

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230320

# 发电侧多主体投资低碳综合微网氢储能的演化策略

赵海岭<sup>1,2</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 李笑竹<sup>1</sup>, 程方亮<sup>2</sup>, 杨永利<sup>2</sup>

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;  
2. 国网新疆电力有限公司电力交易中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 在低碳经济背景下, 为提高向大用户直供电的灵活性, 解决多主体在有限理性下共建共享的非对称性行为决策问题, 提出多新能源场站联合投资低碳综合微网氢储能的演化行为分析方法。首先, 利用异质性新能源场站发电与大用户用能的时空互补特性, 提出多主体共享低碳综合微网氢储能的基本框架, 使各发电主体形成“自平衡+直供电+余量上网”模式, 在增强新能源友好并网能力与供用电灵活性的同时降低投资成本。然后, 考虑多主体在参与氢储能共建共享时的非对称行为决策, 基于复制者动态方程与演化稳定定理, 对多新能源场站在有限理性下的多投资策略进行演化行为分析。最后, 以我国西北部新能源汇集区域为算例对发电侧在联合投资中的合作行为进行推演, 结果表明政府可通过对间断性发电特征的电站给予适当补助, 或细化电价设置来激励异质性新能源场站的联合投资行为, 从而促进氢储能的规模化发展; 新能源场站则可通过提高装机容量来保证自身定值收益。  
**关键词:** 发电侧; 联合投资; 低碳综合微网; 演化博弈; 行为分析

## Evolution strategy of low carbon integrated microgrid hydrogen energy storage with Multi-agents investment on the power generation side

ZHAO Hailing<sup>1,2</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, LI Xiaozhu<sup>1</sup>, CHENG Fangliang<sup>2</sup>, YANG Yongli<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for Renewable Energy Generation and Grid Connection Technology, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Power Exchange Center of State Grid of Xinjiang Corporation, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** In the context of low-carbon economy, in order to improve the flexibility of direct energy supply to large users and deal with the asymmetric behavior decision-making of multi-agents jointly building and sharing under limited rationality, an evolutionary behavior analysis method of new energy station joint investment in low-carbon integrated microgrid hydrogen energy storage is proposed. First, based on the space-time complementarity between power generation by multiple new energy stations and energy consumption by large users, the basic framework of multi subjects sharing low-carbon integrated microgrid hydrogen energy storage is proposed, which makes each generation entity construct “self-imbalance+direct power supply+surplus grid purchase” mode. This is to decrease their investment cost while strengthening new energy friendly grid-connected capacity and power supply and consumption flexibility. Second, considering the asymmetric behavior decision-making of multiple entities in participating co-building and sharing, an evolutionary behavior analysis of multiple investment strategies for multiple new energy stations under bounded rationality based on replicator dynamic equations and an evolutionary stability theorem is conducted. Finally, the new energy gathering area in Northwest China is taken as an example and the cooperative behavior of generation side in joint investment is inferred. The results indicate that the government can incentivize joint investment behavior by providing appropriate subsidies to stations with intermittent power generation characteristics or refining electricity price settings. In this way it promotes the large-scale development of hydrogen energy storage. New energy stations can ensure their own fixed value benefits by increasing their installed capacity.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52267005 and No. 52067020).

**Key words:** power generation side; joint investment; low-carbon integrated microgrid; evolutionary game; behavior analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52267005, 52067020); 新疆维吾尔自治区科技厅重大科技专项项目资助(2022A01004)

## 0 引言

综合能源微网凭借自身优势——将内部功率波动转移至具有较大惯性的热网，被不断证明具有较好削峰填谷的效果<sup>[1-2]</sup>。综合能源微网利用多能互补转换将功率波动移至惯性较大的热网，以实现平滑新能源发电功率，为提高新能源并网的友好能力与供用能灵活性提供了有效途径<sup>[3-5]</sup>。同时，建设清洁低碳高效的综合微网对我国生态环境具有深远意义<sup>[6-7]</sup>。

以氢储能设备为主要能源转换与存储装置的综合微网，具备零碳排放与多能联储联供的能力，对传统燃煤、燃气等能源具有替代作用<sup>[8-9]</sup>，对构建清洁低碳的综合微网发挥着支撑作用<sup>[10]</sup>。目前对于包含氢能的低碳综合微网的优化配置问题已经开展了一系列的研究。文献[11]为应对新能源超高渗透率的综合能源系统中源荷双侧波动性，提出了电-氢综合能源系统的优化配置方法；文献[12]为改善薄弱的外部供能网络与较高热负荷引起的能量失衡，提出了含氢储能多能联储联供的综合能源系统优化配置策略；文献[13]为降低工业园区碳排放、提高用户用能的综合能效，提出了园区综合能源系统的氢储能单元优化配置模型。上述研究从平抑源荷波动性到保证用能供需平衡再到降低碳排放、提高用能综合能效，均体现出以氢能为主的低碳综合微网发挥着显著作用。但随着未来电网形态地不断发展、大规模新能源广泛接入、电力市场不断开放，大用户向大规模新能源场站直购电的模式应运而生，加速了多元市场主体竞争格局<sup>[14]</sup>。新能源场站群中，各主体利益交互耦合，场站及大用户购售电行为错综复杂，需要更多的能量转换与存储装置以保证新能源上网与直供的稳定性与灵活性；上述情形将会造成灵活性资源的浪费与投资主体成本的激增。因此，亟需研究发电侧低碳综合微网的科学运营模式与合理规划方法。

基于能量共享，将低碳综合微网中灵活性调节资源的所有权与使用权分离，联合投资、共享使用的规划运营模式为解决上述问题提供了新思路<sup>[15]</sup>。在此趋势下，综合微网在规划阶段的投资将由单主体向多主体联合投资形式转变。文献[16]构建了用户、投资商、电网等多主体的多级微网优化配置策略，但仍为多主体分别投资单一微网情形。文献[17]考虑用户需求响应提出了多售电主体共建共享风光储一体化系统的优化配置策略，但并未计及其间复杂的利益耦合关系，因此在共建共享模式下，合理

规划的难点在于剖析与平衡多方参与者的合作关系和利益诉求。博弈论可有效平衡不同主体间的利益冲突，是解决上述问题的重要理论工具：文献[18]基于非合作博弈，构建了多小型电力用户投资储能并共享使用的双层优化模型；文献[19]基于合作博弈分析了多个工业用户间收益与成本关系，提出了分散式共享储能系统的配置方法；文献[20]基于合作博弈分析多新能源电站间的利益互动关系，提出发电侧共享储能优化配置模型。但上述研究均基于传统非合作/合作博弈，假设各参与者完全理性且信息完全对称，存在配置方案过于理想化的缺陷。演化博弈不要求参与者完全理性与信息完全对称的条件，使其更能合理分析实际情况下参与者的决策行为，目前在电力市场竞争策略、需求侧行为分析<sup>[21]</sup>、新能源场站储能投资规划<sup>[22]</sup>等方面均有应用。

基于上述分析，本文以用能经济性、灵活性、低碳性为总体目标，解决多主体在有限理性下共建共享的非对称性行为决策问题，进而对多新能源场站联合投资低碳综合微网氢储能的行为进行演化策略分析。首先提出多新能源场站共享综合微网的基本框架，从能量共享的角度提升用户用能灵活性与微网投资经济性；其次，建立含电解槽、储氢罐、燃料电池、储热器、电制热设备的以氢储能为主的综合微网，辅助各新能源场站形成“自平衡+直供电+余量上网”的运营模式，增强新能源友好并网能力与供用能灵活性与低碳性；然后以各新能源场站直供能与向内部用户售能收益、余电上网收益、微网投资成本、用户需求响应成本等的总经济支付最大为目标，构建多参与者支付函数模型；再次计及各新能源场站在参与能量共享时的非对称行为决策，在有限理性下对各投资策略进行演化分析。最后，以我国西北部新能源汇集区域为算例对发电侧在联合投资中的合作行为进行推演，并分析新能源上网电价、实时售能价格对多主体行为趋势与系统配置方案的影响。

## 1 共享低碳综合微网的基本框架

### 1.1 低碳综合微网基本结构

低碳综合微网由能量供应、转换、存储装置构成。各场站中新能源机组是微网中的主要源动设备；能量转换装置包括：电解槽、燃料电池与电制热设备，分别用 *ele*、*fuc*、*eh* 表示；能量存储装置包括：储氢罐与储能设备，分别用 *H<sub>2</sub>*、*ther* 表示。基本结构见图 1，且有如下能量供应关系。

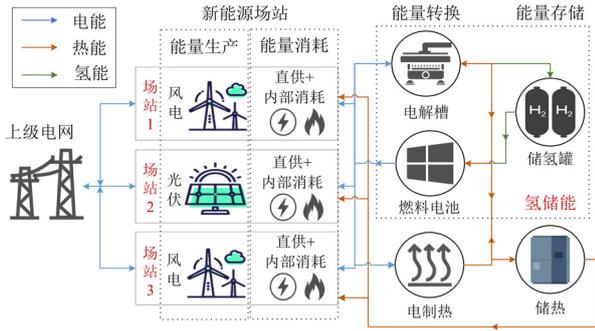


图 1 多购售电主体共享低碳综合微网结构

Fig. 1 Structure of shared low-carbon integrated microgrid

1) 各新能源场站中新能源机组发电承担该主体直供电与内部的电负荷需求, 场站向上级电网购电作为应急与备用;

2) 当新能源场站电能供大于求时, 电解槽将各主体部分过剩电能转化为氢能存储在储氢罐中, 部分过剩电能出售至上级电网以此获利;

