

# 考虑合作博弈的风-光-液态空气储能集群日前市场 不确定性优化方法研究

晏才鑫, 裘智峰, 王春生<sup>†</sup>

(中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 风光储集群既可以发挥风光发电时空互补性, 同时, 储能又能平抑系统波动, 这些优势使得风光储集群越来越多的集成到电网中. 然而, 集群内风光的波动性, 集群外市场电价、系统负荷的不确定性, 都给集群可靠和经济运行带来了挑战. 针对这些问题, 本文提出了一种考虑多重不确定性, 基于合作博弈的风-光-液态空气储能集群优化方法. 首先, 文章建立了基于合作博弈的集群分配模型, 设计了集群各参与者的多种合作方式和收益分配方案; 其次, 针对风、光、日前市场电价以及负荷不确定性风险约束, 本文建立了基于信息间隙决策理论的风险规避型和机会寻求型两类集群运营商的优化运行模型. 最后, 仿真结果表明, 相较于独立运行, 基于合作博弈的集群运行增加了总收益和个体收益. 构建的可适应两种偏好的最优购电及能源调度方案兼顾鲁棒性和经济性, 可为集群运营商进行集群能量管理提供参考依据.

**关键词:** 风光储集群; 合作博弈; 信息间隙决策理论; 不确定优化; 能量管理

**引用格式:** 晏才鑫, 裘智峰, 王春生. 考虑合作博弈的风-光-液态空气储能集群日前市场不确定性优化方法研究. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 2028 – 2038

DOI: 10.7641/CTA.2022.10668

## Uncertain optimization of wind-photovoltaic-liquid air energy storage cluster based on cooperative game in day-ahead market

YAN Cai-xin, QIU Zhi-feng, WANG Chun-sheng<sup>†</sup>

(School of Automation, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** The spatial-temporal complementarity of wind-photovoltaic power generation can be realized in the wind-photovoltaic energy storage cluster, and the system fluctuation through energy storage can be stabilized, which make the cluster to be integrated into grid increasingly. However, there are many challenges about the reliable and economic operation of clusters, due to the fluctuation from wind-photovoltaic power energy inside cluster as well as the uncertainty of market prices and load demand outside cluster. To this end, a wind-photovoltaic-liquid air energy storage cluster optimization method based on the cooperative game considering multi-uncertainty is proposed in this paper. Firstly, by designing a cluster allocation model based on the cooperative game, the various cooperation modes and income distribution strategies between cluster participants are designed, and afterwards rationality of the model is discussed. Secondly, based on the information gap decision theory (IGDT), the optimization operation models for two type cluster market operators, i.e., risk aversion vs. opportunity seeking, are established, taking full consideration of the risk constraints of wind energy, photovoltaic energy, day-ahead market electricity price and load uncertainty. Finally, the simulation results show that the cluster model based on the cooperative game improves the total and individual income of the cluster, compared with the cluster independent operation. The proposed optimal power purchase and energy scheduling strategies, which can adapt to the two preferences, takes into account the robustness and economy, and provides a reference for cluster operators to manage cluster energy.

**Key words:** wind-photovoltaic-energy storage cluster; cooperative game; information gap decision theory; uncertain optimization; energy management

**Citation:** YAN Caixin, QIU Zhifeng, WANG Chunsheng. Uncertain optimization of wind-photovoltaic-liquid air energy storage cluster based on cooperative game in day-ahead market. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(11): 2028 – 2038

收稿日期: 2021-07-25; 录用日期: 2022-05-17.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: wangcsu@csu.edu.cn; Tel.: +86 731-88830200.

本文责任编辑: 张潮海.

国家自然科学基金项目(61973322, 62073345)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61973322, 62073345).

## 1 引言

2020年9月,我国提出“双碳”目标<sup>[1-2]</sup>.在电力方面,以风能、光能等新能源为主体的新型电力系统成为减排重要推手<sup>[3-4]</sup>.截至2020年,我国的风电装机为281.65 GW,光伏装机为253.56 GW,装机量世界第一<sup>[5]</sup>.2021年上半年,风力、光伏的总发电量分别为3441.8亿、1576.4亿千瓦时,占我国一次发电总发电量12.96%,比2020年同期增加4.59%<sup>[6]</sup>.然而,也存在风光消纳率不高、弃风弃光较严重现状<sup>[7-8]</sup>.2021年10月,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,明确指出“推动开展可再生能源与储能领域科研合作和技术交流,积极发展‘新能源+储能’,加快构建清洁低碳安全高效的能源体系”<sup>[9]</sup>.风光发电系统与大规模储能系统组成的风光储集群能够充分利用风力和光伏发电的时空互补性,通过储能又可以平抑系统波动,成为促进风光消纳的一种有效新能源利用综合体<sup>[10-11]</sup>,已取得了较好的应用<sup>[12-16]</sup>.相较于其他储能方式<sup>[17-19]</sup>,液态空气储能(liquid air energy storage, LAES)<sup>[20]</sup>作为一种将液态空气为储能介质的储能技术,以其无污染、高储能密度以及建造不受限的特性,可推动构建清洁低碳的风光储集群.

在风-光-液态空气储能集群中,科学合理对集群中各系统进行协同优化,不仅是集群稳定可靠运行的基本保障,也是推动风光装机容量稳步增加的重要条件<sup>[21]</sup>.针对集群各利益主体的物理特性和利益最大化诉求,协同优化可以降低集群接入系统和电力市场环境中的不稳定<sup>[22-23]</sup>.博弈论<sup>[24-26]</sup>通过处理系统各参与者之间的关系和行为,求解模型均衡策略,常被用来分析各利益主体收益分配方案,决定各利益主体的运行方式.如文献[27]采用非合作博弈研究风光系统与配电网的市场交易问题.文献[28]通过主从博弈解决风光储集群的优化配置问题.文献[29]运用合作博弈思想分析风光储集群的虚拟电厂和配电网的收益分配问题.文献[30]同样运用合作博弈思想对风光储集群进行收益模型建模,然后,通过粒子群算法求解协同优化模型.综上,上述研究工作主要是基于确定性模型研究系统的调度策略,较少考虑系统中不确定性带来的影响.

风光系统发电的不确定性使风光储集群并网时增加电网运行的复杂性,对电力系统稳定运行带来一定的挑战.因此,在风光储集群的运行优化策略中必须合理的处理不确定性.已有文献对风光储集群运行优化问题中不确定性影响进行了研究.文献[31]运用条件风险价值仅对负荷不确定性进行建模,讨论负荷不确定性风险下风光储集群的调度优化策略.文献[32]运用鲁棒优化仅对风电不确定性进行建模.还有一部分研究对多种不确定参数进行建模,如针对风光两种

不确定性,文献[33-34]运用场景法进行建模.文献[35]运用随机规划法针对风光发电和负荷的不确定性进行风光储集群的储能容量协同优化.以上研究工作仅对单一趋势下不确定性风光储系统的运行优化进行研究,只考虑了收益增加或者最差收益的一种情况.另外,除风光、负荷不确定性之外,还需考虑日前市场电价的不确定性.日前市场电价的不确定意味着集群对接入电网运营商的报价策略是不确定的,将导致无法制定准确的资金预算,从而降低资金利用效率.不同的日前市场电价可能会影响集群供电计划,改变特定设备的开关状态,从而影响自调度运行.因此,有必要根据包括日前市场电价在内的参数变化对集群系统收益的影响,制定足够的能源调度策略,这将有助于提高集群系统的稳定性和抵御资金风险的能力.

针对上述问题,本文提出一种考虑日前市场电价波动情况下,基于合作博弈的风-光-液态空气储能集群优化方法.首先,针对一类包括风力发电、光伏发电、液态空气储能系统的风-光-液态空气储能集群,建立了风-光-液态空气储能集群工作机制模型.然后,考虑其设备的出力约束,通过建立基于合作博弈的集群分配模型设计了集群各参与者的多种合作方式和收益分配方案,讨论模型的合理性.最后,针对风、光、日前市场电价以及负荷不确定性风险约束,建立基于信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)的风险规避型和机会寻求型两类集群运营商的优化策略.

