

# 不完全信息下基于网络演化博弈的微电网能源交易策略

张启亮<sup>1,2</sup>, 武建荣<sup>1†</sup>

- (1. 华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003;  
2. 保定市综合能源系统状态检测与优化调控重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 随着分布式发电和微电网技术的快速发展, 微电网能源交易策略对于提高清洁能源消纳和推动微电网建设至关重要. 能源交易过程中的信息不全会导致交易参与者的决策具有不确定性, 进而影响能源供应的稳定性和可靠性. 针对这一问题, 本文基于网络演化博弈理论研究了不完全信息条件下微电网能源交易策略. 首先, 根据微电网和主电网运营商的策略更新规则, 建立不完全信息条件下微电网能源交易的网络演化博弈模型, 该模型能够有效描述交易参与者在不完全信息条件下的策略演化动态. 其次, 利用矩阵半张量积, 得到基于网络演化博弈的微电网能源交易模型的代数形式. 在此基础上, 提出计算博弈均衡集合的算法和判断微电网能源交易模型收敛性的准则. 最后, 仿真例子验证了本文结果的有效性. 通过本文提出的方法, 可以有效分析不完全信息对微电网能源交易策略演化以及模型收敛性的影响.

**关键词:** 网络演化博弈; 矩阵半张量积; 不完全信息博弈; 微电网; 能源交易管理

**中图分类号:** TM732 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2025.0364

**引用格式:** 张启亮, 武建荣. 不完全信息下基于网络演化博弈的微电网能源交易策略 [J]. 控制与决策, xxxx, x(x): xxxx-xxxx.

## Networked evolutionary game-based energy trading strategy for microgrids considering incomplete information

ZHANG Qi-liang<sup>1,2</sup>, WU Jian-rong<sup>1†</sup>

(1. Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Baoding Key Laboratory for Condition Detection and Optimal Regulation of Comprehensive Energy System, Baoding 071003, China)

**Abstract:** With the rapid development of distributed generation and microgrid technologies, energy trading strategies in microgrids have become crucial for enhancing clean energy utilization and promoting microgrid construction. Incomplete information in the energy trading process leads to decision-making uncertainty among participants, which affects the stability and reliability of energy supply. To address this issue, this paper investigates microgrid energy trading strategies under incomplete information based on networked evolutionary game theory. First, a networked evolutionary game model for microgrid energy trading under incomplete information is established based on the strategy updating rules of microgrids and the main grid operator. This model effectively captures the strategy evolution dynamics of trading participants under incomplete information. Second, using the semi-tensor product of matrices, the algebraic form of the energy trading model based on networked evolutionary game theory is derived. On this basis, an algorithm for computing the game equilibrium set and a criterion for determining the convergence of the energy trading model are proposed. Finally, a simulation example verifies the effectiveness of the proposed results. The proposed method effectively analyzes the impact of incomplete information on the evolution of microgrid energy trading strategies and the convergence of the energy trading model.

**Keywords:** networked evolutionary game; matrix semi-tensor product; incomplete information game; microgrid; energy trading management

收稿日期: 2025-04-09; 录用日期: 2025-08-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62203172); 河北省自然科学基金项目 (F2024502008); 中央高校基本科研业务费 (2024MS141, 2025JC009).

责任编辑: 马大中.

†通信作者. E-mail: wujianrong@ncepu.edu.cn.

## 0 引言

微电网作为一种灵活高效的能源系统解决方案和重要的能源载体,对于能源转型和可持续发展具有重要作用<sup>[1]</sup>.为提高能源利用效率,微电网之间以及微电网与主电网之间通过能源交易实现能量共享.微电网能源交易是实现分布式能源高效利用和经济效益最大化的核心手段,也是促进能源共享、优化供需匹配的重要途径.设计合理的微电网能源交易策略不仅能够促进可再生能源的消纳、缓解主电网的压力,还能提高能源系统的可靠性<sup>[2-3]</sup>.因此,微电网能源交易策略的研究对于能源的转型和电力市场的发展具有重要意义.

根据微电网产电量的不同,可以将微电网分为多电微电网 (multi-energy microgrid, MEMG) 和少电微电网 (low-energy microgrid, LEMG)<sup>[4]</sup>. MEMG 能够满足自身能源需求,还能利用其较强的能源生产能力产生多余能源.这些多余能源可以通过能源交易市场出售给主电网或能源供应不足的 LEMG,从而有效实现能源资源的优化配置和经济效益的最大化. LEMG 因可再生能源匮乏或发电效率较低而无法自身满足能源需求,因此 LEMG 通过能源交易市场从主电网或 MEMG 购买所需的能源以保障自身的能源供应和维持正常运行.主电网作为传统的大规模集中式电力供应系统,承担着能源供需平衡的重要职能.然而,在能源需求迅速增长和发电资源受限的情况下,特别是用电高峰时段,主电网常面临供电压力,通过能源交易市场从 MEMG 获得能源是缓解主电网的供电压力的有效方式<sup>[5]</sup>.

在通信过程中,由于网络时滞和数据丢失等因素的影响,不完全信息现象时有发生<sup>[6]</sup>.不完全信息在微电网能源交易中主要表现为交易各方无法全面掌握其他参与者的策略信息,这会影响微电网能源交易策略的准确性,进而导致能源供应的可靠性和稳定性的降低,甚至使能源交易机制失效<sup>[7]</sup>.对于不完全信息条件下的微电网能源交易问题,学者们已经取得了一些有意义的研究成果.文献 [8] 提出了一种不完全信息下基于多代理深度强化学习的发电商竞价策略,优化了发电商报价策略并提高了发电商收益,但是该研究主要聚焦于发电侧主体,未涉及用户侧的行为建模与市场互动过程.文献 [9] 提出了不完全信息下电力供需双方的双边博弈模型,能够实现短期直购电价和直购电量的预测,但模型在长期预测中的稳定性和适应性仍有待验证.文献 [10] 构建了公用事业公司、电信运营商和电商之间的三阶

段博弈模型,通过中继功率分配和能源交易定价策略,提升了智能电网中的通信效率与系统经济性.文献 [11] 建立了不完全信息博弈下的电力市场模型,分析并验证了分布式发电与可中断负荷、发电公司策略行为及不完全信息对市场均衡的影响.文献 [12] 考虑电力市场环境下游荷侧的多边不完全信息博弈行为以及其市场选择概率的动态演化过程,提出了一种基于多边不完全信息演化博弈的配电网规划方法,有效提升了配电网在实际的电力市场下的规划策略的有效性和精确性.然而,已有成果主要侧重于研究不完全信息条件下电力市场中的供需双方的博弈行为及优化方法,忽视了参与者策略在演化动态下的调整机制,没有充分分析不完全信息对微电网能源交易策略动态演化过程的影响,难以全面刻画微电网在实际运行中所面临的博弈复杂性和行为适应性.因此,建立有效的模型来刻画不完全信息条件下微电网能源交易策略的动态演化过程具有重要的理论和实际意义.