3) 燃料电池可将氢能转换为电能供多场站使用满足其直供电与内部电负荷需求;

4) 电解槽与燃料电池在运行中均会产生热能, 将其作为满足多场站热需求的主要热源, 电制热则作为应急与备用。

低碳综合微网中作为主要能量转换与存储设备的氢储能具有零碳排放与多能联储联供的特点, 对构建低碳、绿色综合能源系统发挥着显著作用<sup>[13]</sup>。此外, 氢储能制、储、用三环节可解耦运行<sup>[8]</sup>, 为满足多场站中不同类型调节需求, 实现灵活性调节资源的分时、空复用提供了技术支撑。

上述共享互动机制打破多新能源场站在能量转换与存储上的资源共享壁垒, 其低碳综合微网的高灵活性与稳固性可满足多场站向大用户直供能与其内部用能的持续稳定需求、兼顾各场站投资经济性。此外, 各新能源场站可通过综合微网的多能联储联供提高自身新能源并网的友好能力<sup>[23]</sup>, 亦可利用与上级电网电量的电价峰谷差来提高自身收益, 逐渐形成“自平衡+直供电+余量上网”的新型能量生态体系<sup>[24]</sup>。

## 1.2 低碳综合微网基本结构

以电解槽、燃料电池与电制热为主的低碳综合微网有如下能量转换关系。

### 1) 电能转换至氢气与热能

低碳微网内部电能转换至氢气与热能由电解槽电解水完成, 其能量转换过程可简化为<sup>[25]</sup>

$$\begin{cases} P_t^{\text{ele}} = Q_t^{\text{ele-H}_2} + H_t^{\text{ele}} \\ Q_t^{\text{ele-H}_2} = n_t^{\text{H}_2} G_{\text{HHV}} = P_t^{\text{ele}} \eta_{\text{ele}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_t^{\text{ele}}$ 、 $Q_t^{\text{ele-H}_2}$  和  $H_t^{\text{ele}}$  分别表示在  $t$  时刻电解槽工作时消耗的电能、转换产生的氢气与热能; 转换产生的氢气  $Q_t^{\text{ele-H}_2}$  由电解槽制氢效率  $n_t^{\text{H}_2}$  和氢气高热值  $G_{\text{HHV}}$  决定, 亦可用  $P_t^{\text{ele}}$  与工作效率  $\eta_{\text{ele}}$  (%) 表示。

### 2) 电能转换至热能

低碳微网内部电转热设备完成电能至热能的转换, 其能量转换过程可简化为

$$\eta_{\text{ch}} P_t^{\text{ch}} = H_t^{\text{ch}} \quad (2)$$

式中:  $\eta_{\text{ch}}$  表示电制热工作效率(%);  $P_t^{\text{ch}}$ 、 $H_t^{\text{ch}}$  分别表示在  $t$  时刻设备工作时消耗的电能与转换产生的热能。

### 3) 氢能转换成电能与热能

低碳微网内部氢能转换至电能与热能由燃料电池通过燃烧氢气完成, 过程可简化如式(3)所示<sup>[25]</sup>。

$$\begin{cases} Q_t^{\text{fue-H}_2} = P_t^{\text{fue}} + H_t^{\text{fue}} \\ Q_t^{\text{fue-H}_2} = m_t^{\text{H}_2} G_{\text{HHV}} = \frac{P_t^{\text{fue}}}{\eta_{\text{fue}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $Q_t^{\text{fue-H}_2}$ 、 $P_t^{\text{fue}}$  和  $H_t^{\text{fue}}$  分别表示在  $t$  时刻燃料电池工作时消耗的氢能、转换产生的电能与热能;  $Q_t^{\text{fue-H}_2}$  由燃料电池耗氢速率  $m_t^{\text{H}_2}$  和氢气高热值  $G_{\text{HHV}}$  决定, 亦可用  $P_t^{\text{fue}}$  与其工作效率  $\eta_{\text{fue}}$  表示。

## 2 多新能源场站联合投资模型

### 2.1 博弈基本元素

1) 参与者, 为各新能源场站, 用  $\text{MB}n$  表示, 并将参与者的集合记为  $N_p = \{\text{MB}1, \text{MB}2, \dots, \text{MB}n\}$ 。

2) 策略, 为各新能源场站对低碳综合微网的投资占比, 记为  $\theta_i^{\text{IES}}$ , 其中  $i$  为参与者的索引, 有  $i \in N_p$ 。依据实际情况, 上述决策变量在  $[0, 1]$  内连续取值, 即各新能源场站均有连续的策略空间集。

3) 支付, 本文为多个新能源场站联合投资共建低碳综合微网以提高自身收益的规划问题, 因此将各参与者的支付定义为其年化收益, 总支付向量为  $I = \{I_{\text{MB}1}, I_{\text{MB}2}, \dots, I_{\text{MB}n}\}$ 。

### 2.2 新能源场站支付

以单个新能源场站  $i$  为例, 其全年收益 ( $I_i$ ) 包括向大用户和向新能源场站内部用户的售电 ( $B_{\text{Se}}^i$ )、售热收益 ( $B_{\text{Sh}}^i$ ), 新能源场站向上级电网的购/售成本/收益 ( $B_{\text{Ge}}^i$ ), 低碳综合微网的年化投资成本 ( $C^{\text{IES}}$ ), 用户需求响应造成的降低用户满意度成本 ( $C_{\text{De}}^i$ ), 具体表示如式(4)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max I_i = B_{Se}^i + B_{Sh}^i + B_{-C_{Ge}}^i - C^{IES} \cdot \theta_i^{IES} - C_{De}^i - C_{Ce}^i \\ B_{Se}^i = 365 \cdot \sum_{t=1}^T (P_{Se,t}^i \cdot \xi_{Se,t}^{MB,U}) \\ B_{Sh}^i = 365 \cdot \sum_{t=1}^T (P_{Sh,t}^i \cdot \xi_{Sh,t}^{MB,U}) \\ B_{-C_{Ge}}^i = 365 \cdot \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{array}{l} P_{Ge,t}^i \cdot \xi_t^{MB,G}, P_{Ge,t}^i > 0 \\ P_{Ge,t}^i \cdot \xi_t^{G,MB}, P_{Ge,t}^i < 0 \end{array} \right. \\ C^{IES} = 1.05 \cdot \sum_{j=1}^{N_n} \left[ \left( \frac{\gamma(1+\gamma)^{m_j}}{(1+\gamma)^{m_j} - 1} + \psi_j \right) \xi_j Q_j^{IES} \right] \\ C_{De}^i = 365 \cdot \beta_{dr} \cdot \sum_{t=1}^T [\{(U_t^i)^2 + (V_t^i)^2\}] \end{array} \right. \quad (4)$$

式中:  $P_{Se,t}^i$ 、 $P_{Sh,t}^i$  分别为主体  $i$  在  $t$  时刻向大用户与主体  $i$  内部用户的售电、售热量;  $\xi_{Se,t}^{MB,U}$ 、 $\xi_{Sh,t}^{MB,U}$  分别为其对应的售电、售热单位价格;  $t$  为总调度周期内时段的索引,  $t \in [1, 2, \dots, T]$ ,  $T=24$ ;  $j$  表示对低碳综合微网内部设备的索引, 有  $j \in N_n$ ,  $N_n = \{\text{ele, fue, eh, H}_2, \text{ther}\}$ ;  $P_{Ge,t}^i$  为主体  $i$  与上级电网间的购电功率, 当  $P_{Ge,t}^i > 0$  时表示主体  $i$  向上级电网售电, 反之  $P_{Ge,t}^i < 0$  为购电;  $\xi_t^{MB,G}$ 、 $\xi_t^{G,MB}$  分别表示主体  $i$  向上级电网售电与购电单位价格;  $\gamma$  表示贴现率;  $m_j$  为设备  $j$  的使用年限;  $\psi_j$  为设备  $j$  的年运维成本占建设成本比例<sup>[11]</sup>;  $\xi_j$  为设备  $j$  的单位建设成本;  $Q_j^{IES}$  为设备  $j$  的投建规模;  $\beta_{dr}$  为用户满意度降低成本系数;  $U_t^i$ 、 $V_t^i$  分别为主体  $i$  的电、热负荷的需求响应量。

低碳综合微网还存在如下运行约束。

1) 电制热、电解槽与燃料电池的运行约束, 各场站对上述设备的总耗电与发电功率应小于该设备的配置容量, 如式(5)所示。

$$0 \leq \sum_{i \in N_p} P_t^{j-i} \leq Q_j^{IES}, j \in \{\text{eh, ele, fue}\}, \forall t \quad (5)$$

式中,  $P_t^{j-i}$  表示场站  $i$  对设备  $j$  的耗电/发电功率。

2) 储氢罐运行约束, 储氢罐在各时刻的总储氢量应小于该设备的配置容量  $Q_{H_2}^{IES}$ , 如式(6)所示。

$$0 \leq M_t^{H_2} \leq Q_{H_2}^{IES}, \forall t \quad (6)$$

式中,  $M_t^{H_2}$  表示当前时刻的储氢量, 不仅与储氢罐上一时刻的储氢量相关, 还与当前时刻电解槽与燃料电池的工作情况相关, 表达式如式(7)所示。

$$M_t^{H_2} = M_{t-1}^{H_2} + \eta_{ele} \sum_{i \in N_p} P_t^{ele,i} - \sum_{i \in N_p} P_t^{fue,i} / \eta_{fue} \quad (7)$$

