

# 基于合作博弈论的风-光-水-氢多主体能源系统 增益分配策略

段佳南<sup>1</sup>, 谢俊<sup>1</sup>, 冯丽娜<sup>1</sup>, 陈付山<sup>2</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏省 南京市 211100;

2. 江苏省工程咨询中心有限公司, 江苏省 南京市 210003)

## Synergistic Gains Allocation for Multi-stakeholder Wind-solar-hydro-hydrogen Energy System Based on Cooperative Game Theory

DUAN Jia'nan<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>, FENG Li'na<sup>1</sup>, CHEN Fushan<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China;

2. Jiangsu Engineering Consulting Center Co., Ltd., Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** The operation mode of multi-stakeholder in the complementary coordination is one of the significant energy transitions in days to come. This paper mainly focuses on the allocation mechanism of synergistic gains of wind power, photovoltaic power, cascade hydropower and hydrogen stations based on the cooperative game theory. In order to gain the maximum output power of the coalition, the dispatch models of non-cooperative and cooperative modes are established uniformly, using the output expectation function to describe the uncertainty problem after the aggregation of multiple stakeholders of wind and PV powers. Then the Shapley Value and the Aumann-Shapley Value in the cooperative game theory are applied to allocate the synergistic gains after constructing the value function. Finally, the cases of a 5-stakeholder and Lower Yalong River Basin 50-stakeholder wind-solar-hydro-hydrogen energy systems show that the synergistic gains are highly influenced by natural inflow of hydropower, and that the collaborative operation will significantly improve the benefits of both the individual stakeholder and the cooperative coalition.

**KEY WORDS:** cooperative game theory; multi-stakeholder wind-solar-hydro-hydrogen system; allocation mechanism of synergistic gains; Shapley Value; Aumann-Shapley Value

**摘要:** 多利益主体协同互补运行模式是今后能源转型的重要方向之一。提出了基于合作博弈理论的风、光、水、氢多主体能源系统增量效益(增益)分配策略。通过构建出力期望函数来描述多个风、光伏发电利益主体聚合后出力的随机性问题,并以联盟发电量最大为优化目标统一建立非合作模式下

与合作模式下的调度模型。在构造电量增益函数的基础上,应用合作博弈论分别建立 Shapley 值法、Aumann-Shapley 值法的增益分配模型。通过 5 利益主体以及雅砻江下游流域 50 利益主体的算例分析得到,梯级水电来水期对风-光-水-氢多主体能源系统合作运行的增量效益影响较大;风-光-水-氢多主体合作运行可以较大幅度提高各主体运行的增量效益和合作联盟的整体效益。

**关键词:** 合作博弈论; 风-光-水-氢多主体能源系统; 增益分配策略; Shapley 值法; Aumann-Shapley 值法

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2084

## 0 引言

近年来,以水电、风电为代表的新能源正迅速发展并逐步代替传统化石能源。“十四五”规划明确提出实现“碳达峰、碳中和”重大战略决策的首要途径便是构建绿色能源体系,进一步推动了新能源的发展<sup>[1]</sup>。

风能和太阳能作为两大重要的新能源形式,具有绿色、可再生、储量丰富等天然优势。但受气象变化等因素影响,风能和太阳能存在不稳定、不连续的特点,随着发电侧集中式新能源的大规模接入,电力系统出力难以快速跟随用电负荷,其安全稳定运行面临巨大挑战<sup>[2]</sup>。

风、光、水、氢等多能源协同优化、互济互补的运行模式为上述问题提供了一种解决思路,以风、光、水、氢为利益主体的多能互补、协调调度现已成为了研究热点<sup>[3-5]</sup>。无论从短期或长期时间尺度看,风电、光电均具有良好的资源互补特性,因而通常作为互补发电系统进行整体研究<sup>[6]</sup>;由于具有灵活启动、快速调节等性能,水电机组在电力系

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965104); 国家重点研发计划项目(2019YFE0105200)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U1965104); the National Key R&D Program of China (2019YFE0105200).

统中通常承担调峰调频的任务；与风电、光电联合运行调度时，水电机组可提供旋转备用容量，保障新能源发电利益主体可靠并网运行；促进可再生能源制氢是我国大力推进氢能发展的重要手段之一，通过转变用户侧能耗形式、提高氢负荷需求，从而激励风、光等可再生能源的消纳，有效减少弃风、弃光的同时还能带来可观的经济效益<sup>[7-8]</sup>。

关于风电出力随机性问题的描述，文献[9]假设风速服从正态分布，通过风速与功率的非线性转换关系推得预测出力的概率密度函数，但风速预测误差在风电功率的转化过程中存在被放大的可能性；文献[10]基于场景分析法获得光伏实际出力，梯级水光蓄联合发电系统通过协调水、光资源可以有效抑制光伏发电的波动性、实现经济效益最大化，但联合系统中没有考虑光伏预测误差的影响；文献[11]构建了多个风电、多个光电以及梯级水电多能互补发电的经济调度模型，提出利用水电机组的快速调节特性向风光预测误差提供旋转备用。以上研究均针对风光出力随机性、波动性问题提供了一些技术路线，但仍需进一步将风光随机性与预测误差进行聚合建模。文献[12]基于风光出力波动性特征提出了实时互补性评价方法，通过调整风光发电比例可提高其互补性以及系统的容量可信度；文献[13]通过制定水电、火电机组的调度计划从而保证高渗透率的分布式风电消纳；文献[14]基于纳什谈判理论建立了风-光-氢多能源系统的合作调度模型，该模型可以实现成员的个体效益以及联盟的整体效益；文献[15]通过在风电侧捆绑氢储能调节上网电量，并提出双向电价补偿机制激励水电参与风电消纳，实现合作联盟的效益正增长。以上研究表明多主体能源系统联合优化运行通过不同能源资源间的互补特性可以弥补各主体单独运行时的缺陷，并为联合系统带来增量效益。

为实现风、光、水、氢各利益主体稳定形成互补发电的利益整体，除调度计划外，制定公平的增量效益(增益)分配方法至关重要。目前，合作博弈理论(cooperative game theory)被广泛地应用于联盟合作、成本分摊等领域<sup>[16-17]</sup>，其中核仁法(nucleolus)和 Shapley 值法是合作博弈的经典求解方法。文献[18-19]基于经典合作博弈论提出了地区能源管理方法，该方法能促使合作联盟稳定形成；文献[20-22]应用经典合作博弈论对梯级水电的补偿效益进行分配，分配结果具备公平性。文献[23]应用经典合作博弈论激励风光水联合发电，并对合作增益电量进行分配。但上述经典合作博弈方法的

研究应用中均存在随着联盟规模扩大，计算复杂度成几何级数增长的组合爆炸问题。文献[24]提出使用 Aumann-Shapley 值法(A-S 值法)对水电机组的可信发电量进行分配，该方法能有效应对经典合作博弈法的组合爆炸问题，但并未进一步分析得出该应用场景下发生组合爆炸的临界规模。