博弈理论能够有效刻画交易参与者之间复杂的交互行为,尤其是在多个利益者参与的环境下,博弈方法可以精准对其决策过程进行建模,这使其已经成为分析微电网能源交易机制的主要研究方法之一<sup>[13]</sup>.博弈模型能够分析和预测市场中各参与者的策略动态演化并提供长期稳定的解决方案<sup>[14]</sup>.这些优势使得博弈方法在微电网能源交易中的应用具有重要的理论和实践意义.截至目前,许多博弈理论已经成功应用于微电网能源交易机制分析,包括势博弈<sup>[15-16]</sup>、纳什博弈<sup>[17-18]</sup>、Stackelberg 博弈<sup>[19-20]</sup>等.然而,传统博弈方法构建的能源交易模型存在着一定的局限性.首先,传统的博弈模型通常依赖于参与者绝对理性的假设,忽略了实际能源交易中个体的主观偏好.其次,传统博弈模型多以静态分析为主,难以通过严格的数学推导对系统特性进行定量分析,因而在对系统长期演化趋势及稳定性分析方面存在局限性.网络演化博弈是演化博弈的广义化形式,它能够有效刻画博弈参与者策略演化的动态过程,可以通过其代数形式对模型进行定量分析,用于研究多个参与者动态交互过程中的长期演化行为<sup>[21]</sup>.鉴于此,本文采用网络演化博弈研究不完全信息条件下的微电网能源交易策略.

在网络演化博弈中,网络图中的节点和边分别表示博弈的参与者及其相互关系.每个参与者根据策略更新规则,结合其邻居的策略和收益信息,动态地调整自身策略,以实现收益最大化.借助矩阵半张量积,可以得到网络演化博弈策略演化方程的代数

形式, 进而对网络演化博弈的动态演化进行量化分析<sup>[22-23]</sup>. 目前, 仅有少量成果应用网络演化博弈理论研究能源交易问题. 文献 [24] 利用网络演化博弈理论对考虑居民用户和公用事业公司交互决策的需求响应进行了建模和控制, 通过反馈控制实现了对需求响应模型的动态调控. 文献 [25] 提出了一种二元最优控制算法来优化网络演化博弈的暂态性能, 有效地将智能电网的总成本降到了最低. 文献 [26] 基于半张量积方法, 利用势博弈对智能电网中的需求侧管理问题进行建模, 提出了状态反馈控制策略引导系统收敛至最优纳什均衡. 文献 [27] 将网络化智能电网建模为一种特殊的网络演化博弈模型, 通过间歇式开环与状态反馈控制, 实现了系统稳定性和全局收敛性, 降低了智能电网的整体成本和控制执行时间. 然而, 已有文献都是基于完全信息条件建立的需求响应问题模型. 不完全信息会导致参与者无法准确掌握其他参与者的策略和收益信息, 从而给微电网能源交易增加更多的不确定性和复杂性. 这使得已有结果不能应用于分析不完全信息条件下微电网的能源交易策略.

综上所述, 本文研究不完全信息条件下微电网的能源交易策略, 建立不完全信息条件下微电网能源交易的网络演化博弈模型, 借助矩阵半张量积得到不完全信息条件下微电网能源交易模型的代数形式, 构建不完全信息条件下微电网能源交易策略. 主要贡献如下:

1) 通过分析参与者的策略更新规则, 建立了不完全信息条件下微电网能源交易的网络演化博弈模型, 该模型能够有效描述交易参与者在不完全信息条件下策略演化的动态过程.

2) 借助矩阵半张量积, 得到了基于网络演化博弈的微电网能源交易模型的代数形式. 在此基础上, 提出计算博弈均衡集合的算法, 并给出判断不完全信息条件下微电网能源交易网络演化博弈模型收敛性的准则.

## 1 网络演化博弈理论

有限博弈是网络演化博弈的基础构成, 首先给出有限博弈的定义.

**定义 1**<sup>[21]</sup> 有限博弈  $\mathcal{G} = (N, S, C)$  包含以下三个元素:

1)  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  表示  $n$  个博弈参与者所构成的集合.

2)  $S = \prod_{i=1}^n S_i$  表示局势集合, 其中  $S_i$  是第  $i$  个参与者的策略集合.

3)  $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  是所有参与者的收益集合,  $c_i$  表示参与者  $i$  在当前局势下的收益.

网络演化博弈是有限博弈的扩展形式. 在网络演化博弈中, 用无向连接图  $(N, E)$  描述博弈参与者之间的相互作用, 则可以得到一个依赖于各参与者策略更新规则的网络演化博弈, 具体定义如下.

**定义 2**<sup>[21]</sup> 网络演化博弈  $\mathcal{G}_{(N,E)} = ((N, E), \mathcal{G}_{N_E}, F)$  包含以下四个元素:

1)  $(N, E)$  表示网络图,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  为网络图中节点的集合, 表示  $n$  个参与者构成的集合,  $E \subset N \times N$  为边集.

2)  $\mathcal{G}_{N_E} = \{\mathcal{G}_{ij} \mid (i, j) \in E\}$  表示有限博弈,  $\mathcal{G}_{ij}$  表示相邻的参与者  $i$  和参与者  $j$  进行博弈.

3)  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  表示参与者的策略更新规则的集合,  $f_i$  是参与者  $i$  的策略更新规则.

借助矩阵半张量积可以得到网络演化博弈中每个参与者策略更新规则的代数形式. 矩阵半张量积的定义如下.

**定义 3**<sup>[21]</sup> 给定  $m \times n$  维矩阵  $A$  和  $p \times q$  维矩阵  $B$ ,  $t$  是  $n$  和  $p$  的最小公倍数, 则  $A$  与  $B$  的半张量积为

$$A \ltimes B = (A \otimes I_{t/n})(B \otimes I_{t/p}). \quad (1)$$

当  $n = p$  时, 矩阵  $A$  和矩阵  $B$  的半张量积与传统的矩阵乘法相同. 本文所有的矩阵乘法都是基于半张量积, 为了方便叙述, 将符号 “ $\ltimes$ ” 省略. 在矩阵半张量积的框架下, 建立  $\mathcal{D}_k = \{1, 2, \dots, k\}$  和  $\Delta_k := \{\delta_k^i \mid i = \{1, 2, \dots, k\}\}$  之间的映射关系, 其中  $i \sim \delta_k^i$ ,  $i \in \mathcal{D}_k$ , “ $\sim$ ” 表示逻辑等价.