式中,  $P_t^{ele,i}$ 、 $P_t^{fue,i}$  分别为场站  $i$  在  $t$  时刻对电解槽与燃料电池的耗电与发电功率。

此外, 为保证氢能转换过程的可持续性, 储氢罐在一个总调度周期始末时刻的储氢量  $M_1^{H_2}$ 、 $M_{24}^{H_2}$  应一致。

$$M_1^{H_2} = M_{24}^{H_2} \quad (8)$$

3) 储热罐运行约束与储氢罐一致, 储热罐也存在单一时刻与始末时刻储热量的约束, 如式(9)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} M_t^{ther} = M_{t-1}^{ther} + \eta_{ex} \sum_{i \in N_p} (H_t^{ele-i} + H_t^{fue-i} + H_t^{eh-i}) - \\ \left( \sum_{i \in N_p} (H_t^{load-i} - V_t^i) / \eta_{ex} \right) \\ 0 \leq M_t^{ther} \leq Q_{ther}^{IES}, \forall t \end{array} \right. \quad (9)$$

$$M_1^{ther} = M_{24}^{ther} \quad (10)$$

式中:  $M_t^{ther}$ 、 $M_{t-1}^{ther}$  分别表示储热罐在当前时刻与上一时刻的储热量,  $H_t^{ele-i}$ 、 $H_t^{fue-i}$  和  $H_t^{eh-i}$  分别表示场站  $i$  在  $t$  时刻对电解槽、燃料电池、电制热设备有需求时的产热功率;  $H_t^{load-i}$  表示场站  $i$  在  $t$  时刻的总热负荷;  $\eta_{ex}$  为储热换热器的效率;  $Q_{ther}^{IES}$  表示储热管的额定储热量。

4) 各新能源场站的热能需求约束, 热能由于管存能力较大, 不要求供需实时达到平衡, 仅满足必须热负荷需求即可。

$$H_t^{ele-i} + H_t^{fue-i} + H_t^{eh-i} \geq H_t^{load-i} - V_t^i, \forall t \quad (11)$$

5) 各新能源场站的电量平衡约束, 与热能不同, 电能需要实时平衡, 如式(12)所示。

$$P_{W,t}^i + P_{PV,t}^i + P_t^{fue-i} = P_t^{L-i} - U_t^i + P_t^{ele-i} + P_t^{eh-i} + P_{Ge,t}^i, \forall t \quad (12)$$

式中:  $P_{W,t}^i$ 、 $P_{PV,t}^i$  分别为场站  $i$  在  $t$  时刻的风电、光伏实际出力;  $P_t^{L-i}$  为场站  $i$  在  $t$  时刻的电负荷总量;  $P_t^{eh-i}$  为场站  $i$  在  $t$  时刻的电制热设备消耗的电量。

## 2.3 新能源场站策略模式

设置本文分析的参与者为  $n(n > 3)$  个新能源场站, 根据合作程度的不同有  $2^n - 1$  种策略模式, 见表 1。

表 1 购售电主体的策略模式

博弈模式	含义	合作程度
{MB1, MB2, ..., MBn}	MB1, ..., MBn 完全共同决策	完全合作
{MB1, MB2, ..., MB(n-1), MBn}	MB1, ..., MB(n-1) 组成联盟共同决策, MBn 独立决策	部分合作 1
⋮	⋮	⋮
{MB2, MB3, ..., MBn}, MB1	MB2, ..., MBn 组成联盟共同决策, MB1 独立决策	部分合作 2 <sup>n</sup> -3
{MB1}, {MB2}, ..., {MBn}	MB1, ..., MBn 完全独立决策	非合作

各参与者在完全合作模式下的最优策略满足式(13)所示的关系。

$$\left\{ \theta_{MB1}^{IES(1)*}, \theta_{MB2}^{IES(1)*}, \dots, \theta_{MBn}^{IES(1)*} \right\} = I_{MB1, \dots, MBn}^{IES} \left( \theta_{MB1}^{IES}, \theta_{MB2}^{IES}, \dots, \theta_{MBn}^{IES} \right) \quad (13)$$

式中:  $\theta_{MBn}^{IES(q)*}$  表示在  $q$  类合作程度下(与表 1 中合作程度对应), 参与者  $MBn$  的决策;  $\left\{ \theta_{MB1}^{IES(1)*}, \dots, \theta_{MBn}^{IES(1)*} \right\}$  为完全合作模式下的最优决策;  $I_{MB1, \dots, MBn}^{IES}$  为所有参与者的支付之和。

各参与者在部分合作 1-(2<sup>n</sup>-3) 模式下的最优策略满足关系类似, 以表 1 中部分合作 1 为例, 有

$$\left\{ \theta_{MB1}^{IES(2)*}, \dots, \theta_{MB(n-1)}^{IES(2)*} \right\} = I_{MB1, \dots, MB(n-1)}^{IES} \left( \theta_{MB1}^{IES}, \dots, \theta_{MB(n-1)}^{IES}, \theta_{MBn}^{IES(2)*} \right) \quad (14)$$

$$\theta_{MBn}^{IES(2)*} = I_{MBn}^{IES} \left( \theta_{MB1}^{IES(2)*}, \dots, \theta_{MB(n-1)}^{IES(2)*}, \theta_{MBn}^{IES} \right)$$

式中:  $I_{MB1, \dots, MB(n-1)}^{IES}$  为  $MB1, \dots, MB(n-1)$  的支付之和;  $\left\{ \theta_{MB1}^{IES(2)*}, \dots, \theta_{MB(n-1)}^{IES(2)*} \right\}$  为  $MBn$  选择最优策略时  $MB1, \dots, MB(n-1)$  的最优决策。

各参与者在非合作模式下的最优策略满足式(15)。

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_{MB1}^{IES(2^n-1)*} &= I_{MB1}^{IES} \left( \theta_{MB1}^{IES}, \theta_{MB2}^{IES(2^n-1)*}, \dots, \theta_{MBn}^{IES(2^n-1)*} \right) \\ \theta_{MB2}^{IES(2^n-1)*} &= I_{MB2}^{IES} \left( \theta_{MB1}^{IES(2^n-1)*}, \theta_{MB2}^{IES}, \dots, \theta_{MBn}^{IES(2^n-1)*} \right) \\ &\vdots \\ \theta_{MBn}^{IES(2^n-1)*} &= I_{MBn}^{IES} \left( \theta_{MB1}^{IES(2^n-1)*}, \theta_{MB2}^{IES(2^n-1)*}, \dots, \theta_{MBn}^{IES} \right) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中,  $\theta_{MB1}^{IES(2^n-1)*}$ 、 $\theta_{MB2}^{IES(2^n-1)*}$ 、 $\theta_{MBn}^{IES(2^n-1)*}$  分别为在其他参与者最优决策下自身的最优决策。

由于各参与者联合投资低碳综合微网有连续的策略空间集, 且各参与者的支付  $I_{MBn}^{IES}$  为参与者策略  $\theta_i^{IES}$  的连续函数, 根据纯策略 Nash 均衡与混合策略 Nash 均衡定理<sup>[26]</sup>, 便可证明上述策略均衡的存在性。

### 3 多策略集演化博弈模型

与合作博弈需兼顾整体理性与个体理性不同, 演化博弈利用复制者动态方程描述参与者在有限理性下的决策行为变化趋势; 与传统博弈中均衡概念相对, 演化博弈利用演化稳定策略标准博弈的稳定状态与收敛过程, 进而复制者动态方程与演化稳定策略形成了演化博弈的核心<sup>[27]</sup>。

#### 3.1 多策略集支付矩阵

在各参与者对其他参与者的决策不确定、信息不完整的情况下, 表 1 中的多种策略模式均可出现。基于此将各方参与者的支付矩阵  $U$  表示为

$$U = [U_{MB1}, U_{MB2}, \dots, U_{MBn}]^T \quad (16)$$

式中,  $U_{MBn}$  表示个体  $MBn$  的支付。  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,

$U_{MBj}$  表示为

$$U_{MBj} = \left[ I_{MBj,1}^{Str1}, I_{MBj,2}^{Str1}, \dots, I_{MBj,(2^n-2)}^{Str1}, I_{MBj,(2^n-1)}^{Str1} \right]^T \quad (17)$$

$$I_{MBj,1}^{Str2}, I_{MBj,2}^{Str2}, \dots, I_{MBj,(2^n-2)}^{Str2}, I_{MBj,(2^n-1)}^{Str2}$$

式中: 上标“Str1”、“Str2”分别表示参与者选择合作与不合作策略;  $I_{MBj,1}^{Str1}$  表示个体  $MBj$  选择合作时, 其他个体  $i$  也都选择合作时  $MBj$  的支付, ( $i \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j$ );  $I_{MBj,2}^{Str1}$  表示个体  $MBj$  选择合作时, 除第  $n$  个主体  $MBn$  选择不合作, 其他个体均选择合作时  $MBj$  的支付。依此类推,  $I_{MBj,(2^n-1)}^{Str1}$  表示个体  $MBj$  选择合作时, 其他个体  $i$  均选择不合作时  $MBn$  的支付。

