t}^{RE} + \sum_{t}\lambda_t^{E}h_t^{E} + \sum_{t,i}\omega_{i,t}g_{i,t}^{\mathrm{mlt}} + \sum_{t,j}\gamma_{j,t}g_{j,t}^{\mathrm{sh}} \\ & + \sum_{t,i}\eta_{i,t}^{\mathrm{b}}g_{i,t}^{\mathrm{b}} + \sum_{t,g}\left(\beta_{g,t}^{U}g_{g,t}^{U} + \beta_{g,t}^{L}g_{g,t}^{L} + \tau_{g,t}^{U}g_{g,t}^{f} + \tau_{g,t}^{D}g_{g,t}^{D}\right) \\ & + \sum_{t=2}^{T}\sum_{g}\left(\theta_{g,t}^{RU}g_{g,t}^{RU} + \theta_{g,t}^{RD}g_{g,t}^{RD}\right) + \sum_{t,j}\left(\eta_{j,t}^{\mathrm{up}}g_{j,t}^{\mathrm{up}} + \eta_{j,t}^{\mathrm{dn}}g_{j,t}^{\mathrm{dn}}\right)n \\ & + \sum_{t}\left(\rho_t^{\mathrm{up}}g_t^{\mathrm{req,up}} + \rho_t^{\mathrm{dn}}g_t^{\mathrm{req,dn}}\right) - \mu^{T}y\end{aligned} \tag{A.1}$$

式中，y为所有具有非负下界的下层原始变量构成的向量。

其中，主要约束残差的具体表达如式(A.2)所示：

$$\begin{cases}h_{i,t}^{\mathrm{RE}} = P_{i,t}^{\mathrm{dir}} + \sum_{j}P_{ij,t}^{\mathrm{sh,c}} + P_{i,t}^{\mathrm{cur}} - \hat{P}_{i,t}^{\mathrm{RE}} \\ h_t^{E} = \sum_{g}P_{g,t}^{\mathrm{th}} + \sum_{i}\left(\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{RE}} - P_{i,t}^{\mathrm{cur}}\right) + \sum_{j}P_{j,t}^{\mathrm{d}} + P_t^{\mathrm{et}} - P_{L,t} - \sum_{j}P_{j,t}^{\mathrm{c}} \\ g_{i,t}^{\mathrm{mlt}} = P_{i,t}^{\mathrm{mlt}} - P_{i,t}^{\mathrm{dir}} - \sum_{j}P_{ij,t}^{\mathrm{sh,d}} - P_{i,t}^{\mathrm{b}} - P_{i,t}^{\mathrm{de}} \\ g_{j,t}^{\mathrm{sh}} = \sum_{i}P_{ij,t}^{\mathrm{sh,c}} - \bar{P}_{j,t}^{\mathrm{sh}} \\ g_{i,t}^{\mathrm{b}} = P_{i,t}^{\mathrm{b}} - \bar{P}_{i,t}^{\mathrm{b}}\end{cases} \tag{A.2}$$

其余g分别对应正文式(27)-(32)中的火电出力、调频容量、爬坡、AA-CAES调频成交容量及系统调频需求约束。

根据KKT最优性条件，对下层原始变量求偏导，得到驻点条件：

其中，在$2 \leqslant t \leqslant T-1$时，火电爬坡约束对当前时段的火电出力影响如式(A.4)所示：

$$\Gamma_{g,t}^{\mathrm{ramp}} = \theta_{g,t}^{RU} - \theta_{g,t}^{RD} - \theta_{g,t+1}^{RU} + \theta_{g,t+1}^{RD}. \tag{A.4}$$