**引理 1**<sup>[24]</sup> 设  $X_i \in \mathcal{D}_k$ ,  $x_i \in \Delta_k$ ,  $X_i - x_i$ ,  $i = [1, n]$ ,  $k$  值逻辑函数  $f: \mathcal{D}_k^n \rightarrow \mathcal{D}_k$ , 则存在唯一的  $k \times k^n$  维的矩阵  $M_f$ , 使得

$$f(X_1, X_2, \dots, X_n) = M_f \ltimes_{i=1}^n x_i. \quad (2)$$

本文将构建基于网络演化博弈的微电网能源交易模型, 利用其代数形式研究不完全信息条件下微电网能源交易策略.

## 2 不完全信息条件下微电网能源交易的网络演化博弈模型

### 2.1 参与者的策略更新规则

为建立不完全信息条件下微电网能源交易网络演化博弈模型, 作出以下假设说明:

假设 1: 在能源交易中不考虑微电网的物理约束, 包括传输容量和能量损耗.

假设 2: 为保证模型具备可解析性和可控的计算复杂度, 以固定的信息丢失概率来描述通信过程中

的不完全信息问题.

本文研究的微电网能源交易框架如图1所示. 能源交易是在主电网运营商(表示为 $\mathcal{K}$ ), LEMG(表示为 $\mathcal{U}_i, i = [1, M]$ )和 MEMG(表示为 $\mathcal{V}_j, j = [1, N]$ )之间进行的. 在高峰负荷时段, 主电网常面临供电压力. 从 MEMG 购买能源成为主电网缓解用电压力的一种重要手段. MEMG 由于能源生产能力强于自身负荷需求, 在满足自用的同时, 将生产的多余能源通过能源交易的方式出售给主电网和 LEMG. LEMG 因其可再生能源资源较为匮乏和发电效率低, 往往无法满足自身用电需求, 需要通过能源交易从主电网或 MEMG 获取所需电力. 主电网在该能源交易中有两个角色:



图1 微电网能源交易框架

1) 向 LEMG 出售能源. 主电网运营商此时的策略是将能源以高价或者低价出售给 LEMG, 用 $K_1(t)$ 表示为

$$K_1(t) = \begin{cases} \partial_1^h, & \text{向 LEMG 高价出售能源,} \\ \partial_1^l, & \text{向 LEMG 低价出售能源.} \end{cases} \quad (3)$$

2) 向 MEMG 购买能源. 主电网运营商此时的策略是向 MEMG 高价或者低价收购能源, 用 $K_2(t)$ 表示为

$$K_2(t) = \begin{cases} \partial_2^h, & \text{向 MEMG 高价收购能源,} \\ \partial_2^l, & \text{向 MEMG 低价收购能源.} \end{cases} \quad (4)$$

LEMG 由于能源储备不足, 无法满足用电需求, 需要依赖外部供电. 因此, LEMG 的策略是从 MEMG 或者主电网处购买能源.  $\mathcal{U}_i$  在第 $t$ 轮交易中选择的策略表示为

$$U_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{向主电网购买能源,} \\ 2, & \text{向MEMG购买能源.} \end{cases} \quad (5)$$

MEMG 的策略是将生产的多余能源出售给 LEMG 或者主电网.  $\mathcal{V}_j$  在第 $t$ 轮交易中选择的策略表示为

$$V_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{向主电网出售能源,} \\ 2, & \text{向LEMG出售能源.} \end{cases} \quad (6)$$

此外, 在每轮交易结束时进行收益结算, 主电网和各微电网都会获得相应的收益. 具体地, 第 $t$ 个参与者在第 $t$ 轮能源交易中获得的收益为

$$C_i(t) = \frac{1}{|\mathcal{N}(i)| - 1} \sum_{j \in \mathcal{N}(i) \setminus \{i\}} C_{ij}(t), \quad (7)$$

式中:  $i \in [1, M + N]$ ,  $\mathcal{N}(i)$  表示第 $i$ 个参与者的所有邻居集合,  $C_{ij}$  是指第 $i$ 个参与者在第 $t$ 轮交易中从第 $j$ 个参与者处所获得的收益.

主电网运营商、LEMG 和 MEMG 之间的交易关系及策略如图2所示. 在每轮交易开始前每个参与者选择合适的策略以追求各自在此轮能源交易中的最大收益.

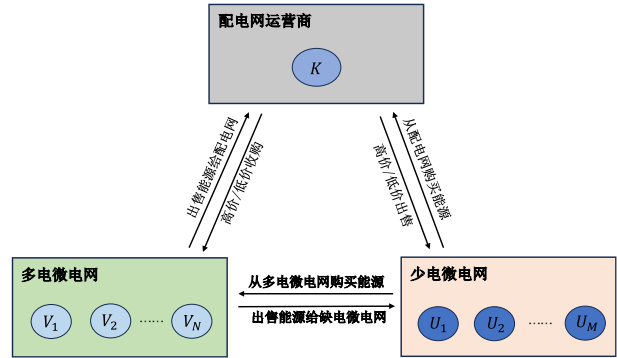


图2 LEMG、MEMG 和主电网运营商的交易策略关系

策略更新规则 (strategy updating rules, SURs) 是模拟参与者在博弈过程中根据收益和策略信息调整自己策略的关键机制, 在网络演化博弈中占据核心地位. 本文能源交易所包含三种策略更新规则为: 主电网运营商的策略更新规则 (SUR-I), 价格驱动策略 (SUR-II) 和逆向投资策略 (SUR-III). 参与者所采用的策略更新规则描述如下:

1) 主电网运营商的策略更新规则 (SUR-I)

SUR-I 是一种主电网运营商基于与其进行交易的微电网数量调整交易价格的机制, 反映了一种需求响应激励机制的实际运营逻辑. 主电网运营商所设定的能源交易价格与交易量有关, 而能源交易量和与主电网运营商交易的微电网数量呈线性关系, 因此主电网运营商对 LEMG 和 MEMG 分别设置了特定的阈值, 从而引导微电网的交易行为. 主电网运营商有对 LEMG 和 MEMG 两种角色, 因此策略更新规则也分为两种. 主电网运营商对 LEMG 的决策逻辑表示为

$$K_1(t) = \bar{h}_1^{(I)}(U_i(t), C_{U_i}(t); \mathcal{U}_i \in \mathcal{N}_1(\mathcal{K})) = \begin{cases} \partial_1^h, \vartheta > \vartheta_R, \\ \partial_1^l, \vartheta \leq \vartheta_R, \end{cases} = h_1^{(I)}(U_1(t), U_2(t), \dots, U_M(t)). \quad (8)$$