#### 3.2 复制者动态方程

以  $MBn$  为例, 当  $MBn$  采用合作/不合作策略时, 其期望支付分别为

$$\left\{ \begin{aligned} I_{MBj}^{E, Str1} &= I_{MBj,1}^{Str1} \prod_{j=1, i \neq j}^n p_i + I_{MBj,2}^{Str1} \prod_{j=1, i \neq j}^{n-1} p_i (1-p_n) + \dots + \\ &I_{MBj,(2^n-2)}^{Str1} \prod_{j=2, i \neq j}^n p_i (1-p_i) + I_{MBj,(2^n-1)}^{Str1} \prod_{j=1, i \neq j}^n (1-p_i) \\ I_{MBj}^{E, Str2} &= I_{MBj,1}^{Str2} \prod_{j=1, i \neq j}^n p_i + I_{MBn,2}^{Str2} \prod_{j=1, i \neq j}^{n-1} p_i (1-p_n) + \dots + \\ &I_{MBj,(2^n-2)}^{Str2} \prod_{j=2, i \neq j}^n p_i (1-p_i) + I_{MBj,(2^n-1)}^{Str2} \prod_{j=2, i \neq j}^n (1-p_i) \end{aligned} \right. \quad (18)$$

式中:  $I_{MBj}^{E, Str1}$ 、 $I_{MBj}^{E, Str2}$  分别表示  $MBj$  分别采用合作与不合作策略时的期望支付;  $p_i$  表示个体  $MBi$  选择参与合作的概率, 则  $(1-p_i)$  表示个体  $MBi$  选择不参与合作的概率。

$MBj$  的平均支付表示为

$$I_{MBj}^{aver} = p_j I_{MBj}^{E, Str1} + (1-p_j) I_{MBj}^{E, Str2} \quad (19)$$

式中,  $p_j$  表示个体  $MBj$  选择参与合作的概率。

复制者动态方程利用动态微分方程描述各参与者采用某一策略的频数, 以刻画多参与者间的策略行为变化趋势。结合式(18)一式(19), 可得到  $MBn$  的复制者动态方程如式(20)所示。

$$F_{MBj}(x) = \frac{d(p_j)}{dt} = p_j (I_{MBj}^{E, Str1} - I_{MBj}^{aver}) \quad (20)$$

#### 3.3 演化稳定及过程

将有限理性的各参与者抽象为不同的种群, 演化稳定策略是指如果占种群绝大多数个体均选择该策略, 则选择突变策略的、占种群少数个体的个体则无法入侵这个群体<sup>[28]</sup>。有如下定义:

若有纯策略  $\theta^{(1)}$ 、 $\theta^{(2)} \in \Omega$ , 且  $\theta^{(1)} \neq \theta^{(2)}$ , 均存在一个正数  $\varepsilon^* \in (0, 1)$ , 使得策略  $\theta^{(1)}$  在满足式(21)时达到演化稳定。

$$f(\theta^{(1)}, \varepsilon\theta^{(2)} + (1-\varepsilon)\theta^{(1)}) > f(\theta^{(2)}, \varepsilon\theta^{(2)} + (1-\varepsilon)\theta^{(1)}), \quad \forall \varepsilon \in (0, \varepsilon^*) \quad (21)$$

式中,  $f(\theta)$  表示选择  $\theta$  策略群体的适应度函数<sup>[21]</sup>。

利用李亚普洛夫稳定性理论判断某个策略是否达到稳定, 当复制者动态方程均衡点处所有特征值的实部均为负数时, 对应的策略必定达到演化稳定<sup>[28]</sup>。

基于上述分析, 通过复制者动态方程可得到雅克比矩阵, 如式(22)所示。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{F(p_1)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial F(p_1)}{\partial p_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F(p_n)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial F(p_n)}{\partial p_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中,  $a_{n,n} = \frac{\partial F(p_n)}{\partial p_n}$ 。满足如下条件, 则该均

衡点对应的策略为演化稳定策略。

1) 雅克比矩阵的行列式  $D_J$  大于 0, 有

$$D_J = a_{1,1} \begin{vmatrix} a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,2} & \dots & a_{n,n} \end{vmatrix} - a_{1,2} \begin{vmatrix} a_{2,1} & a_{2,3} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,3} & \dots & a_{n,n} \end{vmatrix} + \dots + a_{1,n} \begin{vmatrix} a_{2,2} & \dots & a_{2,n-1} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,2} & \dots & a_{n,n-1} \end{vmatrix} > 0 \quad (23)$$

2) 雅克比矩阵的迹  $R_J$  小于 0, 有

$$R_J = a_{1,1} + a_{2,2} + \dots + a_{n,n} < 0 \quad (24)$$

综上所述, 多新能源场站联合投资低碳综合微网演化稳定过程如图 2 所示。

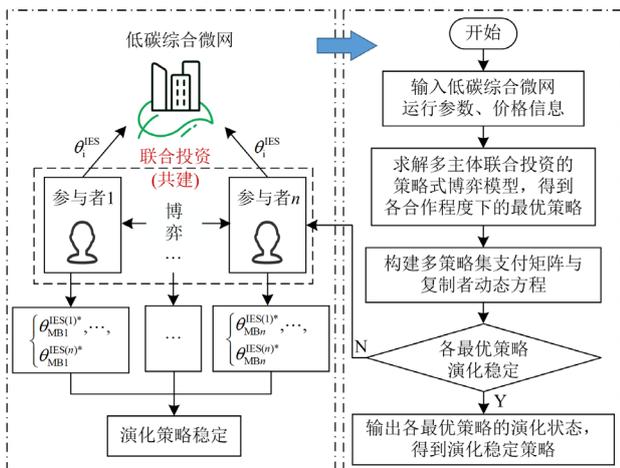


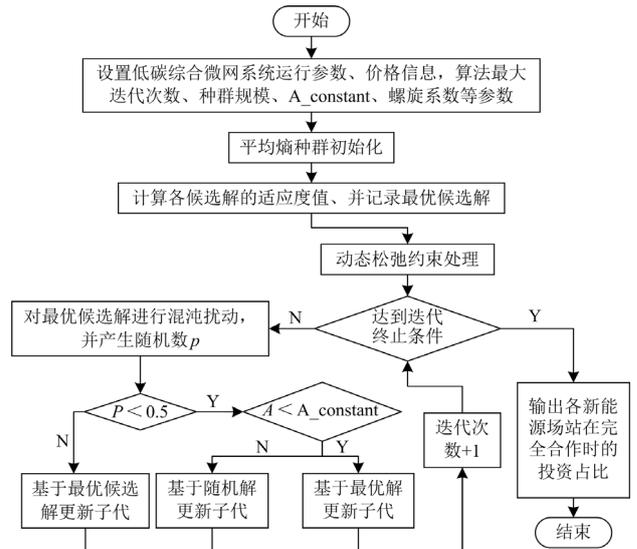
图 2 多新能源场站联合投资低碳综合微网的演化稳定过程

Fig. 2 Evolution process of joint investment in low-carbon integrated microgrid by multi new energy stations

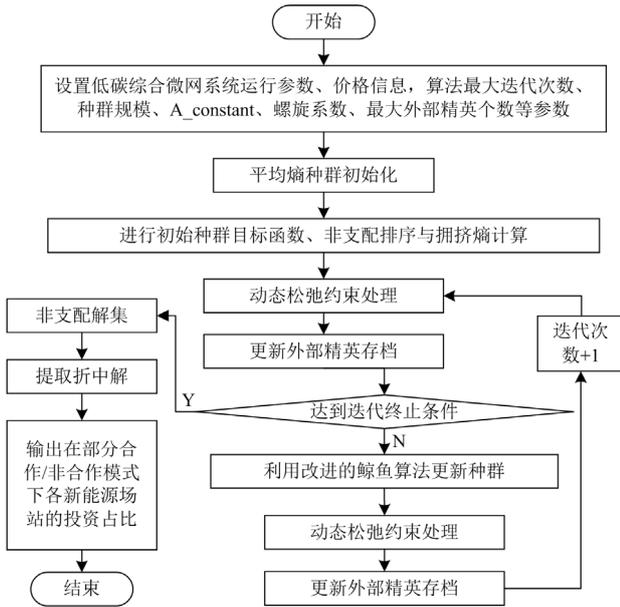
## 4 策略式博弈模型求解

根据表 1 多新能源场站联合投资低碳综合微网的策略模式, 在完全合作模式下的最优策略为单目标优化问题, 在部分合作与非合作模式下的最优策略均为多目标优化问题。上述优化问题均包含复杂约束, 且具有非线性等特点, 利用改进的鲸鱼算法(improve whale optimization algorithm, IWOA)与多目标鲸鱼算法(multi-objective whale optimization algorithm, MOWOA)<sup>[29]</sup>对其进行求解。IWOA 与 MOWOA 基于标准鲸鱼算法(whale optimization algorithm, WOA), WOA 无需经验设定的控制参数, 具有寻优能力强等优点, 且经大量测试函数验证鲸鱼算法在寻优精度和速度上优于粒子群、遗传等经典智能算法<sup>[30]</sup>。但 WOA 存在迭代后期收敛能力不足的问题, 借助差分进化算法中个体的合作与竞争机制指导优化搜索<sup>[31]</sup>, 提出 IWOA, 在此基础上进而提出 MOWOA。综上多策略式模型的求解流程如图 3 所示。

其中, 借鉴个体的合作与竞争思想, IWOA 设置探索固定值  $A\_constant$ , 当  $A \geq A\_constant$  时执行全局搜索, 反之进行局部搜索, 在全局与局部搜索中均分别随机进行螺旋运动和直线运动。MOWOA 利用精英存档保留非占优解, 计算各非占优解的拥挤熵对非占优解加以区分, 基于 IWOA 的寻优机制更新子代, 选取模糊数学中线性隶属度函数模提取精英存档中的最优折中解。对于优化模型中复杂的约束条件, 如: 储热、储氢罐末容量一致、电量平衡等, 利用动态松弛约束处理方式<sup>[29]</sup>保证解的可行性与有效性。