在上述背景下，本文针对风-光-水-氢多主体能源系统的合作运行展开研究，兼顾个体理性、联盟理性和整体理性，主要解决了风电、光伏、梯级水电和电制氢利益主体联合优化运行及发电增益公平分配两个问题。首先，在考虑风、光出力不确定性的基础上，构建出力期望函数来描述多个风、光发电利益主体聚合后出力的随机性问题，以多能源系统总发电量最大为优化目标统一建立非合作运行与合作运行的调度模型。然后，量化合作发电增益，运用 Shapley 值法、Aumann-Shapley 值法对合作联盟的增益电量进行分配。最后，通过算例对所提模型和方法进行了验证，并分析了风-光-水-氢多主体合作运行增益的主要影响因素。

## 1 风-光-水-氢多利益主体优化调度模型

考虑各利益主体在时间  $T$  内被等分为  $t$  个调度时段( $\forall t \in [1, 2, \dots, T]$ )，各时段的状态变量按照时间先后的顺序排列可构成一个  $t$  维列向量：

$$\mathbf{a} \in \mathbb{R}^{t \times 1} := [a_1, a_2, \dots, a_n]^T \quad (1)$$

假设联盟  $N$  中含有风电、光电、梯级水电、电制氢共  $n$  个利益主体，在调度周期  $T$  内可用变量  $a_{i,t}$  描述利益主体  $i$  ( $\forall i \in [1, 2, \dots, n]$ ) 在  $t$  时段的状态，构造由列向量组成的联盟矩阵：

$$\mathbf{A}^N \in \mathbb{R}^{t \times n} := \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{t1} & \cdots & a_{tn} \end{pmatrix} = [\mathbf{a}_1^{t \times 1}, \mathbf{a}_2^{t \times 1}, \dots, \mathbf{a}_n^{t \times 1}] \quad (2)$$

定义  $S$  为大联盟  $N$  的任一子集，则有  $\forall S \subseteq N$  且存在  $2^n - 1$  种组合，在合作博弈论中需对所有组合形式的联盟进行调度求解。由于矩阵的列数等于联盟中成员数，为避免建模时出现矩阵行列维度不一致的情况，这里引入指示函数式(3)对所有子联盟进行统一建模：

$$I_i(S_k) = \begin{cases} 1, & i \in \text{联盟 } S_k \\ 0, & i \notin \text{联盟 } S_k \end{cases} \quad (3)$$

其中子集  $S_k \subseteq N, k=1, 2, \dots, 2^n - 1$ 。此时，各联盟的模型参量均可用一个  $t$  行  $n$  列的矩阵统一呈现，并用右上标说明当前联盟的机组组合情况，即：

$$\mathbf{A}^{S_k} \in \mathbb{R}^{t \times n} := [I_1(S_k) \mathbf{a}_1^{t \times 1}, I_2(S_k) \mathbf{a}_2^{t \times 1}, \dots, I_n(S_k) \mathbf{a}_n^{t \times 1}] \quad (4)$$

下文中所有变量均据此定义，矢量表达均以黑

体字体呈现,用以与标量形式区分。由式(4)的参量表述,可统一建立非合作运行与合作运行的优化调度模型。

### 1.1 风电、光电出力的随机性建模

风电和光电的出力变量均为不确定的随机变量,当预测时间尺度较长(24h)时,根据中心极限定理,可认为预测出力服从正态分布<sup>[25]</sup>。

构造随机变量  $\zeta_t$  描述  $t$  时段风电、光电聚合后的预测出力,下标 WD、PV 分别表示风电和光电利益主体,即:

$$\zeta_t = \sum_{i \in \{WD, PV\}} P_{WD,i,t} + P_{PV,i,t} \quad (5)$$

聚合后的预测出力服从正态分布,  $\rho(\zeta)$  为服从均值  $\mu_{RES}$ 、方差  $\sigma_{RES}^2$  的概率密度函数。由于正态分布概率密度函数的变上限积分无显示表达,这里引入正态分布函数的近似计算公式  $D(\zeta)$ ,该公式与实际数值积分的最大绝对误差不超过 2%,因此其计算精度在一般的不确定性问题分析上有较好的可行性<sup>[25]</sup>。 $\rho(\zeta)$  以及  $D(\zeta)$  分别描述为

$$\rho(\zeta) = \frac{1}{\sigma_{RES} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\zeta - \mu_{RES})^2}{2\sigma_{RES}^2}\right], \quad \zeta \geq 0 \quad (6)$$

$$D(\zeta) = \int_{-\infty}^{\zeta} \rho(\zeta) d\zeta = \frac{\exp\left(\frac{4}{\sqrt{2\pi}} \frac{\zeta - \mu_{RES}}{\sigma_{RES}}\right)}{1 + \exp\left(\frac{4}{\sqrt{2\pi}} \frac{\zeta - \mu_{RES}}{\sigma_{RES}}\right)} \quad (7)$$

构建风光出力期望函数  $y(\zeta)$  用以解决风光聚合出力的不确定问题,有:

$$\begin{aligned} y(\zeta) &= \mathbb{E} \sum_{i \in \{WD, PV\}} P_{WD,i,t} + P_{PV,i,t} \\ &= \int_{-\infty}^{\zeta} \zeta \rho(\zeta) d\zeta = \int_0^{\zeta} \zeta \rho(\zeta) d\zeta = \\ &= \zeta \rho^{-1}(\zeta) \Big|_0^{\zeta} + \int_0^{\zeta} \rho(\zeta) d\zeta = \\ &= \zeta D(\zeta) + [D(\zeta) - D(0)] = \\ &= (\zeta - 1)D(\zeta) + D(0), \quad \zeta \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

当概率密度函数  $\rho(\zeta)$  一阶可导,若预测出力  $\zeta$  在给定区间  $[\zeta_{down}, \zeta_{up}]$  内,风光出力期望函数  $y(\zeta)$  为凹函数,若预测出力  $\zeta$  超过  $\zeta_{up}$ ,风光出力期望函数  $y(\zeta)$  为凸函数,证明见附录 A,其中:

$$\zeta_{down} = \frac{\mu_{RES} + 1}{2} - \sqrt{\left(\frac{\mu_{RES} + 1}{2}\right)^2 - (2\sigma_{RES}^2 + \mu_{RES})} \quad (9)$$

$$\zeta_{up} = \frac{\mu_{RES} + 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\mu_{RES} + 1}{2}\right)^2 - (2\sigma_{RES}^2 + \mu_{RES})} \quad (10)$$

选取一组预测均值  $\mu_{RES}$  和标准差  $\sigma_{RES}$ ,出力期望曲线如图 1 所示,该期望函数曲线呈现先凹后凸的变化趋势。当预测出力过低,远落于 95% 出力概率区间以外时认为是不合理预测,所得期望出力

接近于 0。在合理预测区间内,对于服从相同或相近均值以及标准差的正态分布,当风光聚合的规模越大,即预测出力越高时,所得实际期望出力就越接近预测值,所产生的聚合收益也会更多,可一定程度地反映出合作的规模效益。