式中:  $\vartheta$ 表示从主电网处购买能源的 LEMG 数量,  $\vartheta_R$ 表示主电网运营商设定的阈值,  $C_{U_i}(t)$ 表示 $\mathcal{U}_i$ 在第 $t$ 轮能源交易中获得的收益. SUR-I 表示 LEMG 的策略集合  $\{U_1(t), U_2(t), \dots, U_M(t)\}$ 到主电网策略  $K_1(t)$ 的映射, 并且  $\mathcal{N}_1(\mathcal{K}) = \{\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2, \dots, \mathcal{U}_M\}$ . 由式 (7) 可以看出, 式 (8) 中的  $C_{U_i}(t)$ 仅依赖于  $U_i(t)$ . 因此,  $K_1(t)$ 取决于  $\{U_1(t), U_2(t), \dots, U_M(t)\}$ . 当从主电网处购买能源的 LEMG 数量超过设定的阈值时, 主电网运营商将能源的出售价格设置为高价, 以获得更大的收益; 当从主电网购买能源的 LEMG 数量未超过设定的阈值时, 主电网运营商将能源的出售价格设置为低价, 以吸引更多的 LEMG 购买. 主电网运营商对 MEMG 的决策逻辑表示为

$$K_2(t) = \bar{h}_2^{(I)}(V_j(t), C_{V_j}(t); \mathcal{V}_j \in \mathcal{N}_2(\mathcal{K})) = \begin{cases} \partial_2^h, \bar{\vartheta} < \bar{\vartheta}_Z, \\ \partial_2^l, \bar{\vartheta} \geq \bar{\vartheta}_Z, \end{cases} = h_2^{(I)}(V_1(t), V_2(t), \dots, V_N(t)). \quad (9)$$

式中:  $\bar{\vartheta}$ 表示将能源出售给主电网的 MEMG 数量,  $\bar{\vartheta}_Z$ 表示主电网运营商设定的阈值,  $C_{V_j}(t)$ 表示 $\mathcal{V}_j$ 在第 $t$ 轮能源交易中获得的收益. SUR-I 表示 MEMG 的策略集合  $\{V_1(t), V_2(t), \dots, V_N(t)\}$ 到主电网运营商的策略  $K_2(t)$ 的映射, 并且  $\mathcal{N}_2(\mathcal{K}) = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \dots, \mathcal{V}_N\}$ . 由式 (7) 可得, 式 (9) 中的  $C_{V_j}(t)$ 仅依赖于  $V_j(t)$ . 因此,  $K_2(t)$ 取决于  $\{V_1(t), V_2(t), \dots, V_N(t)\}$ . 当出售能源给主电网的 MEMG 数量超过设定的阈值时, 主电网运营商将能源收购价格设置为低价, 减少支出以获得更大的收益; 当出售能源给主电网的 MEMG 数量未超过设定阈值时, 主电网运营商将能源收购价格设置为高价, 以吸引更多的 MEMG 进行交易.

## 2) 适用于微电网的价格驱动策略 (SUR-II)

SUR-II 是指参与能源交易的微电网根据上一轮交易报价信息, 选择报价更优、可带来更大收益的一方进行交易. 具体来说, LEMG 根据上轮交易中主电网运营商和 MEMG 的能源出售价格, 在下一轮中选择价格较低的一方的进行交易; MEMG 根据上轮交易中主电网运营商和 LEMG 的能源购买价格, 在下一轮中选择价格较高的一方的进行交易. 此策略是一种基于最优响应原理的动态决策行为.

选择 SUR-II 的 $\mathcal{U}_i$ 比较上一轮能源交易中 MEMG

和主电网运营商的能源出售价格, 在下一轮交易开始前做出决策, 选择出售价格较低的一方进行购买. 选择 SUR-II 的 $\mathcal{U}_i$ 的决策逻辑表示为

$$U_i(t+1) = \begin{cases} \bar{f}_i^{(II)}(K_1(t), U_\alpha(t), V_\beta(t), C_{\mathcal{K}, \mathcal{U}_\alpha, \mathcal{V}_\beta \in \mathcal{N}_{II}(\mathcal{U}_i)}(t)) = \\ \begin{cases} 1, K_1(t) \leq s_r, \\ 2, K_1(t) > s_r, \end{cases} = \\ \bar{f}_i^{(II)}(K_1(t), U(t), V(t)). \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\mathcal{N}_{II}(\mathcal{U}_i) = \{\mathcal{K}, \mathcal{U}_1, \dots, \mathcal{U}_M, \mathcal{V}_1, \dots, \mathcal{V}_N\}$ . 同上所述,  $c_{\mathcal{K}}(t)$ ,  $C_{U_\alpha}(t)$ 和  $C_{V_\beta}(t)$ 分别由  $K_1(t)$ ,  $U(t)$ 和  $V(t)$ 所决定. 其中  $s_r$ 表示 MEMG 与 LEMG 的能源交易价格, 它是由能源的供求关系所决定的,  $s_r$ 的计算方式如下:

$$s_r = \begin{cases} \rho_h, \hat{U}(t) > \hat{V}(t) \\ \rho_m, \hat{U}(t) = \hat{V}(t) \\ \rho_l, \hat{U}(t) < \hat{V}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\rho_h > \partial_1^h(\rho_h > \partial_2^h)$ ,  $\rho_l < \partial_1^l(\rho_l < \partial_2^l)$ ,  $\partial_1^h > \rho_m > \partial_1^l(\partial_2^h > \rho_m > \partial_2^l)$ .  $\hat{U}(t)$ 和  $\hat{V}(t)$ 的计算方式如下:

$$\begin{cases} \hat{U}(t) = \sum_{i=1}^M (U_i(t) - 1), \\ \hat{V}(t) = \sum_{j=1}^N (V_j(t) - 1), \end{cases} \quad (12)$$

类似的, 选择 SUR-II 的 $\mathcal{V}_j$ 比较上一轮能源交易中 LEMG 和主电网运营商的能源收购价格, 在下一轮能源交易中选择出价较高的一方进行出售. 选择 SUR-II 的 $\mathcal{V}_j$ 的决策逻辑表示为

$$V_j(t+1) = \begin{cases} \bar{g}_j^{(II)}(K_2(t), U_\alpha(t), V_\beta(t), C_{\mathcal{K}, \mathcal{U}_\alpha, \mathcal{V}_\beta \in \mathcal{N}_{II}(\mathcal{V}_j)}(t)) = \\ \begin{cases} 1, K_2(t) \leq s_r, \\ 2, K_2(t) > s_r, \end{cases} = \\ \bar{g}_j^{(II)}(K_2(t), U(t), V(t)). \end{cases} \quad (13)$$