(a) 完全合作模式下的求解流程



(b) 部分合作与非合作模式下的求解流程

图 3 多主体联合投资低碳综合微网的策略式模型的求解  
Fig. 3 Solution process of strategic model of joint investment in low-carbon integrated microgrid

### 5 算例分析

选取 3 个场站 MB1、MB2 和 MB3 进行仿真验证, 并选取我国西北部新能源汇集区域(图 4)全年历史数据中典型日的实际数据为依据构建算例。以风速、太阳能辐照强度、各场站直供能与内部用能曲线(附录 A 图 A1)为依据进行共享低碳综合微网的配置, 综合微网各环节参数见附录 A 表 A1。图 4 中大规模新能源场站的装机容量设置如下: 场站 1 中风电装机容量为 49.5 MW, 场站 2 中光伏装机容量为 60 MW, 场站 3 中风电装机容量为 49.5 MW。各新能源场站的输出功率可通过场站规模与风速、辐照强度的关系计算得到。参考 2017 年我国各类发电技术在不同资源区上网价格均值<sup>[27]</sup>, 将新能源上网电价设置为 450 元/MWh;  $\xi_{Se,t}^{MB-U}$ 、 $\xi_{Sh,t}^{MB-U}$  和  $\xi_t^{G-MB}$  均为实时价格, 且  $\xi_{Se,t}^{MB-U} = \xi_t^{G-MB}$ , 其价格曲线见附录 A 图 A1。

表 2 不同合作程度下低碳综合微网氢储能的容量配置方案

Table 2 Capacity allocation scheme of low-carbon integrated microgrid hydrogen energy storage under different levels of cooperation

设备	完全合作	{MB1,MB2}/MB3	{MB1,MB3}/MB2	MB1,{MB2,MB3}	非合作
电制热/MW	25.87	14.07	16.15	16.91	14.06
电解槽/MW	69.98	63.65	74.17	79.45	91.64
燃料电池/MW	137.05	125.78	139.88	140.10	141.28
储氢罐/t	51.52	62.95	221.15	221.56	223.76
储热罐/MWh	270.74	251.90	271.21	257.64	206.42

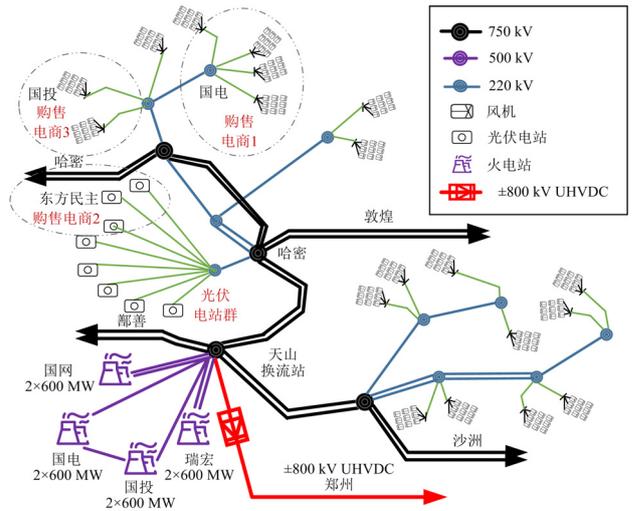


图 4 我国西北部新能源汇集区域网架结构

Fig. 4 Grid structure of new energy gathering area in Northwest China

### 5.1 演化结果分析

表 1 中不同策略模式对应各参与者间的不同合作程度, 在不同合作程度下, 各新能源场站联合投资低碳综合微网氢储能的容量配置方案及各新能源电站收益情况见表 2、表 3。

各新能源场站通过共享低碳综合微网实现能源间互济, 对比不同合作程度下低碳综合微网氢储能的配置方案, 易看出合作模式下需配置更大容量, 可推断出合作促进了能源间的转换, 增加了微网中氢储能设备的使用, 从而促进新能源场站间的能量转换与互济。

对比不同合作程度下各新能源场站的利润, 易看出 {MB1, MB3}, MB2 模式得到了系统总收益最高的结果, 但各场站间收益差距较大(场站 1、2 相差 24%), 由此部分合作未能合理平衡各参与者收益。完全合作模式能够在系统总收益较好的情况下有效平衡各参与者收益, 但在个体利益的驱动下, 场站 1、3 的行为会趋向于单独行动, 从而打破在完全合作模式下的联盟结构。

表 3 不同合作程度下各参与者的收益分析

Table 3 Benefit analysis of each participant under different levels of cooperation

不同合作程度		成本		收益				系统总收益
		投资成本	用户满意度 降低成本	向用户 售电收益	向用户 售热收益	上级电网交互 成本/收益	场站总收益	
完全合作模式	MB1	3665	1271	5168	15 952	20 024 010	20 040 194	58 537 910
	MB2	5035	1841	7814	5042	19 348 080	19 354 061	
	MB3	3611	2033	8723	6609	19 133 966	19 143 655	
{MB1,MB2},MB3	MB1	4631	6612	6966	15 956	19 811 655	19 827 187	54 692 164
	MB2	4146	547	9793	5042	17 051 154	17 065 015	
	MB3	2466	1403	10 249	6612	17 794 542	17 809 668	
{MB1,MB3},MB2	MB1	3481	754	6470	15 945	22 683 326	22 701 507	61 145 660
	MB2	6003	874	10 243	5042	18 293 044	18 301 451	
	MB3	3476	1246	10 549	6611	20 130 263	20 142 702	
MB1,{MB2,MB3}	MB1	3535	871	6199	15 952	21 953 836	21 971 583	59 091 962
	MB2	6381	704	10 689	5039	17 258 482	17 267 124	
	MB3	3529	1385	10 345	6612	19 841 212	19 853 255	
非合作模式	MB1	4057	668	6597	15 956	19 240 246	19 258 075	51 956 241
	MB2	6478	1106	9639	5042	15 176 213	15 183 310	
	MB3	4053	1523	9948	6612	17 503 872	17 514 856	

计及场站间的信心不对称性，对各场站的合作行为进行推演。通过各场站的复制者动态方程等于 0， $F_{MB1}(p_1) = F_{MB2}(p_1) = F_{MB3}(p_1) = 0$ ，得到局部均衡点为  $E_1(0,0,0)$ ， $E_2(1,0,0)$ ， $E_3(0,1,0)$ ， $E_4(0,0,1)$ ， $E_5(1,1,0)$ ， $E_6(0,1,1)$ ， $E_7(1,0,1)$ ， $E_8(1,1,1)$ 。上述均衡点对应实际物理场景中在各博弈格局下的最优策略，但上述最优值有可能是非稳定的。通过式(23)、式(24)演化稳定定理，判断各演化均衡点的稳定性，汇总如表 4 所示。

表 4 多方博弈演化均衡点稳定性

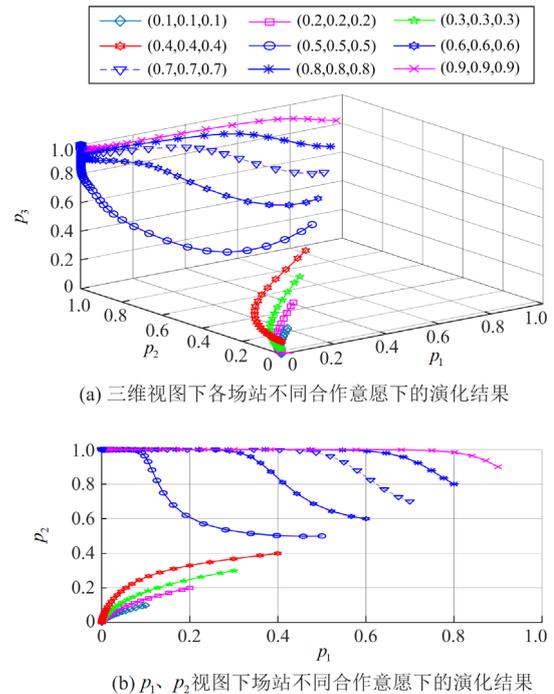
Table 4 Stability of evolutionary equilibrium point of multi-party game

均衡点	$D_j$	$R_j$	稳定性
$E_1(0,0,0)$	0	0	—
$E_2(1,0,0)$	+	0	鞍点
$E_3(0,1,0)$	+	0	鞍点
$E_4(0,0,1)$	+	0	鞍点
$E_5(1,1,0)$	-	-	非稳定点
$E_6(0,1,1)$	+	-	演化稳定
$E_7(1,0,1)$	-	-	非稳定点
$E_8(1,1,1)$	+	+	非稳定点

分析表 4 易看出， $E_1 - E_7$  均不存在演化稳定均衡。其中， $E_5$ 、 $E_7$  为不稳定策略，此时只要有微小的变化，低碳综合微网的投资及各场站收益情况就会受到重大的影响，上述情况中各新能源场站在不断的动态博弈中，而驱动博弈的源动力来自于各

场站收益的变化。 $E_2 - E_4$  为鞍点策略，对应的物理含义为：在该策略下某一参与者偏离自身的鞍点策略时，若其他参与者坚持使用鞍点策略不会使自己的收益情况变得更差。因此参与者可选择鞍点策略来保证自己的最低收益。