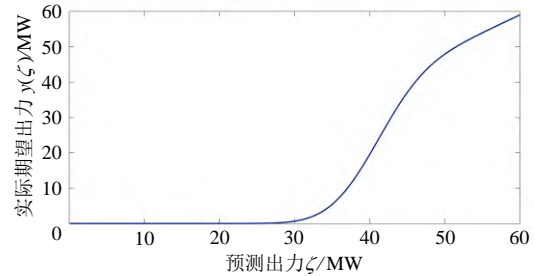


图 1 风光出力期望函数曲线

Fig. 1 Curve of wind-PV output expectation function

### 1.2 目标函数

在调度周期  $T$  内考虑风、光、水电在满足制氢所需电功率的前提下以联盟发电量最大为优化调度目标建立如式(11)的目标函数。数学模型中引入运算符“\*”用于对同维度矩阵进行对应位相乘运算。

$$\max \sum_{t \in T} y_t(\zeta) \Delta t + \{(\mathbf{P}_{HY}^S - \mathbf{P}_{HG}^S) * \Delta t^{t \times n} \times \mathbf{I}^{n \times 1}\}^T \mathbf{I}^{1 \times 1} \quad (11)$$

其中:  $t$  表示某一调度时段;  $n$  表示大联盟  $N$  中利益主体的总个数;  $S$  为大联盟  $N$  的任一子集 ( $|S|=2^n - 1$ ); 下标 HY、HG 分别表示梯级水电和电制氢利益主体;  $y_t(\zeta)$  表示  $t$  时刻风光聚合后的实际出力;  $\mathbf{P}_{HY}^S$  表示各时段内梯级水电的出力;  $\mathbf{P}_{HG}^S$  表示各时段内电制氢能电站的输入功率。

### 1.3 约束模型

#### 1.3.1 风电/光电利益主体

式(12)为风电、光电的发电容量约束,其出力上限通常由装机容量决定。为使出力范围合理化,式(13)设置 95% 置信区间对风电、光电的预测出力加以约束<sup>[13]</sup>。式(14)、式(15)分别定义了区间下限以及上限的具体表达形式。风电/光电利益主体约束模型如下:

$$\mathbf{P}_{WD/PVmin}^S \leq \mathbf{P}_{WD/PV}^S \leq \mathbf{P}_{WD/PVmax}^S \quad (12)$$

$$\underline{\mathbf{P}_{WD/PV}^S} \leq \mathbf{P}_{WD/PV}^S \leq \overline{\mathbf{P}_{WD/PV}^S} \quad (13)$$

$$\underline{\mathbf{P}_{WD/PV,i,t}^S} = \mu_{WD/PV,i,t} - 1.96\sigma_{WD/PV,i,t} \quad (14)$$

$$\overline{\mathbf{P}_{WD/PV,i,t}^S} = \mu_{WD/PV,i,t} + 1.96\sigma_{WD/PV,i,t} \quad (15)$$

其中:  $\mathbf{P}_{WD/PV}^S$  表示各时段内风/光电的预测出力;  $\mathbf{P}_{WD/PVmin}^S$ 、 $\mathbf{P}_{WD/PVmax}^S$  分别表示各时段内风/光电发电容量的下/上限值;  $\underline{\mathbf{P}_{WD/PV}^S}$ 、 $\overline{\mathbf{P}_{WD/PV}^S}$  分别表示各时段内风/光电 95% 出力置信区间的下/上限值;  $\mu_{WD/PV,i,t}$  表示  $t$  时段内风/光电的预测均值;  $\sigma_{WD/PV,i,t}$

表示  $t$  时段内风/光电的预测标准差。

### 1.3.2 水电利益主体

式(16)为水电机组的发电容量约束。式(17)(18)分别为水库容量、水电机组流量约束。式(19)对水库水量平衡关系进行描述。式(20)给出了水-电转换关系<sup>[13]</sup>。水电利益主体约束模型如下：

$$P_{HYmin}^S \leq P_{HY}^S \leq P_{HYmax}^S \quad (16)$$

$$V_{min}^S \leq V^S \leq V_{max}^S \quad (17)$$

$$Q_{min}^S \leq Q^S \leq Q_{max}^S \quad (18)$$

$$\begin{aligned} AV^S &= V^S + W^S - Q^S + Q_{up}^R \\ A \in \mathbb{R}^{t \times t} &:= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

$$P_{HY}^S = V^S \cdot V^S A_1 + Q^S \cdot Q^S A_2 + V^S \cdot Q^S A_3 + V^S A_4 + Q^S A_5 + I^{t \times n} A_6 \quad (20)$$

其中： $P_{HYmin}^S$ 、 $P_{HYmax}^S$ 分别表示各时段内梯级水电发电容量的下限/上限值； $V^S$ 表示各时段内梯级水电的水库容量； $V_{min}^S$ 、 $V_{max}^S$ 分别表示各时段内水库容量的下限/上限值； $Q^S$ 表示各时段内梯级水电的水电机组流量； $Q_{min}^S$ 、 $Q_{max}^S$ 分别表示各时段内水电机组流量的下限/上限值； $W^S$ 表示各时段内梯级水电的天然来水量； $R$ 表示某梯级水电上游所有水电机组的集合； $Q_{up}^R$ 表示联盟中各时段内来自上游的水电机组流量； $A$ 为系数矩阵，用于得到  $t+1$  时刻的参量； $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n} := \text{diag}(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$  为各水电机组的发电系数构成的  $n$  维对角矩阵。

### 1.3.3 电制氢利益主体

式(21)及式(22)分别为电解槽的输入功率上限及爬坡约束，定义运算符  $|\cdot|^+$  表示对该向量内所有元素取绝对值；式(23)为电制氢的电-氢转换关系；式(24)描述了各时段内制气量不得少于氢负荷需求，其中氢负荷需求均为非负；调度周期内氢负荷需求总量给定，因此各时段内需求量之和应与之相等，如式(25)所示。电制氢利益主体约束模型如下：

$$0^S \leq P_{HG}^S \leq P_{HGmax}^S \quad (21)$$

$$|AP_{HG}^S - P_{HG}^S|^+ \leq P_{ru}^S \quad (22)$$

$$G_{e-hg}^S = P_{HG}^S \eta_{el} \gamma_{e-hg} \quad (23)$$

$$G_{e-hg}^S \geq L_{hg,seg}^S \quad (24)$$

$$(L_{hg,seg}^S I^{n \times 1})^T I^{t \times 1} = \sum_{i \in S \cap HG} L_{i,hg,total} \quad (25)$$

其中： $P_{HGmax}^S$ 表示各时段内电解槽输入功率的上限

值； $P_{ru}^S$ 表示各时段内电解槽爬坡功率限值； $G_{e-hg}^S$ 表示各时段内电解槽的输出制气量； $\eta_{el}$ 是由电解槽工作效率系数构成的  $n$  维对角矩阵； $\gamma_{e-hg}$ 是由电制氢的转换系数构成的  $n$  维对角矩阵； $L_{hg,seg}^S$ 表示各时段内氢负荷的需求量； $L_{i,hg,total}$ 为一个调度周期内电制氢能电站  $i$  的氢负荷需求总量。