## 3) 适用于微电网的逆向投资策略 (SUR-III)

SUR-III 是一种基于参与者心理的决策过程. 如果在上轮能源交易中, 与某个参与者使用相同策略的参与者数量超过了使用不同策略的参与者数量, 那么该参与者在下一轮交易中将继续选择相同的策略. 否则, 将选择不同的策略. 这种机制借鉴了行为经济学中的反向投资行为理论, 反映出市场参与者在面对“拥挤策略”时, 为了规避潜在风险和争取更大利润空间, 采取的逆向选择. 选择 SUR-III 的 $\mathcal{U}_i$ 的决策逻辑表示为

$$U_i(t+1) = \bar{f}_i^{(III)}(U_i(t), C_i(t); l \in \mathcal{N}_{III}(\mathcal{U}_i)) = \begin{cases} U_i(t), & v > \bar{v}, \\ \bar{U}_i(t), & v \leq \bar{v}, \end{cases} = f_i^{(III)}(U(t)). \quad (14)$$

式中:  $\mathcal{N}_{III}(\mathcal{U}_i) = \{\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2, \dots, \mathcal{U}_M\}$ ,  $v$  表示与  $\mathcal{U}_i$  选择相同策略的 LEMG 数量,  $\bar{v}$  是与  $\mathcal{U}_i$  选择不同策略的 LEMG 数量,  $\bar{U}_i$  是与  $U_i$  不同的策略. 类似的, 选择 SUR-III 的  $\mathcal{V}_j$  决策逻辑表示为

$$V_j(t+1) = \bar{g}_j^{(III)}(V_j(t), C_j(t); l \in \mathcal{N}_{III}(\mathcal{V}_j)) = \begin{cases} V_j(t), & \eta > \bar{\eta}, \\ \bar{V}_j(t), & \eta \leq \bar{\eta}, \end{cases} = g_j^{(III)}(V(t)). \quad (15)$$

式中:  $\mathcal{N}_{III}(\mathcal{V}_j) = (\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \dots, \mathcal{V}_N)$ ,  $\eta$  表示与  $\mathcal{V}_j$  选择相同策略的 MEMG 数量,  $\bar{\eta}$  表示与  $\mathcal{V}_j$  选择不同策略的 MEMG 数量,  $\bar{V}_j$  是与  $V_j$  不同的策略.

## 2.2 能源交易模型及其代数表示

主电网、LEMG 和 MEMG 结束一轮交易后, 在接收其他参与者的策略信息时, 由于通信过程中不可避免的出现信息受限、信息错报或通信故障等问题, 可能会导致参与者接收不到其他参与者完整的策略信息, 进而导致微电网能源交易策略波动和系统不稳定. 针对这一问题, 对不完全信息条件下微电网能源交易进行建模.

下面给出不完全信息条件下能源交易模型的代数表示, 第  $i$  个参与者策略演化的代数形式为

$$x_i(t+1) = f_i(h_1(t), h_2(t), \dots, h_n(t)) \quad (16)$$

式中:  $f_i$  表示第  $i$  个参与者的策略更新规则.  $h_j(t)$  表示第  $i$  个参与者接收到的来自第  $j$  个参与者在第  $t$  轮能源交易中的实际策略信息, 表示为

$$h_j(t) = w_j(t)x_j(t) + (1 - w_j(t))h_j(t-1). \quad (17)$$

式中:  $w_j(t) = \{0, 1\}$ . 当  $w_j(t) = 1$  时,  $h_j(t) = x_j(t)$  表示接收到的策略信息是准确的; 当  $w_j(t) = 0$  时,  $h_j = h_j(t-1)$  表示未接收到真实策略信息, 因此只能参考第  $t-1$  轮交易中接收到的策略信息  $h_j(t-1)$ . 在交易参与者通信过程中, 由于不完全信息情况是随机出现的, 因此以概率的形式描述这种随机性, 表示为  $\mathbb{P}\{w_j(t) = 1\} = p_{w_j}$ ,  $\mathbb{P}\{w_j(t) = 0\} = 1 - p_{w_j}$ . 即第  $j$  个参与者的策略信息完整通信的概率为  $p_{w_j}$ , 策略信息不完整通信的概率为  $1 - p_{w_j}$ .

令  $h_i(t) = h_{u_i}(t)$ ,  $i = [1, M]$  表示收到来自  $\mathcal{U}_i$  的实际策略信息,  $h_{M+j}(t) = h_{v_j}(t)$ ,  $j = [1, N]$  表示收到来自  $\mathcal{V}_j$  的实际策略信息, 则  $h(t) = \times_{i=1}^M h_i(t) \times_{j=1}^N$

$h_{M+j}(t)$ . 由式 (16), 得到能源交易整体策略的代数形式为

$$x(t+1) = Lh(t). \quad (18)$$

式中:  $L = L_1 * L_2 * \dots * L_{M+N}$ ,  $L_i$  是策略更新规则  $l_i$  的结构矩阵.  $h(t)$  表示为

$$h(t) = \times_{i=1}^{M+N} h_i(t) = \times_{i=1}^{M+N} [w_i(t)x_i(t) + (1 - w_i(t))h_i(t-1)] = \sum_{i_1=1}^2 \dots \sum_{i_{M+N}=1}^2 \times_{j=1}^{M+N} [\mu_{i_j}(t)z_{i_j}(t)] = \sum_{i_1=1}^2 \dots \sum_{i_{M+N}=1}^2 \prod_{j=1}^{M+N} \mu_{i_j}(t) \times_{j=1}^n [N_{i_j}x_j(t)h_j(t-1)]. \quad (19)$$

式中:  $\mu_{i_j}$  和  $z_{i_j}$  的取值如下:

$$\begin{cases} \mu_{i_j}(t) = \begin{cases} w_j(t), & \text{if } i_j = 1, \\ 1 - w_j(t), & \text{if } i_j = 2, \end{cases} \\ z_{i_j}(t) = \begin{cases} (I_2 \otimes I_2)x_j(t)h_j(t-1), & \text{if } i_j = 1, \\ (I_2 \otimes I_2)x_j(t)h_j(t-1), & \text{if } i_j = 2. \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $x_j(t)$  和  $h_j(t-1)$  的取值如下:

$$\begin{cases} x_j(t) = (1_{2^{j-1}} \otimes I_2 \otimes 1_{2^{M+N-j}})x(t) = N_{x_j}x(t), \\ h_j(t-1) = (1_{2^{j-1}} \otimes I_2 \otimes 1_{2^{M+N-j}})h(t-1) = N_{h_j}h(t-1). \end{cases} \quad (21)$$