下层问题还需满足正文所列原始可行条件、各不等式对偶变量非负条件及各原始变量下界对偶变量非负条件。其典型互补松弛条件如式(A.5)所示：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\mathrm{dir}}} = \alpha_{i,t} - \omega_{i,t} - \mu_{i,t}^{\mathrm{dir}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_{ij,t}^{\mathrm{sh,c}}} = \left(\rho_{j,t}^{\mathrm{sh}} + c_{ij}^{\mathrm{tr}}\right)\Delta t + \alpha_{i,t} + \gamma_{j,t} - \mu_{ij,t}^{\mathrm{sh}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\mathrm{cur}}} = c_i^{\mathrm{cr}}\Delta t + \alpha_{i,t} - \lambda_t^{E} - \mu_{i,t}^{\mathrm{cur}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\mathrm{b}}} = \lambda_t^{e}\Delta t - \omega_{i,t} + \eta_{i,t}^{\mathrm{b}} - \mu_{i,t}^{\mathrm{b}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_{i,t}^{\mathrm{de}}} = c_i^{\mathrm{de}}\Delta t - \omega_{i,t} - \mu_{i,t}^{\mathrm{de}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_{g,t}^{\mathrm{th}}} = c_g^{\mathrm{th}}\Delta t + \lambda_t^{E} + \beta_{g,t}^{U} - \beta_{g,t}^{L} + \tau_{g,t}^{U} - \tau_{g,t}^{D} + \Gamma_{g,t}^{\mathrm{ramp}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial R_{g,t}^{\mathrm{up}}} = c_g^{\mathrm{up}}\Delta t + \tau_{g,t}^{U} - \rho_t^{\mathrm{up}} - \mu_{g,t}^{\mathrm{up}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial R_{g,t}^{\mathrm{dn}}} = c_g^{\mathrm{dn}}\Delta t + \tau_{g,t}^{D} - \rho_t^{\mathrm{dn}} - \mu_{g,t}^{\mathrm{dn}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial R_{j,t}^{\mathrm{up}}} = \lambda_t^{\mathrm{up}}\Delta t + \eta_{j,t}^{\mathrm{up}} - \rho_t^{\mathrm{up}} - \mu_{j,t}^{\mathrm{up}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial R_{j,t}^{\mathrm{dn}}} = \lambda_t^{\mathrm{dn}}\Delta t + \eta_{j,t}^{\mathrm{dn}} - \rho_t^{\mathrm{dn}} - \mu_{j,t}^{\mathrm{dn}} = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial P_t^{\mathrm{et}}} = \lambda_t^{\mathrm{et}}\Delta t + \lambda_t^{E} - \mu_t^{\mathrm{et}} = 0\end{cases} \tag{A.3}$$

$$\begin{cases}0 \leqslant \omega_{i,t} \perp P_{i,t}^{\mathrm{dir}} + \sum_{j}P_{ij,t}^{\mathrm{sh,d}} + P_{i,t}^{\mathrm{b}} + P_{i,t}^{\mathrm{de}} - P_{i,t}^{\mathrm{mlt}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \gamma_{j,t} \perp \bar{P}_{j,t}^{\mathrm{sh}} - \sum_{i}P_{ij,t}^{\mathrm{sh,c}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \eta_{i,t}^{\mathrm{b}} \perp \bar{P}_{i,t}^{\mathrm{b}} - P_{i,t}^{\mathrm{b}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \tau_{g,t}^{U} \perp \bar{P}_{g}^{\mathrm{th}} - P_{g,t}^{\mathrm{th}} - R_{g,t}^{\mathrm{up}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \tau_{g,t}^{D} \perp P_{g,t}^{\mathrm{th}} - R_{g,t}^{\mathrm{dn}} - \underline{P}_{g}^{\mathrm{th}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \rho_t^{\mathrm{up}} \perp \sum_{g}R_{g,t}^{\mathrm{up}} + \sum_{j}R_{j,t}^{\mathrm{up}} - F_t^{\mathrm{up}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \rho_t^{\mathrm{dn}} \perp \sum_{g}R_{g,t}^{\mathrm{dn}} + \sum_{j}R_{j,t}^{\mathrm{dn}} - F_t^{\mathrm{dn}} \geqslant 0 \\ 0 \leqslant \mu_l \perp y_l \geqslant 0\end{cases} \tag{A.5}$$

由于式(A.5)含有连续变量乘积，不能直接由混合整数线性规划求解器处理。对于任意一组互补变量$0 \leqslant x_k \perp y_k \geqslant 0$，引入二进制变量，采用Big-M方法进行线性化：

$$\begin{cases}0 \leqslant x_k \leqslant M_k^{x}z_k \\ 0 \leqslant y_k \leqslant M_k^{y}(1 - z_k) \\ z_k \in \{0,1\}\end{cases} \tag{A.6}$$

式中，M_k^{x}和M_k^{y}分别为互补变量的充分大上界。当$z_k = 0$时，$x_k = 0$；当$z_k = 1$时，$y_k = 0$，从而保证式(A.6)的互补关系成立。各松弛量上界依据新能源预测出力、履约补购上限、火电机组容量、爬坡限值和AA-CAES调频申报容量等物理边界确定。