### 1.3.4 系统旋转备用需求

利用水电机组的快速调节特性为系统提供旋转备用。式(26)–(29)为风、光随机性和水电机组故障需要的上、下旋转备用容量约束。

$$\begin{aligned} (R_{uspin}^S I^{n \times 1})^T I^{t \times 1} &\geq \{(P_{HY}^S U) I^{n \times 1}\}^T I^{t \times 1} + \\ &\quad \{(P_{WD}^S - P_{WD}^S) I^{n \times 1}\}^T I^{t \times 1} + \\ &\quad \{(P_{PV}^S - P_{PV}^S) I^{n \times 1}\}^T I^{t \times 1} \end{aligned} \quad (26)$$

$$R_{uspin}^S = P_{HYmax}^S - P_{HY}^S \quad (27)$$

$$\begin{aligned} (R_{dspin}^S I^{n \times 1})^T I^{t \times 1} &\geq \{(P_{WD}^S - P_{WD}^S) I^{n \times 1}\}^T I^{t \times 1} + \\ &\quad \{(P_{PV}^S - P_{PV}^S) I^{n \times 1}\}^T I^{t \times 1} \end{aligned} \quad (28)$$

$$R_{dspin}^S = P_{HY}^S - P_{HYmin}^S \quad (29)$$

其中： $S$ 为大联盟  $N$  的任一非单元素子集； $R_{uspin}^S$ 、 $R_{dspin}^S$ 分别表示联盟中各时段内梯级水电所提供的上、下旋转备用容量； $U$ 是由水电机组事故备用容量系数构成的  $n$  维对角矩阵。

式(26)物理意义为：水电机组需向风光出力向下波动(实际出力小于预测值)以及水电机组故障提供上旋转备用容量。

当风光出力向下波动时，所需旋转备用与风光实际出力相关， $P_{WD/PV}^S$ 和 $\underline{P_{WD/PV}^S}$ 之差为风光出力向下波动导致的上旋转备用容量需求。

考虑水电机组故障时，所需提供的事故备用与水电机组的实际出力 $P_{HY}^S$ 相关，选取水电机组出力的一定百分比作为水电机组故障备用容量需求。

综上，式(26)中定义上旋转备用容量不少于风光下备用容量需求 $(P_{WD}^S - \underline{P_{WD}^S})$ 、 $(P_{PV}^S - \underline{P_{PV}^S})$ 与水电机组故障备用容量需求 $P_{HY}^S U$ 之和。

式(27)物理意义为：水电机组能够提供的上旋转备用容量。

当水电机组出力为 $P_{HY}^S$ 时，此时机组向上调节的裕度为 $P_{HYmax}^S - P_{HY}^S$ ，因此本文选取水电机组最大出力 $P_{HYmax}^S$ 与实际出力 $P_{HY}^S$ 的差值作为水电机组能够提供的上旋转备用容量，该旋转备用容量与水电机组的实际出力 $P_{HY}^S$ 相关。

式(28)物理意义为:水电机组需向风光出力向上波动(实际出力大于预测值)提供下旋转备用容量。

当风光出力发生向上波动时,  $\overline{P_{WD/PV}^S}$  和  $P_{WD/PV}^S$  两者之差为风光出力向上波动导致的下旋转备用容量需求。

水电机组只考虑故障备用,因此不需要为水电机组提供下旋转备用。

综上,式(28)中定义下旋转备用容量不少于风光向上波动导致的下备用容量需求  $(\overline{P_{WD}^S} - P_{WD}^S)$ 、 $(\overline{P_{PV}^S} - P_{PV}^S)$  之和。

式(29)物理意义为:水电机组能够提供的下旋转备用容量。

当水电机组实际出力为  $P_{HY}^S$  时,此时机组向下调节的裕度为  $P_{HY}^S - P_{HYmin}^S$ ,因此本文选取水电机组实际出力  $P_{HY}^S$  与最小出力  $P_{HYmin}^S$  的差值作为水电机组能够提供的向下旋转备用容量,该旋转备用容量与水电机组的实际出力  $P_{HY}^S$  相关。

## 2 合作增益分配模型

### 2.1 电量增益函数

基于合作博弈的收益分配策略是将联盟成员的个体运行收益先直接分配至该成员,随后将合作产生的附加总收益按照一定的方法分配给各个成员,原个体收益与附加合作收益之和便是合作联盟中各成员应分配到的最终收益值。因此,首先构造电量增益函数  $V(S)$  如下:

$$V(S) = F(S) - \sum_{i \in S} F(\{i\}) \quad (30)$$

其中:  $F(S)$  表示任一子联盟  $S$  合作产生的总电量;  $F(\{i\})$  表示联盟中各利益主体分别单独运行时所产生的电量。

### 2.2 Shapley 值分配法数学模型

Shapley 值分配法以某利益主体对联盟的边际贡献价值作为增益分配的衡量标准。边际增益与机组加入机群联盟的顺序有关,若仅考虑以最优或最劣的顺序加入联盟则分配具有片面性。为综合衡量某利益主体在各种加入位次下的边际贡献价值,构造分配权重系数  $W_S$ ,该系数表示某主体加入联盟  $S$  应分配到的边际增益占比:

$$W_S = \frac{(|S|-1)!(|N|-|S|)!}{|N|!}, \forall S \subseteq N \quad (31)$$

其中:  $|S|$  表示联盟  $S$  中主体个数;  $|N|$  表示大联盟中主体总数;  $(|S|-1)!$  表示某主体最后一个加入联盟  $S$  的所有排列数目;  $(|N|-|S|)!$  表示某主体第一

个加入联盟  $S$  的所有排列数目;  $|N|!$  表示联盟的总排列数目。

按权重占比对边际增益  $V(S) - V(S \setminus \{i\})$  进行分配,最终各利益体所分得的增益电量  $x_i^{Sh}$  可表示为

$$x_i^{Sh} = \sum_{S \subseteq N, i \in S} W_S [V(S) - V(S \setminus \{i\})] \quad (32)$$

Shapley 值分配法下各利益主体最终所得电量  $y_i^{Sh}$  可由单独运行时电量  $F(\{i\})$  和分配到的增益电量  $x_i^{Sh}$  相加求得:

$$y_i^{Sh} = F(\{i\}) + x_i^{Sh} \quad (33)$$

### 2.3 Aumann-Shapley 值分配法数学模型

Aumann-Shapley 值分配法将各利益体的能源资源等分为若干无穷小的分段,每一小段都被视为独立的利益体参与 Shapley 值的分配。Shapley 值分配法计算复杂度成指数级增长,此时通常会引入一种解析法来简化替代 Shapley 值法的原始求解方法。

假设  $f(b_i^{reso})$  是关于某主体总能源资源  $b_i^{reso}$  连续可微的电量函数,  $\lambda$  为分布于  $[0, 1]$  区间的等分系数,  $\lambda b_i^{reso}$  即为独立参与合作分配的分段能源资源。通过(34)的偏微分-积分计算可以得到某主体能源资源多分段下 Aumann-Shapley 值的理论解。

$$x_i^{AS} = b_i^{reso} \times \int_0^1 \frac{\partial f(\lambda b_i^{reso})}{\partial b_i^{reso}} d\lambda \quad (34)$$