## 2 风-光-液态空气储能集群运行机制

本文所提风-光-液态空气储能集群包括 $N_1$ 个风力发电系统、 $N_2$ 个光伏发电系统和 $M$ 个液态空气储能系统.风、光伏发电系统均需配置液态空气储能系统,以便消纳风能、光能,提供能源服务.值得一提的是,集群中液态空气储能系统仅与风、光伏发电系统以及电负荷需求相连.也就是说,液态空气储能系统的储能来源仅包括风、光伏发电系统,不包括大电网.文献[36]提到,风光在电网中发电量的高占比会影响电网稳定性.其结果显示,在风光出力占比25%以内时,电网频率偏差在国标规定范围内.在本文中,假设风光并网能量比例在25%以内,即不影响电网稳定性和电网调度稳定性的前提条件下进行讨论.风-光-液态空气储能集群运行结构图如图1所示.其中,任意 $u_i$ 个风力发电系统、 $v_i$ 个光伏发电系统( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ )和1个液态空气储能系统组成联盟,一共 $M$ 个联盟.

风-光-液态空气储能集群的运行机制如图2所示. $E_t$ 表示集群在时间段 $t$ 的风、光伏发电系统总发电; $E_{t,LAES}$ 表示集群液态空气储能系统在时间段 $t$ 的总释能; $E_{t,load}$ 表示集群在时间段 $t$ 的电负荷需求.

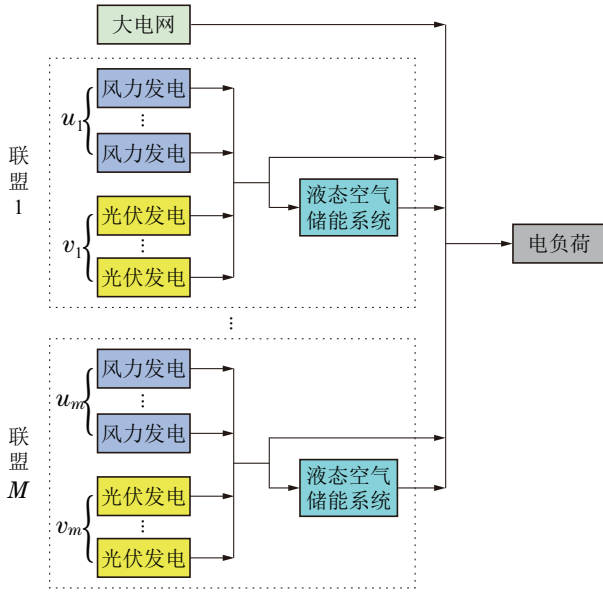


图1 风-光-液态空气储能集群运行结构图

Fig. 1 Framework of wind-photovoltaic-liquid air energy storage cluster

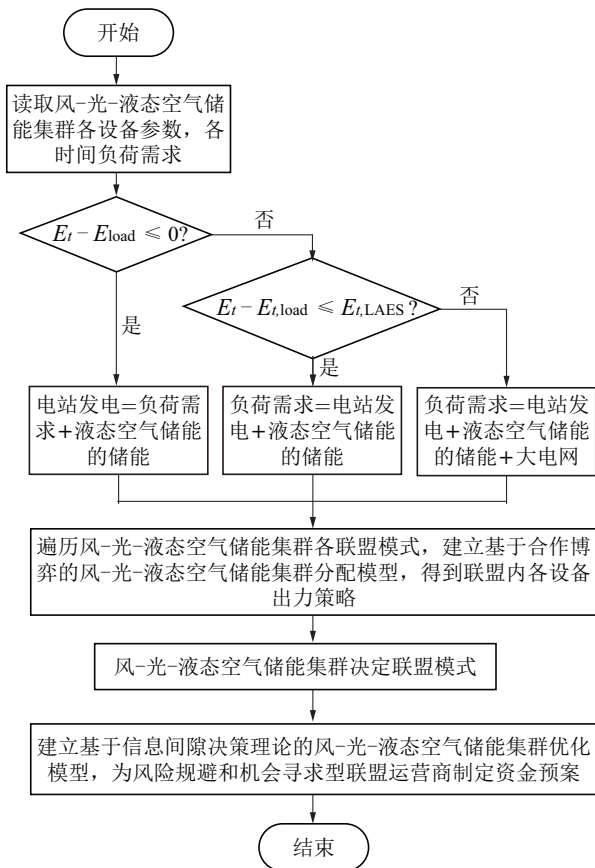


图2 风-光-液态空气储能集群运行机制流程

Fig. 2 The operation mechanism of wind-photovoltaic-liquid air energy storage cluster

### 3 基于合作博弈的风-光-液态空气储能集群分配模型

合作博弈是指参与者通过执行强制约束协议使得

联盟的收益最优的一种博弈类型。风、光等多个发电系统与液态空气储能系统之间进行耦合，液态空气储能系统通过调度整个风光互补发电系统，可实现能源的统一调度，提高电能调度灵活性。

#### 3.1 合作博弈相关概念

在本文中，考虑所提风-光-液态空气储能集群，合作博弈相关概念解释如下。

##### 3.1.1 参与者

符合完全理性假设的决策主体定义为参与者。本文所提集群联盟参与者包括光伏电站PV1、光伏电站PV2、风电场WT1，表示为  $N = \{1, 2, 3\}$ 。参与者参与的联盟结构包括  $\{\{1\}, \{2\}, \{3\}\}$ 。

##### 3.1.2 边际贡献

参与者PV1, PV2, WT1在联盟结构  $\Phi$  的边际贡献分别表示为  $MC_1(\Phi)$ ,  $MC_2(\Phi)$ ,  $MC_3(\Phi)$ 。其具体定义如下：

$$MC_1(\Phi) = v(\Phi) - v(\Phi \setminus 1), \quad (1)$$

$$MC_2(\Phi) = v(\Phi) - v(\Phi \setminus 2), \quad (2)$$

$$MC_3(\Phi) = v(\Phi) - v(\Phi \setminus 3), \quad (3)$$

其中： $v(\Phi)$ 表示联盟  $\Phi$  的参与者合作产生的收益； $v(\Phi \setminus 1)$ 表示联盟  $\Phi$  除去参与者PV1之后合作产生的收益； $v(\Phi \setminus 2)$ 表示联盟  $\Phi$  除去参与者PV2之后合作产生的收益； $v(\Phi \setminus 3)$ 表示联盟  $\Phi$  除去参与者WT1之后合作产生的收益。

##### 3.1.3 个体理性

在本文中，个体理性即为合作后参与者PV1, PV2, WT1分配所得收益不得低于各自独立运行时的收益。具体公式如下：

$$x(1) \geq v(\{1\}), \quad (4)$$

$$x(2) \geq v(\{2\}), \quad (5)$$

$$x(3) \geq v(\{3\}), \quad (6)$$

其中： $x(1), x(2), x(3)$ 分别表示对参与者PV1, PV2, WT1分配所得收益；对参与者PV1, PV2, WT1独立运行时所得收益分别表示为  $v(\{1\}), v(\{2\}), v(\{3\})$ 。

##### 3.1.4 整体理性

在本文中，整体理性定义为参与者PV1, PV2, WT1分配所得收益之和大于等于总联盟  $\{1, 2, 3\}$  收益。具体公式表示为式(7)，即

$$x(1) + x(2) + x(3) \geq v(\{1, 2, 3\}). \quad (7)$$

#### 3.2 风-光-液态空气储能集群数学模型

本文所提风-光-液态空气储能集群包括风力发电、光伏发电和液态空气储能3种子系统。在集群独立运行和合作运行两种运行模式时，集群子系统呈现出

不同的框架. 建立集群独立运行和合作运行模型, 是集群进行调度和决策的基础.