假设不同主体初始参与合作的意愿相同，各新能源场站间演化过程如图 5 所示。从图 5 中易看出，三方参与合作初始意愿的临界值均在 0.4~0.5，当各



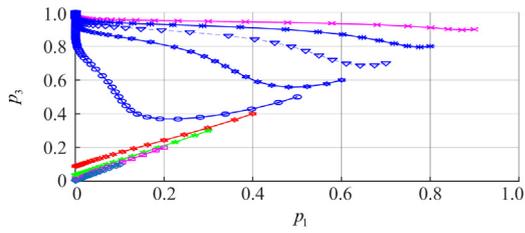
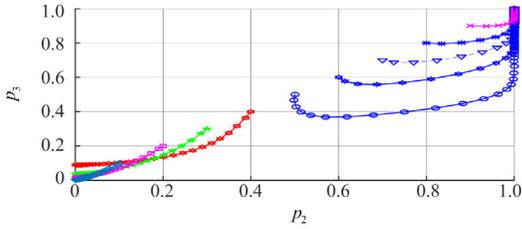
(c)  $p_1$ 、 $p_3$  视图下各场站不同合作意愿下的演化结果(d)  $p_2$ 、 $p_3$  视图下各场站不同合作意愿下的演化结果

图 5 各新能源场站在不同合作意愿下的演化结果

Fig. 5 Evolution results of new energy stations under different willingness to cooperate

主体初始意愿值均小于该临界值时, 最终趋于原点, 但未收敛至  $E_1(0,0,0)$ 。当各主体初始意愿值均大于该临界值时,  $p_2$  与  $p_3$  都收敛于 1, 最终收敛点趋向于  $E_6(0,1,1)$ 。但当初始意愿均处于中等水平时 ( $p_1 = p_2 = p_3 \in (0.5, 0.6)$ ), 场站 3 会出现合作意愿先减小后升高现象, 而具有间断性发电与连续性供电特征的场站 2 的意愿在下降, 但随着场站 3 的合作意愿不断增大, 场站 2 的意愿开始上升。

## 5.2 各场站演化行为敏感性分析

各新能源场站收益变化是驱动各主体演化行为的源动力, 通常伴随着政府对新能源鼓励政策与场站自身发电能力的变化。下面分别对新能源上网价格与场站自身装机容量对各主体演化行为进行分析与讨论。

### 1) 新能源上网价格

参考 2017 年我国各类发电技术的上网价格, 按照陆上风电、海上风电、集中光伏、分布光伏的上网电价设置 5 种情形, 其中 Case1—Case4 中新能源上网电价分别 350 元/MWh、560 元/MWh、700 元/MWh、600 元/MWh, Case5 中风电/光伏的上网电价分别为 500、650 元/MWh。各情形中多方博弈演化均衡点稳定性见表 5。

当上网电价过高或过低时(Case3, Case1), 各场站间的决策行为无法达到演化稳定, 系统只存在鞍点与非稳定点, 各主体处在不断的动态博弈中。随着电价升高(Case2), 系统在  $E_6(0,1,1)$  处稳定, 此时

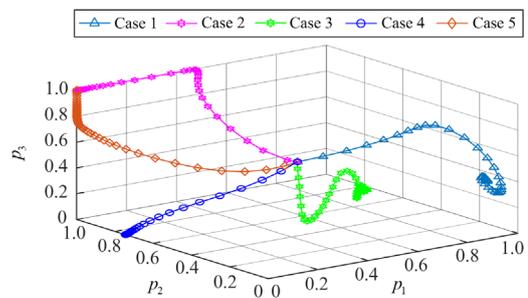
表 5 不同上网价格中多方博弈演化均衡点稳定性

Table 5 Stability of evolutionary equilibrium point of multi-party game in different prices

均衡点	稳定性				
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
$E_1(0,0,0)$	—	—	—	—	—
$E_2(1,0,0)$	鞍点	鞍点	鞍点	鞍点	鞍点
$E_3(0,1,0)$	鞍点	鞍点	鞍点	鞍点	鞍点
$E_4(0,0,1)$	鞍点	鞍点	鞍点	鞍点	鞍点
$E_5(1,1,0)$	非稳定	非稳定	非稳定	非稳定	稳定
$E_6(0,1,1)$	非稳定	稳定	非稳定	非稳定	稳定
$E_7(1,0,1)$	非稳定	非稳定	非稳定	稳定	非稳定
$E_8(1,1,1)$	非稳定	非稳定	非稳定	非稳定	稳定

场站 2, 3 在场站 1 不参与合作的时候选择合作, 因为场站 1 较场站 3 相比热负荷过大(见附录 A 图 A1), 需要较大规模的电解槽作为能量转换设备满足其热负荷需求, 电解槽投资单价较高, 使得系统投资成本激增, 在上网电价较低时不利于场站 1 与其他场站达成合作。场站 3 与场站 1 具有相同的发电特性, 但风、光伏发电易实现时间上的互补, 可获得更高的个体与联盟收益, 因此场站 2 与场站 3 合作达成。随着电价较原有场景略微提升(Case4), 系统在  $E_7(1,0,1)$  处演化稳定, 此时主体 1 中的风电具有持续性发电特征, 为使得联盟获得更高收益, 场站 1、3 在场站 2 不参与合作的时候选择合作(Case3)。对风电、光伏设置不同上网电价时(Case5), 由于光伏的上网电价大于风电的上网电价, 可弥补光伏间断性发电带来的收益不足, 系统演化稳定点增多; 鉴于风光互补特性, 系统在  $E_5(1,1,0)$ 、 $E_6(0,1,1)$ 、 $E_8(1,1,1)$  均会达到演化稳定。

假设不同主体初始参与合作的意愿相同且均为 0.5, 各新能源场站在不同上网电价情况中的演化过程如图 6 所示。从图 6 易看出上网电价对各场站参与合作的意愿影响明显, 在不同情况对应的不同电价中各主体的演化行为轨迹趋向于不同方向。



(a) 三维视图下各场站的演化结果

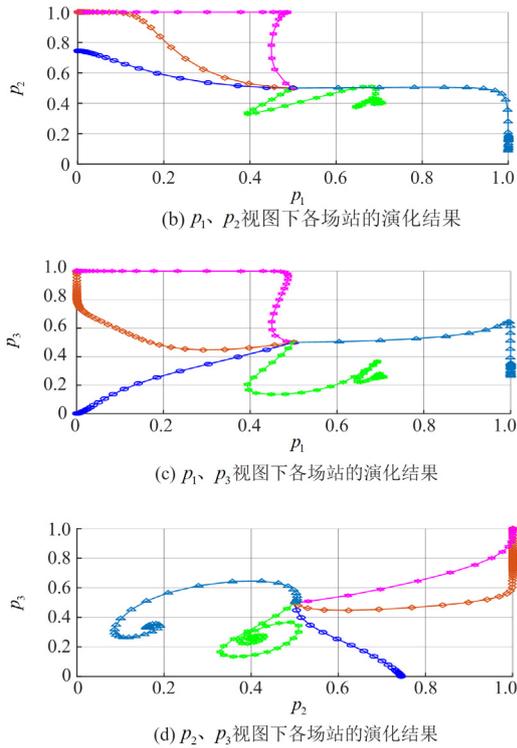


图 6 各新能源场站在不同上网电价下的演化结果  
Fig. 6 Evolution results of new energy stations under different feed-in tariffs

当各主体初始合作意愿均处于中间水平时, Case1 由于电价过低, 无法调动各主体参与合作的积极性使得演化结果无法收敛; Case3 电价过高, 容易造成多电站间的恶性竞争使得演化结果无法收敛。

图 7 为不同初始意愿下各场站的演化结果, 对比图 5 易看出, 上网电价可改变各场站初始意愿的临界值。科学合理的价格可最大限度地减小临界值, 如 Case2 的临界值由 0.4~0.5 降低至 0.1~0.2, 表明各场站在初始参与合作的意愿非常低时, 适度增加上网电价会促进各场站向完全合作的情形演化; 但上网电价过低(Case1)或过高(Case3、Case4)均会使得各场站参与合作的意愿无法收敛, 此时只要有微小的环境因素改变, 低碳综合微网的投资及各场站收益情况就会受到重大的影响, 使得各场站参与合作的意愿不断变化。区分光伏、风电的上网价格也可适当降低临界值, 如 Case5 的临界值由 0.4~0.5 降低至 0.2~0.3。因此上网电价对各场站行为演化结果的影响与发展趋势是显著的。