将能源资源等分为  $K$  段,相应得到各等分系数  $\lambda_k, k \in [1, 2, \dots, K]$ , 构建如式(35)(36)组成的分段边际增益数值求解优化模型:

$$P(\lambda_{i,t,k}) = \max c_{i,t} p_{i,t} \quad (35)$$

$$\text{s.t. } p_{i,t} \leq b_{i,t}^{reso,up} \lambda_{i,t,k} \quad (36)$$

其中:  $c_{i,t}$  表示各时段内各主体的能源系数;  $p_{i,t}$  表示各时段内各主体的能源资源决策变量;  $b_{i,t}^{reso,up}$  表示各时段内各主体的能源资源上限;  $\lambda_{i,t,k}$  表示各时段内各主体能源资源的第  $k$  分段系数。

在该模型的求解过程中,对于约束式(36),可从中获得对应的对偶变量  $\pi_{i,t,k}$ ,当分段数趋于无穷大时,各分段的边际增益可表示为

$$x_{i,t,k}^{AS} = \Delta P(\lambda_{i,t,k}) = P(\lambda_{i,t,k}) - P(\lambda_{i,t,k-1}) = \pi_{i,t,k} \Delta b_{i,t,k}^{reso,up} \quad (37)$$

因此,某利益主体在调度周期  $T$  内所有分段共同作用所获得的边际增益电量可表示为

$$x_i^{AS} = \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \pi_{i,t,k} \Delta b_{i,t,k}^{reso,up} \quad (38)$$

综上可建立本文基于 Aumann-Shapley 值的风-光-水-氢增益电量分配模型,各利益主体所分得的增益电量可分别描述为

$$x_{WD,i}^{AS} = \left( \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \pi_{WD,i,t,k} \overline{\Delta P_{WD,i,t,k}} \right) \frac{V(N)}{x_{all}^{AS}} \quad (39)$$

$$x_{PV,i}^{AS} = \left( \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \pi_{PV,i,t,k} \overline{\Delta P_{PV,i,t,k}} \right) \frac{V(N)}{x_{all}^{AS}} \quad (40)$$

$$x_{HY,i}^{AS} = \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (\pi_{Q,i,t,k} \overline{\Delta Q_{i,t,k}} + \pi_{V,i,t,k} \overline{\Delta V_{i,t,k}}) \frac{V(N)}{x_{all}^{AS}} \quad (41)$$

$$x_{HG,i}^{AS} = \left( \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \pi_{HG,i,t,k} \overline{\Delta P_{HG,i,t,k}} \right) \frac{V(N)}{x_{all}^{AS}} \quad (42)$$

$$x_{all}^{AS} = \sum_{i \in N} (x_{WD,i}^{AS} + x_{PV,i}^{AS} + x_{HY,i}^{AS} + x_{HG,i}^{AS}) \quad (43)$$

Aumann-Shapley 值分配法下各利益主体最终所得电量  $y_i^{AS}$  可由单独运行时电量  $F(\{i\})$  和分配到的增益电量  $x_i^{AS}$  相加求得：

$$y_i^{AS} = F(\{i\}) + x_i^{AS} \quad (44)$$

在求解联盟增益时，Shapley 值法共需要求解  $2^n - 1$  个联盟，而 Aumann-Shapley 值分配法需要求解  $n + 1$  个联盟。

### 2.4 增益分配流程框架

本文增量效益分配策略的流程如图 2 所示。Shapley 值法与 Aumann-Shapley 值分配法均包含了调度模型建立、联盟增益求解、分配模型建立、增益分配求解这 4 个基本步骤。

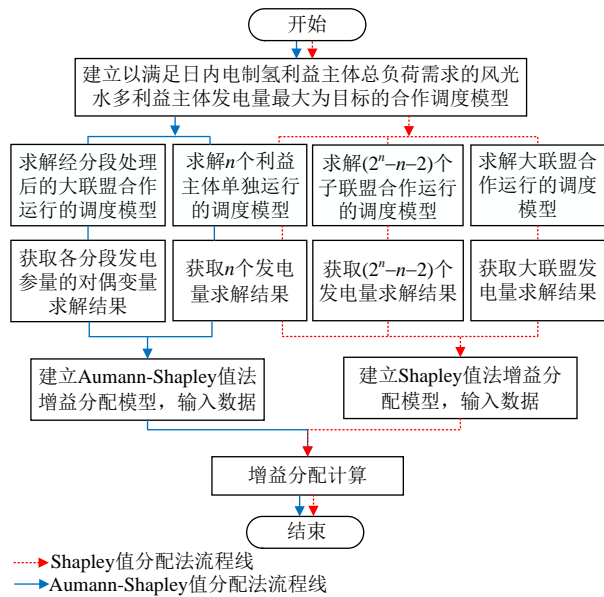


图 2 增益分配策略流程图  
Fig. 2 Framework of synergistic benefit allocation

## 3 算例分析

算例 1(风-光-水-氢 5 利益主体算例)对比不同运行场景下风-光-水-氢的合作增量效益，探究合作运行效益的影响因素，验证基于 Shapley 值法的增益分配方法在应用中具备公平性、可行性；算例 2(雅砻江下游流域 50 利益主体算例)验证 Aumann-Shapley 值法在大规模利益主体时的计算

高效性，分析该场景下联盟发生组合爆炸的临界规模。算例仿真均使用 Intel Core i52.7GHz CPU 和 4GB RAM 的个人计算机，通过 MatlabR2016a 软件调用 Yalmip 工具箱进行各联盟模型的求解以及基于合作博弈的增量效益计算。

### 3.1 风-光-水-氢 5 利益主体

以某风-光-水-氢 5 利益主体联盟为例，此联盟中包含了一座风电场(WD)、一座光伏电站(PV)、一个由两级水电站组成的梯级水电(HY1、HY2)以及一座电制氢能电站(HG)。对联盟进行合作运行优化调度并计算全局联盟在日内的增量效益。

为探究不同场景下风-光-水-氢合作运行效益的影响因素，以不同梯级水电来水期、不同风光装机容量为对比因素共设置 9 个不同的合作运行场景。平水期梯级水电天然来水数据、风光预测数据以及电制氢利益主体的相关技术参数见附录 B，风电场、光伏电站装机容量、梯级水电运行参数设置参考文献[26]。以该风、光装机容量为基准，在此基础上分别将装机容量再扩大 2 倍和 5 倍设置不同场景。丰水期、枯水期梯级水电天然来水分别为平水期天然来水的 3 倍、0.3 倍。各场景如表 1 所示。

表 1 不同场景下的合作增量效益  
Table 1 Incremental benefit of different scenarios

场景	梯级水电来水期	风光装机容量扩大比例	全局联盟增量效益/(MW h)
1	丰水期	1.0	114.9898
2	丰水期	2.0	229.9796
3	丰水期	5.0	574.9490
4	平水期	1.0	4165.0390
5	平水期	2.0	5135.5139
6	平水期	5.0	7974.7775
7	枯水期	1.0	2213.2362
8	枯水期	2.0	2828.3138
9	枯水期	5.0	3403.2628