### 3.2.1 液态空气储能系统出力模型

在LAES的储能阶段, 富余电力来自环境的空气净化、压缩、冷藏, 最终转移到低温储罐中; 在LAES释能阶段(即风、光等发电系统产生的电力不足时), 从低温储罐排出的液体空气被泵抽出、蒸发、膨胀发电.

在本文中, 将液态空气储能流程看作储能、液态空气储存、低温泵抽出、释能4个过程. 式(8)表示在时间段 $t$ 液态空气储能系统中储存到低温储罐的电能. 式(9)表示在时间段 $t$ 低温泵抽出的液态空气. 液态空气储能系统在时间段 $t$ 放出的电能如式(10)所示. 液态空气储能系统的储能、释能最大约束如式(11)–(12)所示. 式(13)表示系统不能同时储能、释能. 模型方程如下表示:

$$E_{\text{ch-f}}(t) = \eta_{\text{ch}} \times E_{\text{ch}}(t), \quad (8)$$

$$E_{\text{Pump}}(t) = \eta_{\text{Pump}} \times E_{\text{dis}}(t), \quad (9)$$

$$E_{\text{dis-f}}(t) = \eta_{\text{dis}} \times E_{\text{Pump}}(t), \quad (10)$$

$$0 \leq E_{\text{ch}}(t) \leq E_{\text{ch}}^{\text{max}} \times x(t), \quad (11)$$

$$0 \leq E_{\text{dis}}(t) \leq E_{\text{dis}}^{\text{max}} \times y(t), \quad (12)$$

$$x(t) + y(t) \leq 1, \quad (13)$$

其中:  $\eta_{\text{ch}}$ 表示液态空气储能系统的储能效率;  $\eta_{\text{Pump}}$ 表示低温储泵的抽气效率;  $\eta_{\text{dis}}$ 表示液态空气储能系统的释能效率;  $E_{\text{ch-f}}(t)$ 表示储存到低温储罐的电能;  $E_{\text{dis}}(t)$ 表示从低温储罐抽出的电能;  $x(t)$ 和 $y(t)$ 为二进制数.

低温储罐在时间段 $t$ 储存的能源如式(14)所示. 考虑到在储能、释能过程中, 系统存在能源损耗的因素, 式(15)表示LAES在时间段 $t$ 损失的能源. 模型方程如下表示:

$$\begin{aligned} \text{Eng}^{\text{LAES}}(t) = & \text{Eng}^{\text{LAES}}(t-1) + E_{\text{ch-f}}(t) - \\ & E_{\text{dis}}(t) - \text{Eng}_{\text{loss}}^{\text{LAES}}(t), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{Eng}_{\text{loss}}^{\text{LAES}}(t) = \gamma_{\text{loss}}^{\text{E}} \text{Eng}^{\text{LAES}}(t), \quad (15)$$

其中:  $\text{Eng}^{\text{LAES}}(t)$ 表示低温储罐储存的能源;  $\text{Eng}_{\text{loss}}^{\text{LAES}}(t)$ 表示储能系统损失的能源;  $\gamma_{\text{loss}}^{\text{E}}$ 表示储能系统的能源损失比.

### 3.2.2 集群独立运行模型

风、光等多个发电系统独立运行时, 独立完成需求目标. 这导致博弈问题为多个独立优化问题, 风力发电 $E_{\text{WT}}$ 、光伏发电 $E_{\text{PV}}$ 单独提供电负荷需求, 分别有液态空气储能系统 $E_{\text{dis-f}}$ 作为储能单元, 即风储电站、光储电站单独提供负荷需求. 当风储电站、光储电站供电不足时, 电网作为补充提供电负荷需求.

独立运行时, 系统功率平衡公式如下:

$$E_{\text{PV}}(t) = E_{\text{load}}^{\text{PV}}(t) + E_{\text{ch}}^{\text{PV}}(t), \quad (16)$$

$$E_{\text{WT}}(t) = E_{\text{load}}^{\text{WT}}(t) + E_{\text{ch}}^{\text{WT}}(t), \quad (17)$$

$$E_{\text{load}}(t) = E_{\text{load}}^{\text{PV}}(t) + E_{\text{load}}^{\text{WT}}(t) + E_{\text{dis-f}}^{\text{PV}}(t) + E_{\text{Gid}}(t) + E_{\text{dis-f}}^{\text{WT}}(t). \quad (18)$$

风、光等多个发电系统在时间段 $t$ 的收益的模型方程如下表示:

$$C_{\text{WT}}(t) = E_{\text{dis-f}}^{\text{WT}}(t) \text{Pr}(t) + E_{\text{load}}^{\text{WT}}(t) \text{Pr}(t) - C_{\text{m}}^{\text{WT}}(t), \quad (19)$$

$$C_{\text{m}}^{\text{WT}}(t) = \xi_{\text{oc}}^{\text{LAES}} (E_{\text{ch}}^{\text{WT}}(t) + E_{\text{dis}}^{\text{WT}}(t)) + \xi_{\text{oc}}^{\text{WT}} E_{\text{WT}}(t), \quad (20)$$

$$C_{\text{PV}}(t) = E_{\text{dis-f}}^{\text{PV}}(t) \text{Pr}(t) + E_{\text{load}}^{\text{PV}}(t) \text{Pr}(t) - C_{\text{m}}^{\text{PV}}(t), \quad (21)$$

$$C_{\text{m}}^{\text{PV}}(t) = \xi_{\text{oc}}^{\text{LAES}} (E_{\text{ch}}^{\text{PV}}(t) + E_{\text{dis}}^{\text{PV}}(t)) + \xi_{\text{oc}}^{\text{PV}} E_{\text{PV}}(t), \quad (22)$$

其中:  $C_{\text{WT}}(t)$ ,  $C_{\text{PV}}(t)$ 分别表示风、光等多个发电系统在独立运行时的时间段 $t$ 的收益;  $C_{\text{m}}^{\text{WT}}(t)$ ,  $C_{\text{m}}^{\text{PV}}(t)$ 分别表示风、光等多个发电系统在独立运行时的时间段 $t$ 的运行维护成本;  $\xi_{\text{oc}}^{\text{LAES}}$ 表示LAES的储能成本;  $\xi_{\text{oc}}^{\text{WT}}$ ,  $\xi_{\text{oc}}^{\text{PV}}$ 分别表示风、光等多个发电系统的发电成本;  $\text{Pr}(t)$ 表示时间段 $t$ 的电价.

### 3.2.3 集群合作运行模型

当合作运行时, 光伏发电 $E_{\text{PV}}$ 、风力发电 $E_{\text{WT}}$ 合作提供电负荷需求, 由液态空气储能系统 $E_{\text{dis-f}}$ 作为风光互补发电系统的唯一储能单元. 但合作供电不足时, 电网供电作为电负荷补充.

合作运行时, 系统功率平衡公式如下:

$$E_{\text{PV}}(t) + E_{\text{WT}}(t) = E_{\text{load}}^{\text{H}}(t) + E_{\text{ch}}(t), \quad (23)$$

$$E_{\text{load}}(t) = E_{\text{Grid}}(t) + E_{\text{load}}^{\text{H}}(t) + E_{\text{dis-f}}(t), \quad (24)$$

其中 $E_{\text{load}}^{\text{H}}(t)$ 表示风、光发电系统合作运行时在时间段 $t$ 供应的负荷.

风-光-液态空气储能集群合作运行时的收益公式如下所示:

$$\Gamma(t) = E_{\text{dis-f}}(t) \text{Pr}(t) + E_{\text{load}}^{\text{H}}(t) \text{Pr}(t) - C_{\text{m}}(t), \quad (25)$$

$$C_{\text{m}}(t) = \xi_{\text{oc}}^{\text{LAES}} (E_{\text{ch}}(t) + E_{\text{dis}}(t)) + \xi_{\text{oc}}^{\text{WT}} E_{\text{WT}}(t) + \xi_{\text{oc}}^{\text{PV}} E_{\text{PV}}(t), \quad (26)$$

其中 $\Gamma(t)$ 表示风-光-液态空气储能集群合作运行时在时间段 $t$ 的收益.