将式 (20) 代入式 (19) 得:

$$h(t) = \sum_{i_1=1}^2 \dots \sum_{i_{M+N}=1}^2 \prod_{j=1}^{M+N} \mu_{i_j}(t) \times_{j=1}^{M+N} [N_{i_j}N_{x_j}x(t)N_{h_j}h(t-1)] = \sum_{i_1=1}^2 \dots \sum_{i_{M+N}=1}^2 \prod_{j=1}^{M+N} \mu_{i_j}(t) (A_1 * A_2 * \dots * A_{M+N}) x(t)h(t-1) = \sum_{i_1=1}^2 \dots \sum_{i_{M+N}=1}^2 \prod_{j=1}^{M+N} \mu_{i_j}(t) Z_\sigma x(t)h(t-1) = \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_\sigma(t) Z_\sigma x(t)h(t-1). \quad (22)$$

式中:  $\sigma \in \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{2^{M+N}}\} = \{\sigma(0, 0, \dots, 0), \sigma(0, 0, \dots, 1)_2, \dots, \sigma(1, 1, \dots, 1)\}$ . 每个  $A_\ell = N_{i_\ell}N_{x_\ell}(I_{2^{M+N}} \otimes N_{h_\ell})$  有 2 种选择, 因此  $Z_\sigma = A_1 * A_2 * \dots * A_{M+N}$  有  $2^{M+N}$  种选择且  $Z_\sigma \in \{Z_{\sigma_1}, Z_{\sigma_1}, \dots, Z_{\sigma_{2^{M+N}}}\}$ .  $J_\sigma(t) = \prod_{j=1}^{M+N} \mu_{i_j}(t)$  有  $2^{M+N}$  种选择且  $J_\sigma \in \{J_{\sigma_1}, J_{\sigma_1}, \dots, J_{\sigma_{2^{M+N}}}\}$ .

下面借助矩阵半张量积得到交易参与者的策略和策略更新规则的代数形式, 然后推导出不同策略更新规则下各参与者的策略演化方程. 主电网运营商采用 SUR-I, 对 LEMG 和 MEMG 的策略演化方程表示为

$$\begin{cases} k_1(t) = H_1^I \times_{i=1}^M h_{u_i}(t) = H_1^I h_u(t) \\ k_2(t) = H_2^I \times_{j=1}^N h_{v_j}(t) = H_2^I h_v(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $k_1(t)$  表示主电网运营商对 LEMG 所选策略的代数形式,  $k_2(t)$  表示主电网运营商对 MEMG 所选策略的代数形式.  $H_1^I$  和  $H_2^I$  分别表示主电网运营商对 LEMG 和 MEMG 的 SUR-I 的结构矩阵. 由式 (23) 可得, 主电网运营商的整体策略演化方程为

$$k(t) = k_1(t)k_2(t) = \bar{H} \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1) \quad (24)$$

式中:  $\bar{H} = (H_1^I(I_{2^M} \otimes 1_{2^N})^* H_2^I(I_{2^M} \otimes I_{2^N}))$ ,  $k(t)$  的组合有: 11, 12, 21 和 22. 11 表示主电网运营商的策略为高价出售和高价收购; 12 表示主电网运营商的策略为高价出售和低价收购; 21 表示主电网运营商的策略为低价出售和高价收购; 22 表示主电网运营商的策略为低价出售和低价收购. 由式 (10) 和式 (22) 可得, 选择 SUR-II 的  $u_1$  的策略演化方程表示为

$$u_i(t+1) = F_i^{(II)} h_{k_1}(t) h_{u_i}(t) h_v(t) = E_i^u \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1). \quad (25)$$

式中:  $E_i^u = F_i^{(II)} H_1 \Phi_{2^u}$ ,  $\Phi_{2^u}$  是降幂矩阵<sup>[24]</sup>,  $F_i^{(II)}$  是 SUR-II 的结构矩阵. 由式 (14) 和式 (22) 可得, 选择 SUR-III 的  $u_1$  的策略演化方程为

$$u_i(t+1) = F_i^{(III)} h_u(t) = E_i^u \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1) \quad (26)$$

式中:  $E_i^u = F_i^{(III)}(I_{2^M} \otimes 1_{2^N})$ ,  $F_i^{(III)}$  是 SUR-III 的结构矩阵. 将式 (25) 和式 (26) 相乘可得, LEMG 的整体策略演化方程为

$$u(t+1) = E^u \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1) \quad (27)$$

式中:  $E^u = E_1^u * E_2^u * \dots * E_M^u$ . 由式 (13) 和式 (22) 可得, 选择 SUR-II 的  $v_f$  的策略演化方程为

$$v_j(t+1) = G_j^{(II)} h_{k_2}(t) h_{u_i}(t) h_v(t) = E_j^v \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1). \quad (28)$$

式中:  $E_j^v = G_j^{(II)} H_2 W_{[2^M, 2^N]}(I_{2^M} \otimes \Phi_{2^N})$ ,  $W_{[2^M, 2^N]}$

是交换矩阵<sup>[24]</sup>,  $\Phi_{2^N}$  是降幂矩阵<sup>[24]</sup>,  $G_j^{(II)}$  是 SUR-II 的结构矩阵. 由式 (15) 和式 (22) 可得, 选择 SUR-III 的  $v_f$  的策略演化方程为

$$v_j(t+1) = G_j^{(III)}(1_{2^M} \otimes I_{2^N}) h(t) = E_j^v \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1). \quad (29)$$

式中:  $E_j^v = G_j^{(III)}(1_{2^M} \otimes I_{2^N})$ ,  $G_j^{(III)}$  是 SUR-III 的结构矩阵. 将式 (28) 和式 (29) 相乘可得, MEMG 的整体策略演化方程为

$$v(t+1) = E^v \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma} x(t) h(t-1) \quad (30)$$

式中:  $E^v = E_1^v * E_2^v * \dots * E_N^v$ . 将式 (27) 和式 (30) 相乘可得, LEMG 和 MEMG 的整体策略演化方程为

$$x(t+1) = u(t+1)v(t+1) = \Theta x(t)h(t-1). \quad (31)$$

式中:  $\Theta = (E^u * E^v) \sum_{\sigma=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma}(t) Z_{\sigma}$ ,  $\Theta$  有  $2^{M+N}$  种选择, 取值为  $\Theta \in \{\Theta_{\sigma_1}, \Theta_{\sigma_2}, \dots, \Theta_{\sigma_{2^{M+N}}}\}$ ,  $J_{\sigma}$  有  $2^{M+N}$  种选择,  $J_{\sigma} \in \{J_{\sigma_1}, J_{\sigma_2}, \dots, J_{\sigma_{2^{M+N}}}\}$  且  $\mathbb{P}\{J_{\sigma} = J_{\sigma_s}\} = p_{\sigma_s}$ . 由  $\Theta$  的构成可得,  $\mathbb{P}\{\Theta_{\sigma} = \Theta_{\sigma_s}\} = \mathbb{P}\{J_{\sigma} = J_{\sigma_s}\} = p_{\sigma_s}$ . 在下一节中, 将基于能源交易模型 (31) 对不完全信息条件下微电网能源交易的收敛性展开分析.