基于上述分析, 政府可根据通过发布更加合理且丰厚的上网电价来激励新能源电站的决策行为, 对间断性发电特征电站给予适当补助, 可促进与其

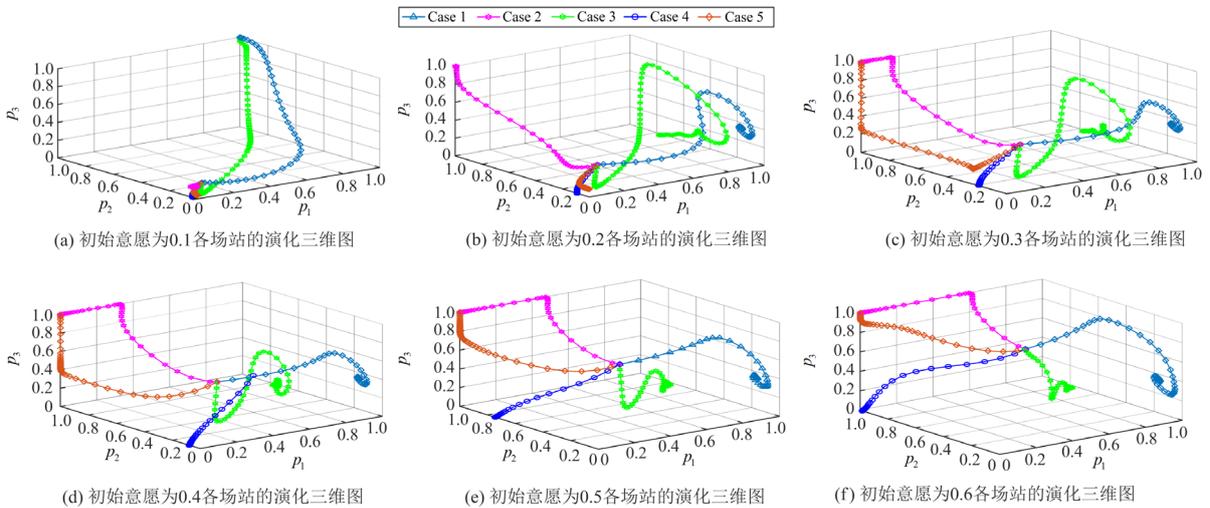


图 7 不同初始意愿下各场站在不同上网电价下的演化结果  
Fig. 7 Evolution results of stations under different initial intentions

他电站的能量互济与合作共享。对不同类型电站设置不同上网价格可促进多能互补, 可增加各场站合作行为演化中的稳定点。

2) 新能源场站装机容量

将各新能源场站的装机容量分别设置为不同情形, 如表 6 所示。

表 6 不同情形对应的新能源场站规模

Table 6 Scale of new energy stations in different situations

场站	不同情形新能源组件规模/kWh				
	Situ 1	Situ 2	Situ 3	Situ 4	Situ 5
MB1(风电)	40	49.5	60	70	110
MB2(光伏)	50	60	60	80	110
MB3(风电)	40	49.5	60	60	110

假设在不同主体初始参与合作的意愿均为 0.5, 上网电价设置风电、光伏均值 450 元/MWh 时, 各新能源场站在不同场站规模下的演化过程如图 8 所示。

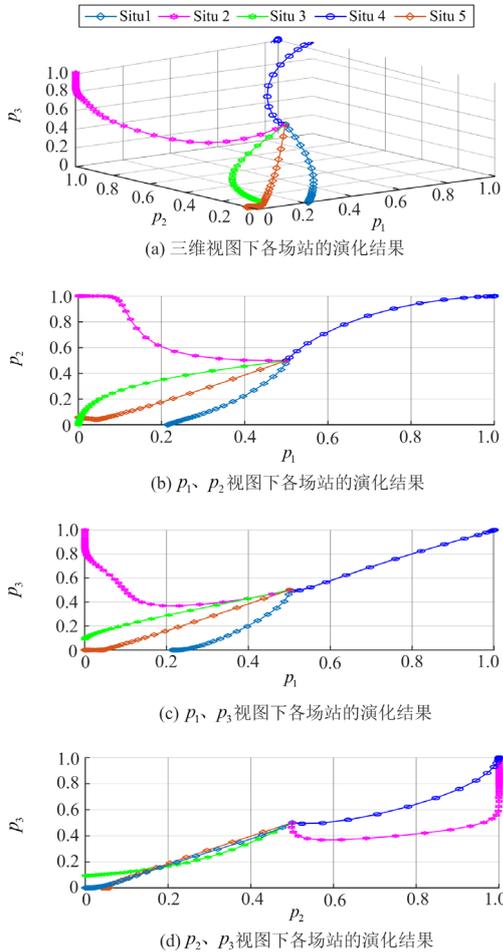


图 8 各新能源场站在不同场站规模下的演化结果  
Fig. 8 Evolution results of new energy stations under different installed capacity

从图 8 易看出各场站中新能源装机容量对其参与合作的意愿影响明显, 不同情况对应的不同电价中各主体的演化行为轨迹完全趋向于不同方向。在各场站装机容量规模较小时(Situ1), 各场站均无法达到直供电与自平衡需求, 由于场站 1 热负荷占比较大、投资占比也相应较大, 为保证其最低收益,  $p_1$  收敛于 0.2 左右,  $p_2$ 、 $p_3$  则收敛于 0。结合图 A1 易看出, 场站 2、3 中负荷类型、占比相当, 而场站 1 中热负荷占比较大, 随着装机容量增加, 场站 2、3 会更加愿意参与合作, 此时  $p_2$ 、 $p_3$  收敛于 1(Situ 2)。随着场站装机容量不断增加(Situ 3), 各场站可满足大多时段的直购电与内部用能需求,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  逐渐趋向于不参与合作; 由于场站 2、3 热负荷较少, 对低碳综合微网氢储能系统的投资占比比较少,

$p_2$ 、 $p_3$  收敛于 0, 场站 1 热负荷占比较大, 相应投资占比较大, 为保证其固定收益, 但又受  $p_2$ 、 $p_3$  合作行为影响, 收敛于 0.1 左右。随着场站装机容量再次增加(Situ 4), 各场站为增强其友好并网能力, 更多电量上网以获得更大利润, 具有相同负荷类型与占比的场站  $p_2$ 、 $p_3$  又会意愿参与合作, 此时  $p_2$ 、 $p_3$  收敛于 1。随着装机容量持续增加(Situ 5), 各场站发电能力远远大于其直供电与内部消耗量, 上网电量带来的收益也远远大于联合投资成本, 多主体更加愿意各自为政,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  均逐渐趋向于 0。为探究初始意愿临界值随各场站装机容量的变化情况, 分析在不同初始意愿下各场站的演化结果见附录 A 图 A2。对比图 5 易看出三方参与合作初始意愿的临界值未受各场站装机容量的变化而发生明显改变, 均在 0.4~0.5 之间, 当各主体初始意愿值均小于该临界值时, 最终趋于原点, 但未收敛至  $E_1(0,0,0)$ 。

基于上述分析, 新能源场站可根据自身装机容量与直供电和内部用能需求进行行为决策。当自身装机容量不足时, 提高装机容量为达到定值收益的首要选择; 处于优势地位的场站(装机容量较大)应选择与自身供用能需求类型、占比相似的场站之间进行合作, 以进一步提升收益; 另外提高其他参与主体初始参与合作的意愿, 也是促进合作, 增加合作行为演化稳定点的有效途径。

## 6 结论

为解决多新能源场站在有限理性下共建共享低碳综合微网氢储能系统的非对称性决策问题, 本文研究了多新能源场站在联合投资中策略行为的演化过程, 通过算例仿真得出如下结论。

- 1) 演化博弈克服传统博弈得到方案过于理想化的缺点, 也无需兼顾整体理性与个体理性对收益进行再次分配, 比完全信息公开化博弈具有更强的适用性。
- 2) 政府可通过发布合理的上网电价、对间断性发电特征的电站给予适当补助、细化电价设置以应对不同区域、不同类型资源来激励新能源电站的决策行为, 促进多电站的能量互济与多能互补。
- 3) 新能源场站可根据自身装机容量与直供电和内部用能需求进行行为决策, 提高自身装机容量是保证定值收益的途径; 与供用能需求类型占比相似的场站之间进行合作、提高其他主体初始参与合作的意愿是进一步提高收益的途径。