### 3.3 集群分配方案

#### 3.3.1 平均分配

参与者PV1, PV2, WT1合作运行下, 各参与者获得相同的收益分配. 具体公式如下:

$$x_1=x_2=x_3 = \frac{U_\Sigma}{3}, \quad (27)$$

其中:  $x_1, x_2, x_3$ 分别表示PV1, PV2, WT1平均分配方案下的收益;  $U_\Sigma$ 表示集群联盟整体收益.

#### 3.3.2 按容分配

按照参与者PV1, PV2, WT1各自在联盟中的装机容量进行收益分配. 具体公式如下:

$$x_1 = \frac{P_1^*}{P_1^* + P_2^* + P_3^*} U_\Sigma, \quad (28)$$

$$x_2 = \frac{P_2^*}{P_1^* + P_2^* + P_3^*} U_\Sigma, \quad (29)$$

$$x_3 = \frac{P_3^*}{P_1^* + P_2^* + P_3^*} U_\Sigma, \quad (30)$$

其中:  $x_1, x_2, x_3$ 分别表示PV1, PV2, WT1按容分配方案下的收益;  $P_1^*, P_2^*, P_3^*$ 分别表示参与者PV1, PV2, WT1的装机容量.

#### 3.3.3 基于Shapley值的集群分配方案

Shapley值<sup>[37]</sup>是合作博弈中常用的一种方法, 其根据各参与者在联盟的边际贡献率分配唯一数值. 在本文中, 采用Shapley值对风-光-液态空气储能系统各参与者的收益进行分配. 参与者*i*被分配的收益可表示为

$$x(i) = \sum_{\Phi \subset CN} \gamma(\Phi)(v(\Phi) - v(\Phi \setminus i)), \quad (31)$$

$$\gamma(\Phi) = \frac{(|\Phi| - 1)! (|N| - |\Phi|)!}{|N|!}, \quad (32)$$

其中:  $|\Phi|$ 表示联盟 $\Phi$ 包含的参与者数;  $\gamma(\Phi)$ 表示参与者*i*在联盟中的加权因子;  $\Phi \setminus i$ 表示去掉参与者*i*后联盟 $\Phi$ 的集合;  $v(\Phi) - v(\Phi \setminus i)$ 表示参与者*i*参与联盟 $\Phi$ 后的边际贡献.

### 4 基于IGDT的风-光-液态空气储能集群优化模型

信息间隙决策理论(IGDT)方法是一种考虑变量不确定性的有效区间优化操作方法. IGDT中模型分为鲁棒调度模型和机会调度模型. 当集群运营商陷入风、光、日前市场电价以及负荷不确定性信息时, 特别是风力和光伏的强不确定性给集群和电网调度带来较大误差时, 研究其不确定性给系统带来的影响具有理论和实际意义. IGDT通过定义风、光、日前市场电价以及负荷各不确定参数的最大波动范围, 在保障大电网的安全稳定运行前提下, 为风险规避型集群运营商和机会寻求型联盟运营商提供决策依据.

### 4.1 鲁棒调度模型

鲁棒调度模型是为希望承担更小经济风险的风险规避型集群运营商所考虑的. 对于风险规避型联盟运营商, 鲁棒参数 $\hat{\alpha}(R^a)$ 表示追求稳定收益, 求得可规避风险的最大不确定参数变化范围. 具体来说, 在本研究中,  $\hat{\alpha}(R^a)$ 是在联盟运行收益不小于给定的预期收益条件下, 求得集群可接受的各参数最差实现, 包括PV1, PV2, WT1, 负荷和日前市场电价. 其最差实现分别为:  $(1 - \alpha_{PV1})\hat{E}_{PV1}(t)$ ,  $(1 - \alpha_{PV2})\hat{E}_{PV2}(t)$ ,  $(1 - \alpha_{WT1})\hat{E}_{WT1}(t)$ ,  $(1 - \alpha_{load})\hat{E}_{load}(t)$ 和 $(1 - \alpha_{pr}) \times \hat{Pr}(t)$ . 鲁棒参数 $\hat{\alpha}(R^a)$ 具体由式(33)表示, 即

$$\hat{\alpha}(R^a) = \min(\alpha). \quad (33)$$

可通过式(34)求得集群最小不确定性 $\alpha$ 值, 鲁棒性问题可以用式(34)–(42)求解. 其中,  $R^a$ 为风险规避型集群运营商希望获得的稳定收益,  $R^{\max}$ 为由式(8)–(15)和式(23)–(26)根据预测数据计算出的预测最大收益.  $\chi$ 表示鲁棒调度模型的收益偏差因子.

$$\begin{cases} \hat{\alpha}(R^a) = \min \alpha, \\ \alpha = \alpha_{PV1} + \alpha_{PV2} + \alpha_{WT} + \alpha_{load} + \alpha_{Pr}, \end{cases} \quad (34)$$

$$\text{s.t. } \max \sum_{t=1}^{24} (E_{load}(t)Pr(t) + E_{dis-f}(t) \times$$

$$Pr(t) - \xi_{oc}^{PV} E_{PV}(t) - \xi_{oc}^{WT} E_{WT}(t) - \xi_{oc}^{LAES} E_{ch}(t) - \xi_{oc}^{LAES} E_{dis}(t)) \geq R^a, \quad (35)$$

$$R^a = (1 - \chi)R^{\max}, \quad (36)$$

$$E_{PV1}(t) \geq (1 - \alpha_{PV1})\hat{E}_{PV1}(t), \quad (37)$$

$$E_{PV2}(t) \geq (1 - \alpha_{PV2})\hat{E}_{PV2}(t), \quad (38)$$

$$E_{WT1}(t) \geq (1 - \alpha_{WT1})\hat{E}_{WT1}(t), \quad (39)$$

$$E_{load}(t) \geq (1 - \alpha_{load})\hat{E}_{load}(t), \quad (40)$$

$$Pr(t) \geq (1 - \alpha_{Pr})\hat{Pr}(t), \quad (41)$$

$$\text{式(8)–(15), 式(23)–(26)}. \quad (42)$$

### 4.2 机会调度模型

机会调度模型是为获取更大收益的机会寻求型集群运营商所考虑的. 对于机会寻求型集群运营商来说, 机会参数 $\hat{\beta}(R^t)$ 表示追求高额收益, 求得可追求风险的最小不确定参数变化范围. 具体来说, 在本研究中,  $\hat{\beta}(R^t)$ 是在集群运行收益不小于给定的预期收益条件下, 求得集群可接受的各参数最低实现, 包括PV1, PV2, WT1, 负荷和日前市场电价. 其最低实现分别为:  $(1 + \beta_{PV1})\hat{E}_{PV1}(t)$ ,  $(1 + \beta_{PV2})\hat{E}_{PV2}(t)$ ,  $(1 + \beta_{WT1})\hat{E}_{WT1}(t)$ ,  $(1 + \beta_{load})\hat{E}_{load}(t)$ 和 $(1 + \beta_{pr})\hat{Pr}(t)$ . 机会参数 $\hat{\beta}(R^t)$ 具体由式(43)表示, 即

$$\hat{\beta}(R^t) = \min(\beta). \quad (43)$$

可通过式(44)求得集群最小不确定性 $\beta$ 值, 机会性问题可以用式(44)–(52)求解. 其中,  $R^t$ 为机会寻求型

联盟运营商希望获得的最高收益。\$R^{\max}\$为由式(8)–(15)和式(23)–(26)根据预测数据计算出的预测最大收益。\$\delta\$表示机会调度模型的收益偏差因子。

$$\begin{cases} \widehat{\beta}(R^t) = \min \beta, \\ \beta = \beta_{PV1} + \beta_{PV2} + \beta_{WT} + \beta_{load} + \beta_{Pr}, \end{cases} \quad (44)$$