### 3 不完全信息下微电网能源交易模型的收敛性分析

微电网能源交易模型 (31) 中存在的时滞因素使得对能源交易策略演化过程的分析变得更加复杂. 针对该问题, 对能源交易模型 (31) 进行扩维处理, 以提高模型的可解析性. 令  $z(t) = x(t)h(t-1)$ , 结合式 (18) 和式 (31), 可得扩维系统的策略演化方程为

$$z(t+1) = Qz(t) \quad (32)$$

式中:  $Q = \sum_{j=1}^{2^{M+N}} J_{\sigma_j} L \Phi_{2^{M+N}} Z_{\sigma_j}$ ,  $Q$  有  $2^{M+N}$  种选择,  $Q \in \{Q_{\sigma_s}, Q_{\sigma_s}, \dots, Q_{\sigma_{2^{M+N}}}\}$  且  $\mathbb{P}\{Q = Q_{\sigma_s}\} = p_{\sigma_s}$ ,  $\Phi_{2^{M+N}}$  是降幂矩阵. 令  $Ez(t)$  表示  $z(t)$  的数学期望, 则可以得到

$$Ez(t+1) = \widehat{Q}Ez(t). \quad (33)$$

式中:  $\widehat{Q} = \sum_{j=1}^{2^{M+N}} p_{\sigma_j} L \Phi_{2^{M+N}} Z_{\sigma_j}$  是概率矩阵,  $\widehat{Q}$  中的元素表示经过一轮交易, 某一策略向下一个策略演化的概率.

**注 1** 通过扩维的方法将不完全信息下的原始系统 (16) 转换为带有转移矩阵  $Q$  的扩维系统 (32), 策略由  $x$  变为  $z$ , 维度从  $2^{M+N}$  扩展到  $2^{2(M+N)}$ , 从而将不完全信息的概率转化为矩阵  $Q$  的概率. 采用扩

维系统 (32) 分析策略演化动态的优势在于它是一个线性系统, 且  $\widehat{Q}$  是一个确定的矩阵, 从而使得策略演化的计算可以基于当前策略直接进行迭代. 尽管维度的扩大增加了计算复杂度, 但是由于博弈是有限的, 并且  $\widehat{Q}$  是一个确定的方阵, 可以通过计算  $\widehat{Q}$  的有限次幂来分析系统的演化过程和评估系统稳定性, 这大大降低了分析系统稳定性的难度.

**定义 4** 对于能源交易模型 (31), 设  $D$  是一个给定的策略集合, 如果对于任意的  $x(0) \in D$ , 当  $t \geq 0$  时, 都有  $x(t, x(0)) \in D$ , 那么称集合  $D$  为能源交易模型 (31) 的博弈均衡集合.

**定义 5** 称能源交易模型 (31) 能全局收敛于博弈均衡集合  $D = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_\tau^*\}$ , 如果对于任意  $x(0)$  和  $h(-1)$ , 存在正整数  $\xi \in \mathbb{Z}^+$ , 使得当  $t \geq \xi$  时,

$$\mathbb{P}\{x(t) \in D \mid x(0), h(-1)\} = 1. \quad (34)$$

用  $\Xi_1(x_i^*)$  表示  $x_i^*$  的一步能达集, 它是指集合  $\Xi_1(x_i^*)$  中所有策略均可通过一步演化到达目标策略  $x_i^*$ , 即  $\Xi_1(x_i^*) = \{h \mid L \times h = x_i^*, l = [1, \tau]\}$ . 假设  $\Xi_1(x_i^*) = \{\hat{x}_{i_1}^*, \hat{x}_{i_2}^*, \dots, \hat{x}_{i_\beta}^*\}$ , 构建扩维系统 (32) 的博弈均衡集合为  $\Lambda = \{x_{i_1}^*, x_{i_2}^*, \dots, x_{i_\beta}^*\}$ ,  $x_i^* \in D$ ,  $j = [1, \beta]$ .

**引理 2** 当扩维系统 (32) 能够全局收敛于博弈均衡集合  $\Lambda$  时, 能源交易模型 (31) 能够全局收敛于博弈均衡集合  $D$ .

**证明: (充分性)** 假设扩维系统 (32) 能够全局收敛于博弈均衡集合  $\Lambda$ , 即对于任意  $z(0)$ , 存在正整数  $\zeta \in \mathbb{Z}^+$ , 当  $t \geq \zeta$  时,  $\mathbb{P}\{z(t) \in \Lambda \mid z(0)\} = 1$ . 由

$$\begin{aligned} \mathbb{P}\{z(t) \in \Lambda \mid z(0)\} &= \\ \mathbb{P}\{x(t)h(t-1) \in \\ \{x_i^* \times \Xi_1(x_{i=[1, \tau]}^*)\} \mid x(0)h(-1)\} &\leq \\ \mathbb{P}\{x(t) \in \{x_{i=[1, \tau]}^*\} \mid x(0), h(-1)\}. \end{aligned} \quad (35)$$

可得  $\mathbb{P}\{x(t) \in D \mid x(0), h(-1)\} = 1$ . 因此, 能源交易模型 (31) 能全局收敛于博弈均衡集合  $D$ .

**(必要性)** 假设能源交易模型 (31) 能够全局收敛于博弈均衡集合  $D$ , 即对于任意  $x(0)$  和  $h(-1)$ , 存在  $\xi \in \mathbb{Z}^+$ , 当  $t \geq \xi$  时,  $\mathbb{P}\{x(t) \in D \mid x(0), h(-1)\} = 1$ . 由式 (19) 可得, 对于任意的  $t \geq \xi$ ,

$$\begin{cases} \mathbb{P}\{x(t) \in \{x_{i=[1, \tau]}^*\} \mid x(0), h(-1)\} = 1, \\ \mathbb{P}\{h(t-1) \in \{\Xi_1(x_{i=[1, \tau]}^*)\} \mid x(0), h(-1)\} = 1. \end{cases} \quad (36)$$

因  $z(t) = x(t)h(t-1)$ , 可得  $\mathbb{P}\{z(t) \in \Lambda \mid z(0)\} = 1$  对于  $t \geq \xi$  成立. 扩维系统 (32) 能够全局收敛于博弈均衡集合  $\Lambda$ . 证明成立.  $\square$

由引理 2 可得, 扩维系统 (32) 与能源交易模型

(31) 在收敛性上是等价的, 因此, 可将能源交易模型 (31) 的收敛性问题转化为扩维系统 (32) 的收敛性问题. 下面给出扩维系统 (32) 收敛于博弈均衡集合的判定准则.