此外, 考虑到现实中造成各主体合作或不合作决策的因素是多样的, 故需对参与者的行为决策进行细化, 后续将研究不同场景中、在离散与连续策略集上多主体的行为演化。

附录 A

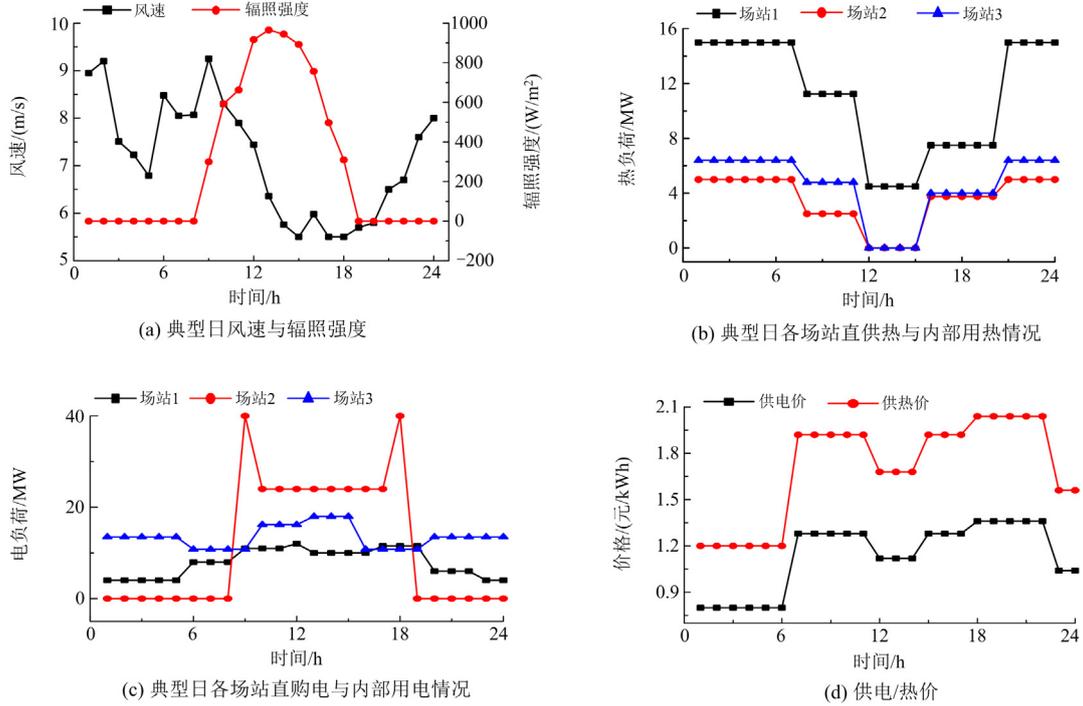


图 A1 发、用电相关参数

Fig. A1 Relevant parameters of power generation and consumption

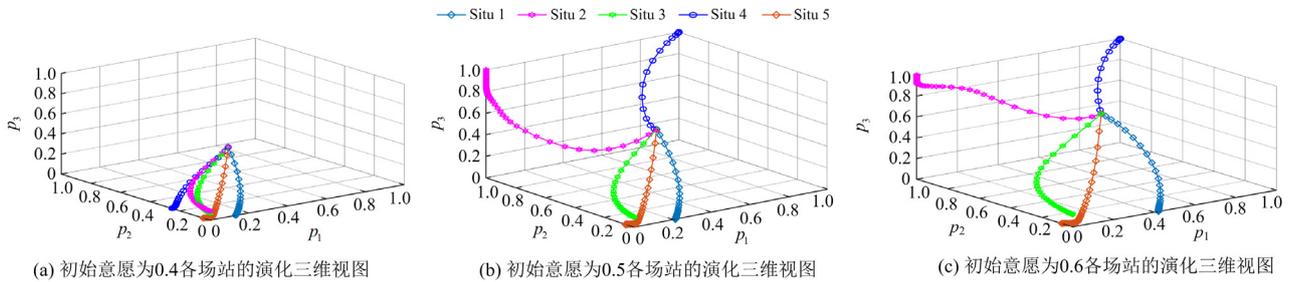


图 A2 不同初始意愿下各场站在不同装机容量下的演化结果

Fig. A2 Evolution results of stations under different initial intentions

表 A1 各类装置设备参数

Table A1 Parameters of various devices and equipment

参数	取值	参数	取值
$\xi_{ele}/(\text{元}/\text{kW})$	900	$\psi_{ele}/\%$	4
$\xi_{fuel}/(\text{元}/\text{kW})$	430	$\psi_{fuel}/\%$	4
$\xi_{H_2}/(\text{元}/\text{kg})$	10	$\psi_{H_2}/\%$	1
$\xi_{ch}/(\text{元}/\text{kW})$	20	$\psi_{ch}/\%$	1
$\xi_{ther}/(\text{元}/\text{kWh})$	0.6	$\psi_{ther}/\%$	4
$\eta_{ele}/\%$	60	$\eta_{fuel}/\%$	60
$\eta_{ch}/\%$	95	$\eta_{ex}/\%$	80
设备寿命 $m/\text{年}$	20	$\gamma/\%$	10
$\beta_{dr}$	500	—	—

参考文献

[1] 武梦景, 万灿, 宋永华, 等. 含多能微网群的区域电热综合能源系统分层自治优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 20-29.  
WU Mengjing, WAN Can, SONG Yonghua, et al. Hierarchical autonomous optimal dispatching of district integrated heating and power system with multi-energy microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 20-29.

[2] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄, 等. 计及电热需求响应的共享储能容量配置与动态租赁模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 24-32.

- SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Shared energy storage capacity allocation and dynamic lease model considering electricity-heat demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 24-32.
- [3] 王瑞, 程杉, 汪业乔, 等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 12-21.
- WANG Rui, CHENG Shan, WANG Yeqiao, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 12-21.
- [4] 田福银, 马骏, 王灿, 等. 基于双层主从博弈的综合能源系统多主体低碳经济运行策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 184-193.
- IAN Fuyin, MA Jun, WANG Can, et al. Multi-agent low-carbon and economy operation strategy of integrated energy system based on bi-level master-slave game[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 184-193.
- [5] 骆钊, 刘德文, 沈鑫, 等. 综合能源系统优化运行技术研究综述[J]. 电力建设, 2022, 43(12): 3-14.
- LUO Zhao, LIU Dewen, SHEN Xin, et al. Review of research on optimal operation technology of integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(12): 3-14.
- [6] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11-20.
- LI Jianqiang, TU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [7] 马喜平, 沈渭程, 甄文喜, 等. 基于低碳目标的电气综合能源系统优化调度策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 116-122.
- MA Xiping, SHEN Weicheng, ZHEN Wenxi, et al. A study on the optimal scheduling strategy of electric-gas-thermal integrated energy system based on low carbon target[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 116-122.
- [8] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 83-94.
- ZHANG Hong, YUAN Tiejia, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-94.
- [9] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75-83.
- JING Tao, CHEN Geng, WANG Zihao, et al. Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 75-83.
- [10] 韩子娇, 那广宇, 董鹤楠, 等. 考虑灵活性供需平衡的含电转氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 161-169.
- HAN Zijiao, NA Guangyu, DONG Henan, et al. Robust optimal operation of integrated energy system with P2H considering flexibility balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 161-169.
- [11] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 507-516.
- XIONG Yufeng, SI Yang, ZHEN Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on Stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [12] PAN Guangshen, WEI Gu, LU Yupin, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [13] SALAMA H S, MAGDY G, BAKEER A. Adaptive coordination control strategy of renewable energy sources, hydrogen production unit, and fuel cell for frequency regulation of a hybrid distributed power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 472-489.
- [14] 李晶, 李永波, 钱寒晗, 等. 考虑售电公司最优经营策略的曲线交易机制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 69-77.
- LI Jing, LI Yongbo, QIAN Hanhan, et al. Curve trading mechanism design considering the optimal management strategy of electricity retailers[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 69-77.
- [15] 陈玥, 刘锋, 魏犇, 等. 需求侧能量共享: 概念、机制与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 1-11.
- CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 1-11.
- [16] 窦迅, 王俊, 王湘艳, 等. 基于演化博弈的区域电-气互联综合能源系统用户需求侧响应行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3775-3786.
- DOU Xun, WANG Jun, WANG Xiangyan, et al. Analysis of user demand side response behavior of regional integrated power and gas energy systems based on evolutionary game[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3775-3786.

- [17] 陈健, 刘玉田, 张文, 等. 基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 45-52.  
CHEN Jian, LIU Yutian, ZHANG Wen, et al. Optimal sizing analysis of multilevel microgrids in distribution network based on game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 45-52.
- [18] 简川黔, 刘继春, 蒲天骄, 等. 共建共享模式下考虑需求响应的多售电主体风光储容量优化方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 206-214.  
JIAN Chuanqian, LIU Jichun, PU Tianjiao, et al. Wind-photovoltaic-storage capacity optimization method for multiple electricity sell entities considering demand response under co-construction and sharing mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 206-214.
- [19] KALATHIL D, WU Chenye, POOLLA K, et al. The sharing economy for the electricity storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(1): 556-567.
- [20] 刘亚锦, 代航, 刘志坚, 等. 面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 256-264.  
LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, et al. Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial user[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 256-264.
- [21] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 360-366.  
SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 360-366.
- [22] 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, 10.  
LU Mingfang, LI Xianshan, LI Fei, 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, 10.
- [23] WANG Jiangjiang, CHEN Yuzhu, NOAM L. Exergo-economic analysis method and optimization of a novel photovoltaic/thermal solar-assisted hybrid combined cooling, heating and power system[J]. Energy Conversion & Management, 2019, 199(11): 111941-111945.
- [24] ZHANG Wei, ANDREA V, GU Lixing, et al. Integrating emerging and existing renewable energy technologies into a community-scale microgrid in an energy-water nexus for resilience improvement[J]. Applied Energy, 2020, 279(12): 115716.
- [25] 司杨, 陈来军, 陈晓弢, 等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 3-10.  
SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 3-10.
- [26] CHEN Yue, WEI Wei, LIU Feng, et al. Energy trading and market equilibrium in integrated heat-power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4080-4094.
- [27] 黄南天, 包佳瑞琦, 蔡国伟, 等. 多主体联合投资微电网源-储多策略有限理性决策演化博弈容量规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1212-1225, 1412.  
HUANG Nantian, BAO Jiaruiqi, CAI Guowei, et al. Multi-agent joint investment microgrid source-storage multi-strategy bounded rational decision evolution game capacity planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1212-1225, 1412.
- [28] 程乐峰, 杨汝, 刘贵云, 等. 多群体非对称演化博弈动力学及其在智能电网电力需求侧响应中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 20-36.  
CHENG Lefeng, YANG Ru, LIU Guiyun, et al. Multi-population asymmetric evolutionary game dynamics and its applications in power demand-side response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 20-36.
- [29] 李笑竹. 双轨制下考虑源荷不确定性的鲁棒交易与运行策略研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.  
LI Xiaozhu. Research on robust trading and operation strategy considering uncertainty under dual-track system[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.
- [30] SEYEDALI M, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [31] 刘小龙. 基于统计指导的飞蛾扑火算法求解大规模优化问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 901-908.  
LIU Xiaolong. Moth-flame algorithm based on statistical guidance for large-scale optimization problems[J]. Control and Decision, 2020, 35(4): 901-908.

收稿日期: 2023-03-26; 修回日期: 2023-08-24

作者简介:

赵海岭(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场交易机制、微网储能交易策略及电力系统调度与控制;  
E-mail: 308620320@qq.com

王维庆(1959—), 男, 通信作者, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统自动化和风电机组智能控制。  
E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 张颖)