$$\text{s.t. } \max \sum_{t=1}^{24} (E_{load}(t)Pr(t) + E_{dis-f}(t) \times Pr(t) - \xi_{oc}^{PV} E_{PV}(t) - \xi_{oc}^{LAES} E_{ch}(t) - \xi_{oc}^{LAES} E_{dis}(t) - \xi_{oc}^{WT} E_{WT}(t)) \geq R^t, \quad (45)$$

$$R^t = (1 + \delta)R^{\max}, \quad (46)$$

$$E_{PV1}(t) \geq (1 + \beta_{PV1})\widehat{E}_{PV1}(t), \quad (47)$$

$$E_{PV2}(t) \geq (1 + \beta_{PV2})\widehat{E}_{PV2}(t), \quad (48)$$

$$E_{WT1}(t) \geq (1 + \beta_{WT1})\widehat{E}_{WT1}(t), \quad (49)$$

$$E_{load}(t) \geq (1 + \beta_{load})\widehat{E}_{load}(t), \quad (50)$$

$$Pr(t) \geq (1 + \beta_{Pr})\widehat{Pr}(t), \quad (51)$$

$$\text{式(8)–(15), 式(23)–(26)}. \quad (52)$$

## 5 算例结果与分析

本文考虑了一天內风-光-液态空气储能集群的运行情况,通过运用GAMS软件进行求解。其中,运用GAMS中的CPLEX求解器<sup>[38]</sup>求解基于合作博弈的风-光-液态空气储能集群分配模型,其属于混合整数规划(mixed integer programming, MIP)问题。运用GAMS中的DICOPT求解器<sup>[39]</sup>求解基于IGDT的风-光-液态空气储能集群优化模型,解决混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)问题。

### 5.1 算例参数

本文采用的参数如下:

本文以风-光-液态空气储能集群为算例进行分析。光伏电站PV1、光伏电站PV2、风电场WT1的装机容量分别为10 MW, 6 MW, 10 MW, 液态空气储能系统储能容量按照其发电端装机容量的50%进行配置。液态空气储能系统的储能效率为0.89, 低温泵工作效率为0.8, 释能效率为0.9, 能源损失为0.02, 运行成本为250元/(MW·h)。光伏和风力输电成本系数为100元/(MW·h)。假设联盟从电网的购电价格等于联盟售电价格。日前市场电价、风速、温度、光照、负荷数据均来源于文献[40]。值得一提的是,因为风力和光伏发电具有波动性、间歇性,所以存在“大装机小电量”现状,本文所提风力和光伏发电量占电网发电端总发电量比重小。并且,本文主要对象是风-光-液态空气储能集群,在短期内,风力和光伏出力的总量是相对稳定的。集群并网时,对电网频率的影响是有限的。因此,接下来本文讨论在并网稳定前提下,风-光-

液态空气储能集群的优化结果。

### 5.2 风光液态空气储能集群分配结果

根据计算,在求得风-光-液态空气储能集群联盟最小收益时,各参与者独立运行时的总收益为63469.641元,合作运行时的总收益为69035.710元,联盟总收益增加了5566.069元,即提高了8.770%。

合作运行时,根据平均分配、按容分配和Shapley值定义,可得到最小收益时, PV1, PV2, WT1各自的收益,如表1所示。

表 1 最小收益时各参与者收益

Table 1 Each participant income at minimum income

电站类别	平均分配/元	按容分配/元	Shapley值/元
PV1	23011.903	26552.196	20923.791
PV2	23011.903	15931.318	8315.842
WT1	23011.903	26552.196	39796.079

可以看出,在集群合作运行时,以平均分配和按容分配的分配方案, PV1和PV2的最小收益均有所增加,而WT1的收益均降低了。而基于Shapley值的分配方案下, PV1, PV2和WT1的最小收益均有所增加。PV1, PV2, WT1的最小收益相对于独立运行时分别增加了1450.330元、3851.708元、264.032元。PV1, PV2, WT1在{1, 2, 3}的联盟方式收益均有提高,并且有效提高了联盟总收益。

根据计算,在求得风-光-液态空气储能集群联盟最大收益时,各参与者独立运行时的总收益为120482.122元,合作运行时的总收益为120507.236元,集群在合作运行下总收益增加了25.112元,即提高了0.021%。

合作运行时,根据平均分配、按容分配和Shapley值定义,可得到最大收益时, PV1, PV2, WT1各自的收益如表2所示。可以看出,在集群合作运行时,以平均分配和按容分配的分配方案, PV1和PV2的最大收益均有所增加,而WT1的收益均降低了。而基于Shapley值的分配方案下, PV1, PV2, WT1的最大收益均有所增加。参与者PV1, PV2, WT1的最大收益相对于独立运行时分别增加了9.806元、7.650元、7.657元。因此,集群参与者更倾向于选择基于Shapley值的分配方式。且3个参与者在{1, 2, 3}的联盟方式最大和最小收益均有提高,并且有效提高了联盟总收益,其符合个体理性和整体理性。所以,本文所提出的风-光-液态空气储能集群联盟合作博弈有效。

### 5.3 基于IGDT的风-光-液态空气储能集群优化结果

在本文中,风-光-液态空气储能集群优化考虑在{1, 2, 3}的联盟方式下,风-光-液态空气储能集群取



得最大收益时的运行情况. 在IGDT中, 不考虑不确定因素的确定性模型, 即为 $\hat{\alpha}(R^a)=0, \hat{\beta}(R^t)=0$ .

表 2 最大收益时各参与者收益

Table 2 Each participant income at maximum income

电站	平均分配/元	按容分配/元	Shapley值/元
PV1	40169.07867	46348.93692	33476.12
PV2	40169.07867	27809.36215	20082.674
WT1	40169.07867	46348.93692	66948.442

本文引入随机规划 (stochastic programming, SP)<sup>[41]</sup>方法与IGDT确定性模型进行对比. SP和IGDT两种方法下集群的运行状态如图3-4所示. 图3表示集群中液态空气储能系统低温储罐的变化. 可以看出, SP方法下, 集群中液态空气储能系统主要在8:00进行储能, 11:00进行释能. IGDT下, 集群中液态空气储能系统在7:00和8:00时间段进入储能阶段, 随后在多个时间段进行释能, 主要在10:00和11:00两个时间段进行大规模的释能, 其进行储能、释能的电能较SP方法大. 图4表示集群从电网购买的电能变化. 可以看出, 集群各个时间段的购能策略均发生了变化. 在图3-4所示集群运行策略下, 集群在IGDT方法下比SP方法下总收益增加了497.550元.

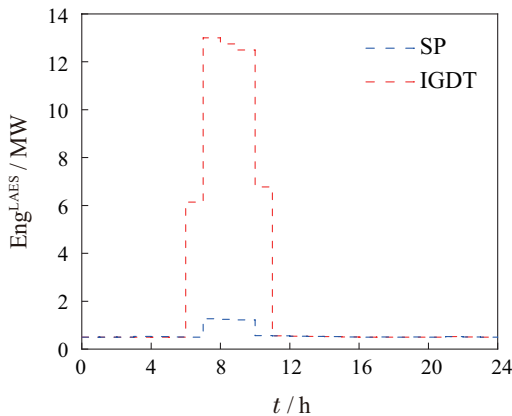


图 3 LAESI储存的电能

Fig. 3 The stored power of LAES

通过应用IGDT对集群中PV1, PV2, WT1, 负荷以及日前市场电价的不确定性进行研究, 利用鲁棒性函数为联盟运营商制定了一种风险规避预案, 以获得稳定的收益. 鲁棒性函数的结果通过求解 $\hat{\alpha}(R^a)$ 得到, 具体见式(33). 随着鲁棒性收益的变化,  $\hat{\alpha}(R^a)$ 的变化趋势如图5所示. 基于IGDT的风-光-液态空气储能集群鲁棒调度模型考虑的是计及集群中PV1, PV2和WT1等新能源发电以及日前市场电价的不确定性, 联盟在期望稳定收益下的运行策略. 需要说明的是, 本研究将鲁棒调度模型的各期望收益差设定为1200元. 从图5中可以看出, 在收益逐渐从确定性模型下预

测收益 $1.205 \times 10^5$ 元减小的情况下,  $\alpha$ 逐渐增加. 比如, 当联盟运营商的收益比预期收益低6000元, 即 $1.145 \times 10^5$ 元时, 集群运营商可接受的不确定性程度总和最大为1.694%. 而当联盟运营商的收益比预期收益低7200元, 即 $1.133 \times 10^5$ 元时, 集群运营商可接受的不确定性程度总和最大为2.058%, 增加了0.364%.