#### 3.1.1 不同场景下合作运行效益分析

风-光-水-氢多主体能源系统中，各利益主体之间的互补效益在联合调度运行时能为合作联盟带来增量效益，不同场景下的仿真结果如表 1 所示。

首先分析不同梯级水电来水期的影响。分别对比场景 1、4、7，场景 2、5、8 和场景 3、6、9，合作增量效益均为丰水期增量效益 < 枯水期增量效益 < 平水期增量效益。丰水期为避免弃水，水电机组满发或接近满发，难以提供上、下旋转备用，水电缺乏风光消纳能力，水电与风光互补效益最差，联盟增益电量主要取决于风、光的互补效益。平水期通过调度水电机组向风、光机组提供上、下旋转备用，此时水电机组具备风光消纳能力，互补效益较好。由于发电水量受限，枯水期水电可提供的下

旋转备用较少,此时水电机组具备一定的风光消纳能力,但不及平水期。

下面分析相同梯级水电来水期下的不同风光装机容量的影响。分别对比场景1、2、3,场景4、5、6和场景7、8、9,合作增量效益为风光装机容量扩大1倍的增量效益<风光装机容量扩大2倍的增量效益<风光装机扩大容量5倍的增量效益。随着风、光装机容量扩大,风光互补系统的效益提高,可被消纳的风光增加,因此相同梯级水电来水期下的联盟合作增量效益呈上升趋势。

进一步分析不同梯级水电来水期下风光装机容量同等增幅带来的增益幅度,可知丰水期增益幅度<枯水期增益幅度<平水期增益幅度。丰水期的增益主要取决于风光互补,增幅最小。平水期与枯水期水电具备消纳风光能力,且平水期水电与风光互补效益最高,因此同等增幅的风光装机带来的增益幅度最大。以1倍风光装机容量时的增量效益为基准,当风光装机容量扩大2倍时,枯水期水电与风光互补所得增幅为平水期的58.46%;当风光装机容量扩大5倍时,枯水期水电与风光互补所得增幅仅为平水期的14.93%,受天然来水较少的影响,枯水期水电消纳风光的能力受限。

### 3.1.2 不同场景下水电下旋转备用调度量分析

不同场景下全局联盟水电下旋转备用调度量情况如表2所示。丰水期水电为避免或减少弃水不提供下旋转备用,因此场景1、2、3中下旋转备用调度量均为0。对比场景4与场景7,1倍风光装机时,平水期与枯水期水电均能消纳所有风光;对比场景5与场景8,风光装机容量扩大2倍时,平水期水电仍可以消纳所有风光,枯水期水电的可调度下旋转备用受限只能消纳部分风光;对比场景6、场景8与场景9,风光装机容量扩大5倍时,平水期水电仍有较强的风光消纳能力,而枯水期水电可调度备用无法继续增长。

表2 不同场景下的水电下旋转备用调度量情况  
Table 2 Dispatching results of down-ward spinning reserve under different scenarios

场景	梯级水电来水期	风光装机容量扩大比例	下旋转备用调度量/(MW h)
1	丰水期	1.0	0
2	丰水期	2.0	0
3	丰水期	5.0	0
4	平水期	1.0	427.73
5	平水期	2.0	855.49
6	平水期	5.0	2102.63
7	枯水期	1.0	427.73
8	枯水期	2.0	677.79
9	枯水期	5.0	677.79

### 3.1.3 不同运行模式下利益主体发电量分析

以表1中的场景4为例,对5利益主体的所有联盟组合进行优化调度求解,随后应用Shapley值法对联盟的合作增益进行分配。合作前后各利益主体的发电量如表3所示。

表3 不同运行模式下各利益主体的发电量  
Table 3 Generation of stakeholders under different operation modes

利益主体	发电量/(MW h)	
	非合作运行模式	合作运行模式
WD	662.56	982.45
PV	1009.40	1384.53
HY1	4368.05	5882.64
HY2	3907.78	5622.37
HG	-1600.00	-1359.16

由表3可见,风-光-水-氢多主体能源系统通过合作运行共获4165.03MW h增益电量。运用Shapley值分配法将全局联盟增益电量按照各利益主体的边际贡献进行分配后,各利益主体均在非合作模式的基础上获得了一定的增量效益,即共享了合作联盟所带来的增量效益。

### 3.2 雅砻江下游流域50利益主体

Shapley值法的求解模型较为简单,但随着联盟规模的扩大,其需求解的子联盟数量呈几何级数增长,出现组合爆炸问题。Aumann-Shapley值法分段数越多所得结果越精确,在应用时也存在一定的复杂性,但在大规模利益主体的组合爆炸问题面前,该方法呈现出优越的高效性。

选取雅砻江下游流域清洁能源示范基地中规划的12个风电场、18个光伏电站、15个电制氢能电站以及下游流域5级开发的梯级水电站系统,如图3所示。各电制氢能电站日内氢负荷需求总量给定,其余参数见附录C。根据2021年1月2日风光出力数



图3 雅砻江流域50利益主体联盟示意图  
Fig. 3 Diagram of Yalong River-50-stakeholder

据、梯级水电的径流量等数据建立 24 时段的日内风-光-水-氢合作运行调度模型,并应用 Aumann-Shapley 值分配法对联盟的增量效益进行分配。

本算例选取 40 分段时的分配结果,如图 4 所示,风光水发电利益主体均在非合作运行的模式上获得了增益电量,电制氢用电利益主体也在非合作运行的模式上一定程度地减少了自身系统耗电量,各利益主体共享联盟全部增量效益,且均能实现增益大于 0。