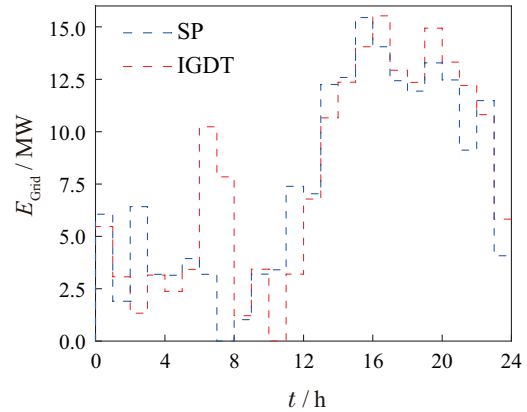


图 4 从电网购买的电能

Fig. 4 The purchased power from grid

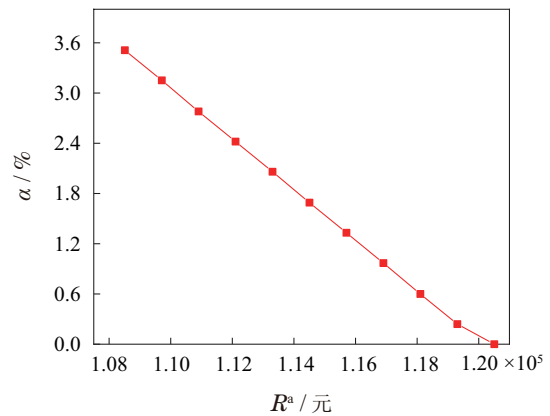


图 5 鲁棒参数

Fig. 5 Robustness parameter

不确定性程度总和包括集群中PV1, PV2, WT1, 负荷以及日前市场电价的不确定性程度. 在基于IGDT的风-光-液态空气储能集群鲁棒调度模型中, 其各参数不确定性程度如表3所示.

从表3可以看出, 在光伏PV1、光伏PV2、风力WT1、负荷和日前市场电价5个参数中, 鲁棒调度模型中可接受的最小不确定性程度来源是风力发电和日前市场电价. 随着期望稳定收益的减少, 联盟除了接受稳定的风力发电不确定性外, 可接受的日前市场电价不确定性逐渐增加.

基于IGDT的风-光-液态空气储能集群机会调度模型考虑的是计及光伏PV1、光伏PV2、风力WT1、负荷和日前市场电价不确定性, 联盟在期望高额收益下的运行策略. 机会性函数的结果通过求解 $\hat{\beta}(R^t)$ 得到, 具体见式(43). 随着期望高额收益的变化, 机会参

数  $\hat{\beta}(R^t)$  的变化趋势如图6所示. 机会调度模型各期望收益差也设定为1200元.

表 3 鲁棒调度模型各参数不确定性程度  
Table 3 Uncertainty degree of each parameter of the robustness model

期望稳定 收益/元	$(\alpha_{PV1}, \alpha_{PV2}, \alpha_{Pr})/\%$	$\alpha_{WT1}/\%$	$\alpha_{load}/\%$
$1.205 \times 10^5$	0	0	0
$1.193 \times 10^5$	0	0.071	0.167
$1.181 \times 10^5$	0	0.071	0.531
$1.169 \times 10^5$	0	0.071	0.895
$1.157 \times 10^5$	0	0.071	1.259
$1.145 \times 10^5$	0	0.071	1.623
$1.133 \times 10^5$	0	0.071	1.987
$1.121 \times 10^5$	0	0.071	2.351
$1.109 \times 10^5$	0	0.071	2.715
$1.097 \times 10^5$	0	0.071	3.079
$1.085 \times 10^5$	0	0.071	3.443

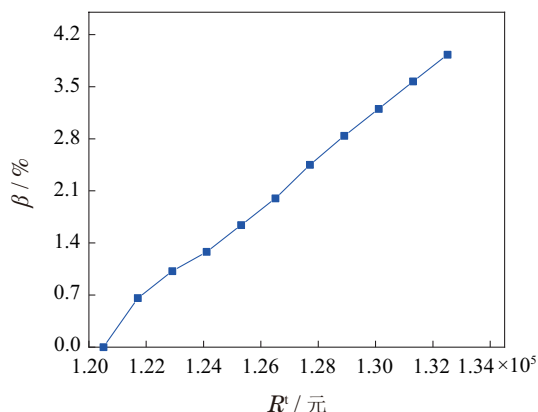


图 6 机会参数

Fig. 6 Opportunity parameter

从图 6 中可以看出, 在收益逐渐从预测收益  $1.205 \times 10^5$  元逐渐增加的情况下,  $\hat{\beta}(R^t)$  逐渐增加. 比如, 当联盟运营商的收益比预期收益高6000元, 即  $1.265 \times 10^5$  元时, 运营商可接受的日前市场电价可高预期电价2.003%. 而当联盟运营商的收益比预期收益高7200元, 即  $1.277 \times 10^5$  元时, 运营商可接受的日前市场电价可高预期电价2.446%, 增加了0.443%.

不确定性程度总和包括集群中PV1, PV2, WT1, 负荷以及日前市场电价的不确定性程度. 在基于IGDT的风-光-液态空气储能集群机会调度模型中, 其各参数不确定性程度如表4所示. 从表4可以看出, 在光伏PV1、光伏PV2、风力WT1、负荷和日前市场电价5个参数中, 机会调度模型中可接受的最小不确定性程度来源均来源于日前市场电价. 随着期望高额收益的增加, 集群可接受的日前市场电价不确定性逐渐增加.

表 4 机会调度模型各参数不确定性程度

Table 4 Uncertainty degree of each parameter of the opportunity model

期望高额 收益/元	$(\beta_{PV1}, \beta_{PV2}, \beta_{WT1}, \beta_{Pr})/\%$	$\beta_{load}/\%$
$1.205 \times 10^5$	0	0
$1.217 \times 10^5$	0	0.657
$1.229 \times 10^5$	0	1.021
$1.214 \times 10^5$	0	1.275
$1.253 \times 10^5$	0	1.639
$1.265 \times 10^5$	0	2.003
$1.277 \times 10^5$	0	2.446
$1.289 \times 10^5$	0	2.840
$1.301 \times 10^5$	0	3.204
$1.313 \times 10^5$	0	3.568
$1.325 \times 10^5$	0	3.932

而在实际日前市场中, 日前市场电价的不确定性相比新能源发电和负荷不确定性较小. 因此, 假设日前市场电价固定, 通过应用IGDT, 对联盟运营商不同期望收益下, PV1, PV2, WT1等新能源发电和负荷的不确定性进行研究. 表5表示联盟在期望稳定收益下, 可接受PV1, PV2和WT1等新能源发电和负荷各参数不确定性程度. 从表5可以看出, 在期望收益从确定性模型下预测收益  $1.205 \times 10^5$  元逐渐减小的情况下, 各参数不确定程度总和  $\alpha$  逐渐增加. 考虑具体不确定性参数时, 联盟可接受的最小不确定性程度来源是光伏发电PV1和风力发电WT1. 联盟除了接受稳定的风力发电不确定性外, 可接受的光伏PV1不确定性逐渐增加.

表6表示联盟在仅考虑新能源发电和负荷不确定性的机会调度模型下, 可接受PV1, PV2和WT1等新能源发电和负荷各参数不确定性程度. 从表6可以看出, 在期望收益从确定性模型下预测收益  $1.205 \times 10^5$  元逐渐增加的情况下, 仅考虑新能源发电和负荷不确定性的机会调度模型的各参数不确定程度总和  $\beta$  逐渐增加. 和仅考虑新能源发电不确定性的鲁棒调度模型一样, 讨论具体不确定性参数时, 联盟可接受的最小不确定性程度来源是光伏发电PV1和风力发电WT1. 并且, 风力发电WT1和光伏PV1的不确定参数随着收益的增加, 二者均增加. 值得注意的是, 在期望收益为  $1.301 \times 10^5$ ,  $1.313 \times 10^5$ ,  $1.325 \times 10^5$  元时, 可接受的最小不确定参数变化程度均相同.

## 6 结论

本文构建了基于合作博弈的风-光-液态空气储能集群协同优化模型, 各参与者之间进行能源调度, 比较了其合作运行和独立运行时的收益, 并且比较了3种分配方式下各个参与者之间的收益. 并且, 在计及风、光、负荷和日前市场电价不确定性下, 对风-光-液态空气储能集群进行分析, 为混合发电系统协同优化提供了参考方案. 主要结论如下:



1) 本文提出的风-光-液态空气储能集群联盟, 基于Shapley值分配方案, 合作运行下增加了联盟中各参与者收益和集群联盟总收益的最大、最小值。

2) 本文利用信息间隙决策理论的方法, 研究了风、光、负荷和日前市场电价不确定性对集群调度带来的影响。其中, 鲁棒调度模型可为风险规避型集群运营商建立收益保障, 完善了对风、光、负荷和日前市场电价最大可接受降幅的预案。机会调度模型可为机会寻求型集群运营商求得更大收益, 获取了对风、光、负荷和日前市场电价最小增幅的期待。

表5 仅考虑新能源发电和负荷不确定性的鲁棒调度模型各参数不确定性程度

Table 5 Uncertainty degree of robustness model considering renewable energy and load uncertainty

期望稳定收益/元	$\alpha_{PV1}/\%$	$(\alpha_{PV2}, \alpha_{Pr})/\%$	$\alpha_{WT1}/\%$	$\alpha/\%$
$1.205 \times 10^5$	0	0	0	0
$1.193 \times 10^5$	0.391	0	0.071	0.462
$1.181 \times 10^5$	1.242	0	0.071	1.313
$1.169 \times 10^5$	2.093	0	0.071	2.164
$1.157 \times 10^5$	2.943	0	0.071	3.014
$1.145 \times 10^5$	3.794	0	0.071	3.865
$1.133 \times 10^5$	4.673	0	0.071	4.744
$1.121 \times 10^5$	5.573	0	0.071	5.644
$1.109 \times 10^5$	6.474	0	0.071	6.545
$1.097 \times 10^5$	7.375	0	0.071	7.446
$1.085 \times 10^5$	8.276	0	0.071	8.347

表6 仅考虑新能源发电和负荷不确定性的机会调度模型各参数不确定性程度

Table 6 Uncertainty degree of opportunity model considering renewable energy and load uncertainty

期望高额收益/元	$\beta_{PV1}/\%$	$(\beta_{PV2}, \beta_{Pr})/\%$	$\beta_{WT1}/\%$	$\beta/\%$
$1.205 \times 10^5$	0	0	0	0
$1.217 \times 10^5$	1.303	0	0	1.303
$1.229 \times 10^5$	2.386	0	0	2.386
$1.214 \times 10^5$	2.639	0	1.422	4.061
$1.253 \times 10^5$	3.540	0	1.422	4.962
$1.265 \times 10^5$	2.629	0	3.266	5.895
$1.277 \times 10^5$	3.530	0	3.266	6.796
$1.289 \times 10^5$	4.431	0	3.266	7.697
$1.301 \times 10^5$	7.573	0	3.266	10.839
$1.313 \times 10^5$	7.573	0	3.266	10.839
$1.325 \times 10^5$	7.573	0	3.266	10.839

参考文献:

[1] WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6): 58 - 64.  
(王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 58 - 64.)

[2] Project Comprehensive Report Writing Group. Comprehensive report of "Research on China's long-term low-carbon development strategy and transformation path". *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11): 1 - 25.  
(项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告. *中国人口, 资源与环境*, 2020, 30(11): 1 - 25.)

[3] China Electricity Council. *Annual Report on Development of China Power Industry*. Beijing: China Electricity Council, 2021.  
(中国电力企业联合会. *中国电力行业年度发展报告2021*. 北京: 中国电力企业联合会, 2021.)

[4] LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 9 - 20.  
(鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 9 - 20.)

[5] SUN Qiuye, HU Jie, HU Jingwei, et al. Triple play of energy internet with chinese characteristics and its self-mutual-group collaboration control technology framework. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 40 - 51, 396.  
(孙秋野, 胡杰, 胡旌伟, 等. 中国特色能源互联网三网融合及其“自-互-群”协同管控技术框架. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 40 - 51, 396.)

[6] National Energy Administration. *Letter Concerning Reply to Proposal 1574 of the Fourth Session of the Thirteenth National Committee of CPPCC*. URL [http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-08/27/c\\_1310371577.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-08/27/c_1310371577.htm).  
(国家能源局. 关于政协第十三届全国委员会第四次会议第1574号提案答复的函. URL [http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-08/27/c\\_1310371577.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-08/27/c_1310371577.htm).)

[7] REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping, et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(9): 33 - 38.  
(任智君, 郭红霞, 杨苹, 等. 含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置. *太阳能学报*, 2021, 42(9): 33 - 38.)

[8] CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3103 - 3114.  
(崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3103 - 3114.)

[9] Central People's Government of the People's Republic of China. *Circular of the State Council on the Issuance of the Action Plan for Carbon Summit by 2030*. URL [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).  
(中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知. URL [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).)

[10] HOU H, XU T, WU X, et al. Optimal capacity configuration of the wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage system. *Applied Energy*, 2020, 271: 115052.

[11] XU X, HU W, CAO D, et al. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system. *Renewable Energy*, 2020, 147: 1418 - 1431.

[12] National Energy Administration. "Scenery Storage and Transmission" Demonstration Project: Creating "Chinese Standard" in New energy Field. URL [http://www.nea.gov.cn/2013-12/26/c\\_132998444.htm](http://www.nea.gov.cn/2013-12/26/c_132998444.htm).  
(国家能源局. "风光储输"示范工程: 打造新能源领域的"中国标准". URL [http://www.nea.gov.cn/2013-12/26/c\\_132998444.htm](http://www.nea.gov.cn/2013-12/26/c_132998444.htm).)

[13] China Energy Engineering Group Planning & Engineering Co., LTD. *China Energy Construction Project Signed a Strategic Cooperation Agreement with the People's Government of Pu'er City*.