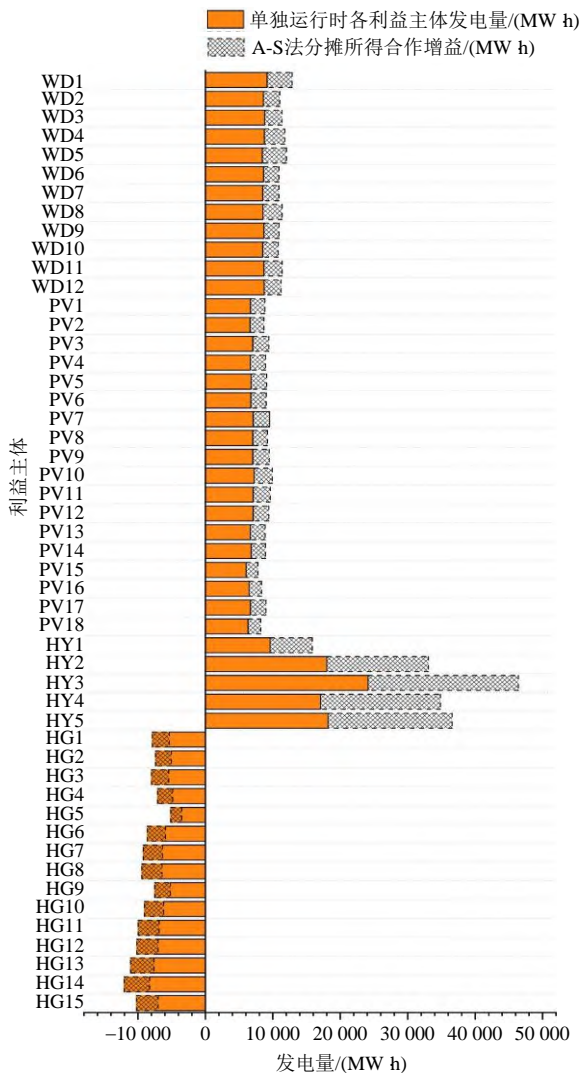


图 4 50 利益主体 A-S 值法分配结果

Fig. 4 Allocation results of Aumann-Shapley Value of 50-stakeholder

绘制如图 5 所示的利益主体规模—计算耗时对比图。从图中可知在求解 10 个及以内规模利益主体时,Shapley 值法耗时极短且均短于 Aumann-Shapley 值法,仅需 5.819s,此时 Aumann-Shapley 值法耗时较长需 17.817s。当联盟主体数量超过 10 个以后,Shapley 值法的计算耗时呈指数级快速增长,而 Aumann-Shapley 值法的耗时则根据联盟主体数量近似呈线性缓慢增长。

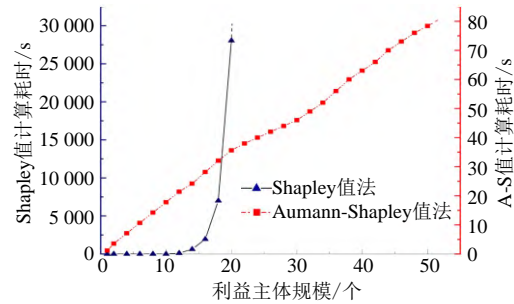


图 5 不同利益主体规模下 Shapley 值法与 A-S 值法计算耗时  
Fig. 5 Time consuming for different stakeholders under Shapley Value and Aumann-Shapley Value

## 4 结论

在能源加速清洁化转型以及激励多主体能源系统合作运行的研究背景下,本文以风电、光电、水电以及电制氢能站为研究对象,基于风光出力随机性特征构建出力期望函数建模多个风、光聚合后出力不确定问题,并以联盟发电量最大为优化目标统一建立风、光、水、氢利益主体非合作模式与合作模式下的优化调度模型。基于合作博弈理论分别应用 Shapley 值法以及 Aumann-Shapley 值法对多主体能源系统增量效益进行分配。主要得出以下结论:

1) 仿真结果表明风-光-水-氢多主体能源系统通过合作运行能产生显著的发电增量效益。通过合作运行,各主体运行效益及联盟效益相比未合作均有较大幅度提高。

2) 风-光-水-氢多主体能源系统的合作运行效益受梯级水电来水期影响较大。在同等风光装机容量下,平水期水电机组的风光消纳能力最强,合作增益最多;枯水期天然来水较少,水电的风光消纳能力受限,合作增益较少;丰水期水电缺乏风光消纳能力,合作增益最少。

3) 相同梯级水电来水期,风光装机容量对合作运行效益有较大影响。风光装机容量增幅相同时,平水期的合作增益增幅最大;枯水期水电机组可调用备用较少,合作增益增幅次之;丰水期联盟增益主要取决于风光互补系统,合作增益增幅最小。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 王勇, 王颖. 中国实现碳减排双控目标的可行性及最优路径——能源结构优化的视角[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4444-4455. WANG Yong, WANG Ying. Feasibility and optimal pathway of China's double targets for carbon reduction - the perspective of energy structure optimization[J]. China Environmental Science, 2019, 39(10): 4444-4455(in Chinese).
- [2] LIU Qianyi, LI Long, LUO Longfu, et al. Power quality management of PV power plant with transformer integrated filtering method[J].



- IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 941-949.
- [3] 朱燕梅, 邹祖建, 黄炜斌, 等. 金沙江上游典型电站水风光互补运行研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(4): 78-85.  
ZHU Yanmei, ZOU Zujian, HUANG Weibin, et al. Complementary operation of water, wind and solar power for typical power stations on upper Jinsha River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(4): 78-85(in Chinese).
- [4] 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[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 75-81, 207.  
DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75-81, 207(in Chinese).
- [5] KORPAS M, HOLEN A T. Operation planning of hydrogen storage connected to wind power operating in a power market[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 742-749.
- [6] KUMAR N P, BALARAMAN K, ATLA C S R. Optimal mix of wind-solar PV hybrid power plant with minimum variability[C]// Proceedings of the 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS). New Delhi, India: IEEE, 2016: 1-6.
- [7] BAN Mingfei, YU Jilai, SHAHIDEHPOUR M, et al. Integration of power-to-hydrogen in day-ahead security-constrained unit commitment with high wind penetration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 337-349.
- [8] WU Xiong, LI Haoyu, WANG Xiuli, et al. Cooperative operation for wind turbines and hydrogen fueling stations with on-site hydrogen production[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2775-2789.
- [9] ZHOU Wei, SUN Hui, PENG Yu. Risk reserve constrained economic dispatch model with wind power penetration[J]. Energies, 2010, 3(12): 1880-1894.
- [10] 夏依莎, 刘俊勇, 刘继春, 等. 基于电量共享的梯级水光蓄联合发电系统优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 118-125.  
XIA Yisha, LIU Junyong, LIU Jichun, et al. Optimal scheduling strategy of cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid generation system based on electric energy sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 118-125(in Chinese).
- [11] 张丽琴, 谢俊, 张秋艳, 等. 基于 Shapley 值抽样估计法的风-光-水互补发电增益分配方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 126-132.  
ZHANG Liqin, XIE Jun, ZHANG Qiuyan, et al. Synergistic benefit allocation method for wind-solar-hydro complementary generation with sampling-based Shapley value estimation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 126-132(in Chinese).
- [12] 刘永前, 王函, 韩爽, 等. 考虑风光出力波动性的实时互补性评价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3211-3218.  
LIU Yongqian, WANG Han, HAN Shuang, et al. Real-time complementarity evaluation method for real-time complementarity of wind and solar power considering their volatility[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3211-3218(in Chinese).
- [13] ZHOU Boran, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Hydro-thermal-wind coordination in day-ahead unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4626-4637.
- [14] 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[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 25-39.  
MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 25-39(in Chinese).
- [15] 李咸善, 杨宇翔. 基于双向电价补偿的含氢储能风电和梯级水电联合优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3297-3305.  
LI Xianshan, YANG Yuxiang. Optimization dispatching for joint operation of hydrogen storage-wind power and cascade hydropower station based on bidirectional electricity price compensation[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3297-3305(in Chinese).
- [16] O'BRIEN G, EL GAMAL A, RAJAGOPAL R. Shapley value estimation for compensation of participants in demand response programs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2837-2844.
- [17] HU Zhaoyang, CHEN Lin, GAN Deqiang, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 653-662.
- [18] HAN Liyang, MORSTYN T, MCCULLOCH M. Incentivizing prosumer coalitions with energy management using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 303-313.
- [19] FENG Changsen, WEN Fushuan, YOU Shi, et al. Coalitional game-based transactive energy management in local energy communities [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1729-1740.
- [20] MADANI K, HOOSHYAR M. A game theory-reinforcement learning (GT-RL) method to develop optimal operation policies for multi-operator reservoir systems[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 732-742.
- [21] 周彬彬, 申建建, 程春田. 基于联盟博弈的多控制性水库梯级电站补偿效益分摊方法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 58-62.  
ZHOU Binbin, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian. Compensation benefits allocation of cascaded hydropower plants with multiple controlling reservoirs using coalition games[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(11): 58-62(in Chinese).
- [22] FARIA V A D, DE QUEIROZ A R, LIMA L M M, et al. Cooperative game theory and last addition method in the allocation of firm energy rights[J]. Applied Energy, 2018, 226: 905-915.
- [23] ZHANG Liqin, XIE Jun, CHEN Xingying, et al. Cooperative game-based synergistic gains allocation methods for wind-solar-hydro hybrid generation system with cascade hydropower[J]. Energies, 2020, 13(15): 3890.
- [24] FARIA E, BARROSO L A, KELMAN R K, et al. Allocation of firm-energy rights among hydro plants: an Aumann-Shapley approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 541-551.
- [25] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 计及风电功率不确定性的经济调度问题求解方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 125-130.  
ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. A solution of economic dispatch problem considering wind power uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 125-130(in Chinese).
- [26] XIE Jun, ZHANG Liqin, CHEN Xingying, et al. Incremental benefit allocation for joint operation of multi-stakeholder wind-PV-hydro complementary generation system with cascade hydro-power: an Aumann-Shapley value method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 68668-68681.