- Yunnan Province. URL [http://www.cpe.ceec.net.cn/art/2021/10/21/art\\_29038\\_2511698.html](http://www.cpe.ceec.net.cn/art/2021/10/21/art_29038_2511698.html).  
(中国能源建设集团规划设计有限公司. 中国能建中电工程与云南省普洱市人民政府签订战略合作协议. URL [http://www.cpe.ceec.net.cn/art/2021/10/21/art\\_29038\\_2511698.html](http://www.cpe.ceec.net.cn/art/2021/10/21/art_29038_2511698.html).)
- [14] Weifang Development and Reform Commission. *National Large-Scale Wind Power Photo-voltaic Base and 10 Million Kilowatts of Wind-Solar-Storage Integrated Base Project on Saline-Alkali Beach in Northern Shandong*. URL [http://fgw.weifang.gov.cn/xwzx/tpxw/202110/t20211029\\_5963553.html](http://fgw.weifang.gov.cn/xwzx/tpxw/202110/t20211029_5963553.html).  
(潍坊市发展和改革委员会. 国家大型风电光伏基地暨鲁北盐碱滩涂地千万千瓦风光储一体化基地项目正式开工. URL [http://fgw.weifang.gov.cn/xwzx/tpxw/202110/t20211029\\_5963553.html](http://fgw.weifang.gov.cn/xwzx/tpxw/202110/t20211029_5963553.html).)
- [15] National Development and Reform Commission. *Tianjin Port Builds the World's First "Zero Carbon Terminal"*. URL [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/jjyxtfz/202109/t20210915\\_1296718.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/jjyxtfz/202109/t20210915_1296718.html?code=&state=123).  
(中华人民共和国国家发展和改革委员会. 天津港打造全球首个“零碳码头”. URL [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/jjyxtfz/202109/t20210915\\_1296718.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/jjyxtfz/202109/t20210915_1296718.html?code=&state=123).)
- [16] National Development and Reform Commission. *Hainan's First "Wind-Solar-Storage Charging and Swapping" Centralized Charging and Swapping Power Station was put into Operation*. URL [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/hnqmsggkfgzdt/202103/t20210329\\_1270823.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/hnqmsggkfgzdt/202103/t20210329_1270823.html?code=&state=123).  
(中华人民共和国国家发展和改革委员会. 海南首个“风光储充换”集中式充换电站投运. URL [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/hnqmsggkfgzdt/202103/t20210329\\_1270823.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/hnqmsggkfgzdt/202103/t20210329_1270823.html?code=&state=123).)
- [17] LI Fei, LI Canbing, SUN Kai, et al. Integrated planning and operation method of hybrid energy storage system in microgrid. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 453 – 460.  
(李斐, 黎灿兵, 孙凯, 等. 微电网中混合储能系统的规划运行一体化配置方法. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 453 – 460.)
- [18] LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4): 766 – 775.  
(刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 766 – 775.)
- [19] MA Xin, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Off-design optimal control of multistage compressed air energy storage system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(3): 436 – 442.  
(马昕, 李珂, 张承惠, 等. 多级压缩空气储能系统变工况的优化运行控制. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 436 – 442.)
- [20] XIE Yingbai, XUE Xiaodong. Performance analysis on an integrated system of liquefied air energy storage and electricity production. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(4): 333 – 339.  
(谢英柏, 薛晓东. 液化空气储能与发电一体化系统的性能分析. 太阳能学报, 2020, 41(4): 333 – 339.)
- [21] JIANG Zhuohan, LIU Zhigang, XU Jiashu, et al. Two-layer collaborative optimization configuration method for CCHP system with wind-solar-storage. *Electric Power Construction*, 2021, 42(8): 71 – 80.  
(江卓翰, 刘志刚, 许加柱, 等. 计及风光储的冷热电联供系统双层协同优化配置方法. 电力建设, 2021, 42(8): 71 – 80.)
- [22] MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(20): 13 – 19.  
(梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 13 – 19.)
- [23] MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on nash bargaining theory. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 25 – 39, 395.  
(马腾飞, 裴玮, 肖浩, 等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 25 – 39, 395.)
- [24] SONG Yiqun, HOU Zhijian, WEN Fushuan, et al. Comparison of market power in three oligopoly models of electricity market. *Power System Technology*, 2003, (8): 10 – 15.  
(宋依群, 侯志俭, 文福拴, 等. 电力市场三种寡头竞争模型的市场力分析比较. 电网技术, 2003, (8): 10 – 15.)
- [25] WANG Yingying, MEI Shengwei, LIU Feng. Imputation schemes for the cooperative game in the hybrid power system planning. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2012, 32(4): 418 – 428.  
(王莹莹, 梅生伟, 刘锋. 混合电力系统合作博弈规划的分配策略研究. 系统科学与数学, 2012, 32(4): 418 – 428.)
- [26] HUANG Chunyi, WANG Chengmin, XIE Ning, et al. Distribution expansion planning based on strong coupling of operation and spot market. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16): 4716 – 4731, 4974.  
(黄淳驿, 王承民, 谢宁, 等. 基于运行-市场强耦合特性的配电网扩展规划. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4716 – 4731, 4974.)
- [27] XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3590 – 3597.  
(徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型. 电网技术, 2017, 41(11): 3590 – 3597.)
- [28] YU Shunkun, DAI Tong. Optimal allocation method of wind-solar-storage microgrid based on leader-followers game. *Water Resources and Power*, 2020, 38(3): 199 – 203, 171.  
(余顺坤, 戴同. 基于主从博弈的风光储型微电网优化配置方法. 水电能源科学, 2020, 38(3): 199 – 203, 171.)
- [29] DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 75 – 81, 207.  
(董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 75 – 81, 207.)
- [30] ZHANG Haining, TAO Yibin, MEI Hui, et al. Collaborative optimal scheduling model of photovoltaic-wind-battery cluster based on cooperative game. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(8): 87 – 94.  
(张海宁, 陶以彬, 梅惠, 等. 基于合作博弈的风光储集群协同优化调度模型. 热力发电, 2021, 50(8): 87 – 94.)
- [31] XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3590 – 3597.  
(徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型. 电网技术, 2017, 41(11): 3590 – 3597.)
- [32] ZHANG Menglin, AI Xiaomeng, WEN Jinyu. Economic dispatch for power system integrated with wind power using Stackelberg game. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 653 – 661.  
(仇梦林, 艾小猛, 文劲宇. 含风电电力系统的主从博弈经济调度. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 653 – 661.)
- [33] DU Yongfeng. Day-ahead interval optimization of electricity-gas-heat integrated energy system considering uncertainty of wind and PV. *Thermal Power Generation*. URL <https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202108154>.  
(杜永峰. 计及风光不确定性的电气热综合能源系统日前区间优化. 热力发电. URL <https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202108154>.)
- [34] JIN Shaozhen, MAO Zhizhong, LI Hongru. Economic operation optimization of smart micro grid based on optimization under uncertainty. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(9): 1357 – 1370.  
(靳绍珍, 毛志忠, 李鸿儒. 考虑不确定性因素的微电网经济运行的优化. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1357 – 1370.)

- [35] XIE Peng, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Cooperative optimization of energy storage capacity for renewable and storage involved microgrids considering multi time scale uncertainty coupling influence. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(24): 7126 – 7136, 7486.  
(谢鹏, 蔡泽祥, 刘平, 等. 考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化. *中国电机工程学报*, 2019, 39(24): 7126 – 7136, 7486.)
- [36] GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, et al. Improvement and application of frequency analysis modules for power system in high proportion of renewable energy situation. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4603 – 4612.  
(龚浩岳, 周勤勇, 郭强, 等. 高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用. *电网技术*, 2021, 45(12): 4603 – 4612.)
- [37] LIU Bin, CHEN Laijun, WANG Yuchen. Allocating reserve cost for hedging against wind generation uncertainty: a coalitional-game-theoretic approach. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(4): 437 – 445.  
(刘斌, 陈来军, 汪雨辰, 等. 应对风电出力不确定性的备用成本分摊: 联盟博弈方法. *控制理论与应用*, 2016, 33(4): 437 – 445.)
- [38] GAMS. The GAMS Software Website. URL <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/cplex.pdf>.
- [39] GROSSMANN I E, VISWANATHAN J, VECCHIETTI A, et al. GAMS/DICOPT: A discrete continuous optimization package. *GA-MS Corporation Inc*, 2002, 37: 55.
- [40] RAKIPOUR D, BARATI H. Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response. *Energy*, 2019, 173: 384 – 399.
- [41] LIU Lu, CHENG Haozhong, WU Yaowu, et al. Research progress and prospects of transmission expansion planning method for high proportion of renewable energy. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(13): 176 – 183.  
(柳璐, 程浩忠, 吴耀武, 等. 面向高比例可再生能源的输电网规划方法研究进展与展望. *电力系统自动化*, 2021, 45(13): 176 – 183.)

#### 作者简介:

**晏才鑫** 博士研究生, 目前研究方向为风光储系统的协同优化,

E-mail: 214601021@csu.edu.cn;

**裘智峰** 博士, 副教授, 博士生导师, 目前研究方向为人工智能及其在能源系统中的应用、电力市场及其新能源接入, E-mail: zhifeng.qiu@csu.edu.cn;

**王春生** 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为综合能源系统的优化调度, E-mail: wangcsu@csu.edu.cn.