段佳南

在线出版日期: 2022-04-13。

收稿日期: 2021-10-19。

作者简介:

段佳南(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场与电力系统经济运行, E-mail: djn9927@hhu.edu.cn;

谢俊(1979), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场与电力系统经济运行, E-mail: jxie@hhu.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)

附录 A 风光出力期望函数凹凸性曲线

因为正态分布的概率密度函数  $\rho(\zeta)$  一阶可导，下面对风光出力期望函数  $y(\zeta)$  分别进行一次求导和二次求导：

一次求导：

$$y'(\zeta) = [(\zeta - 1)D(\zeta) + D(0)]' = D(\zeta) + (\zeta - 1)\rho(\zeta) \quad (A1)$$

二次求导：

$$y''(\zeta) = \rho(\zeta) + \rho(\zeta) + (\zeta - 1)\rho'(\zeta) = 2\rho(\zeta) + (\zeta - 1)\rho'(\zeta) = \frac{2}{\sigma_{RES}\sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(\zeta - \mu_{RES})^2}{2\sigma_{RES}^2}] + (\zeta - 1) \{ \frac{\zeta - \mu_{RES}}{\sigma_{RES}^3\sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(\zeta - \mu_{RES})^2}{2\sigma_{RES}^2}] \} = \frac{1}{\sigma_{RES}\sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(\zeta - \mu_{RES})^2}{2\sigma_{RES}^2}] \times [2 + (\zeta - 1) \frac{\zeta - \mu_{RES}}{\sigma_{RES}^2}] \quad (A2)$$

易知式(A2)乘号前半部分恒为非负数，当预测出力  $\zeta$  在给定区间  $[\zeta_{down}, \zeta_{up}]$  内时，乘号后半部分恒  $\geq 0$ ，此时有  $y''(\zeta) \geq 0$  恒成立，因此风光出力期望函数  $y(\zeta)$  为凹函数；当预测出力  $\zeta$  在给定区间  $[\zeta_{up}, +\infty]$  内时，乘号后半部分恒  $\leq 0$ ，此时有  $y''(\zeta) \leq 0$  恒成立，因此风光出力期望函数  $y(\zeta)$  为凸函数，综上得证。

附录 B 风-光-水-氢 5 利益主体相关参数

表 B1 风电场、光伏电站预测参数

Table B1 Predicted parameters for WD and PV

时段	$\mu_{WD}/MW$	$\sigma_{WD}/MW$	$\mu_{PV}/MW$	$\sigma_{PV}/MW$
1	43.56	4.23	—	—
2	41.35	3.97	—	—
3	39.12	3.69	—	—
4	37.05	3.45	—	—
5	36.89	3.43	—	—
6	35.15	3.22	—	—
7	34.43	3.13	20.16	1.42
8	33.12	2.97	38.56	3.63
9	32.05	2.85	40.08	3.81
10	31.16	2.74	48.33	4.80
11	30.89	2.71	70.04	7.40
12	30.01	2.60	108.36	11.01
13	31.26	2.76	206.05	20.73
14	32.25	2.88	243.15	25.18
15	33.57	3.03	201.39	19.17
16	34.34	3.12	109.68	9.16
17	35.06	3.21	73.32	5.80
18	36.80	3.42	34.13	2.09
19	36.98	3.44	—	—
20	37.06	3.45	—	—
21	38.41	3.61	—	—
22	40.50	3.86	—	—
23	42.30	4.08	—	—
24	43.15	4.18	—	—

表 B2 梯级水电天然来水量

Table B2 Natural inflow of Cascade hydropower

时段	上游水电/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	下游水电/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
1	5.8	3.8
2	5.3	3.7
3	5.9	3.7
4	5.9	3.8
5	5.4	3.8
6	5.6	3.7
7	5.3	3.5
8	5.7	3.2
9	5.6	3.5
10	5.1	3.4
11	5.1	3.8
12	5.7	3.8
13	5.7	3.7
14	5.6	3.9
15	5.2	3.8
16	5.8	3.7
17	5.3	3.6
18	5.2	3.7
19	5.8	3.6
20	5.6	3.6
21	5.3	3.5
22	5.8	3.5
23	5.2	3.6
24	5.8	3.4

表 B3 电制氢能站技术参数

Table B3 Parameters of hydrogen station

参数	取值
$\eta_{el}/\%$	75
$\gamma^{e-hg}/(Nm^3/MW)$	250
$P_{HGmax}/MW$	150
$P_{rv}/MW$	40
$L_{hg,total}/(10^4Nm^3)$	30

附录 C 雅砻江下游流域电制氢能站技术参数

表 C1 电制氢能站技术参数

Table C1 Parameters of hydrogen station

利益主体	$\eta_{el}/\%$	$\gamma^{e-hg}/(Nm^3/MW)$	$P_{HGmax}/MW$	$P_{rv}/MW$	$L_{hg,total}/(10^4Nm^3)$
HG1	75	250	150	40	30
HG2	75	250	150	40	30
HG3	78	250	150	40	30
HG4	77	250	150	40	30
HG5	77	250	150	40	30
HG6	76	250	150	40	32
HG7	76	250	150	40	32
HG8	76	250	150	40	32
HG9	76	250	150	40	32
HG10	74	300	200	60	35
HG11	74	300	200	60	35
HG12	78	300	200	60	35
HG13	76	300	200	60	35
HG14	74	300	200	60	35
HG15	74	300	200	60	35