**定理 1** 扩维系统 (32) 能全局收敛于博弈均衡集合  $\Lambda$ , 当且仅当存在一个正整数  $T \leq 4^{(M+N)}$ , 使得下式成立:

$$\sum_{\delta_{4^{M+N}}^i \in \Lambda} \text{Row}_i \left( \widehat{Q}^T \right) = \mathbf{1}_{4^{M+N}}. \quad (37)$$

**证明: (充分性)** 已知存在一个  $T \leq 4^{(M+N)}$ , 使得式 (37) 成立. 首先证明当  $t > T$  时, 式 (37) 仍然成立. 令  $\theta(t) = \sum_{\delta_{4^{M+N}}^i} \text{Row}_i(\widehat{Q}^t)$ , 当  $t = T + 1$  时,  $\text{Col}_j(\theta(T + 1)) = \theta(T)\text{Col}_j(\widehat{Q})$ ,  $j = [1, 4^{M+N}]$ .  $\widehat{Q}$  的每列元素之和为 1 且  $\theta(T) = \mathbf{1}_{4^{M+N}}$ , 可得  $\theta(T + 1) = \mathbf{1}_{4^{M+N}}$ . 令  $\hat{T} > T + 1$ , 同理可得  $\theta(\hat{T} + 1) = \mathbf{1}_{4^{M+N}}$ , 所以式 (37) 对于  $t > T$  仍然成立. 结合  $\widehat{Q}$  中的元素意义可得  $\mathbb{P}\{z(t) \in \Lambda \mid z(0)\} = 1$  对于任意的  $z(0)$  和  $t > T$  成立, 因此扩维系统 (32) 能全局收敛于  $\Lambda$ .

**(必要性)** 已知扩维系统 (32) 能全局收敛于  $\Lambda$ , 即存在  $T \in \mathbb{Z}^+$ , 当  $t \geq T$  时,  $\mathbb{P}\{z(t) \in \Lambda \mid z(0)\} = 1$ , 由  $\widehat{Q}$  的结构可知,

$$\begin{cases} \sum_{\delta_{4^{M+N}}^i \in \Lambda} (\widehat{Q}^t)_{i,j} = 1, j = [1, 4^{M+N}], \\ (\widehat{Q}^t)_{i,j} = 0, \text{ 如果 } \delta_{4^{M+N}}^i \notin \Lambda. \end{cases} \quad (38)$$

因此, 式 (38) 得证. 证明成立.  $\square$

计算扩维系统 (32) 的博弈均衡集合  $\Lambda$  的算法如表 1 所示.

表1 计算博弈均衡集合的算法

算法1: 计算博弈均衡集合  $\Lambda$

输入:  $\widehat{Q}$

输出:  $\Lambda$

1: 初始:  $\Lambda = \emptyset, R_0 = \widehat{Q}, l = 1, k = 2^{2^{(M+N)}}$

2: **while**  $l \leq k$  **do**

3:   **for**  $m = 1$  **to**  $k$

4:     **for**  $n = 1$  **to**  $k$

5:        $(R_l)_{mn} = (R_{l-1})_{mn} + (R_{l-1})_{ln}(R_{l-1})_{ml}$

6:       **if**  $\exists i \in \{1, 2, \dots, k\}$  **such that**  $(R_l)_{ii} > 0$

7:           $\Lambda = \Lambda \cup \{\delta_k^i\}$

8:       **end if**

9:     **end for**

10:  **end for**

11:  $l = l + 1$

12: **end while**

定理 1 为微电网能源交易的网络演化博弈模型提供了一个用于确定不完全信息条件下能源交易的收敛性判定准则. 当  $T \leq 4^{(M+N)}$  时, 扩维系统 (32) 的收敛策略是一个有限集. 此外, 本文将微电网能源交易中的不完全信息发生的概率转化为概率转移矩阵, 从而简化了对微电网能源交易的网络演化博弈模型的定量分析过程.

## 4 算例分析

### 4.1 微电网能源交易网络演化博弈建模

本节以包含 8 个交易参与者的能源交易为例, 研究在完全信息/不完全信息下微电网能源交易的策略演化动态, 并探讨在各条件下能源交易策略的收敛性. 能源交易的参与者有: 4 个 LEMG(表示为  $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2, \mathcal{U}_3$  和  $\mathcal{U}_4$ , 其策略分别表示为  $u_1, u_2, u_3$  和  $u_4$ ), 3 个 MEMG(表示为  $\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2$  和  $\mathcal{V}_3$ , 其策略分别表示为  $v_1, v_2$  和  $v_3$ ) 和 1 个主电网运营商 (表示为  $\mathcal{K}$ , 其策略表示为  $k$ ). 假设  $\mathcal{K}$  的策略更新规则为 SUR-I,  $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_3, \mathcal{V}_1$  和  $\mathcal{V}_2$  的策略更新规则为 SUR-II,  $\mathcal{U}_2, \mathcal{U}_4$  和  $\mathcal{V}_3$  的策略更新规则为 SUR-III. 基于微电网的交易数据和策略更新规则的选择, 各参与者在各策略中的总体收益如表 2 所示.

如果整体策略为  $u_1(t) = 2, u_2(t) = 1, u_3(t) = 1, u_4(t) = 1, v_3(t) = 1, v_2(t) = 1, v_3(t) = 1, k_1(t) = 2, k_2(t) = 1$ , 那么各参与者在此整体策略下所得收益为  $C_{\mathcal{U}_1} = -1, C_{\mathcal{U}_2} = 1, C_{\mathcal{U}_3} = 1, C_{\mathcal{U}_4} = 1, C_{\mathcal{V}_1} = 1,$

$C_{\mathcal{V}_2} = 1, C_{\mathcal{V}_3} = 1, C_{\mathcal{K}} = -5$ . 在此策略场景中,  $\mathcal{U}_1$  选择和 MEMG 进行交易, 收益为  $-1$ . 主电网运营商设定的能源交易价格为  $\partial_1^l$ , MEMG 与 LEMG 之间的能源交易价格  $s_r = \rho_h$ . 因为  $\partial_1^l < \rho_h$ , 由 SUR-II 可知,  $\mathcal{U}_1$  在下一轮交易中选择的策略为  $u_1(t+1) = 1$ , 表明  $\mathcal{U}_1$  在下一轮选择与主电网运营商进行交易. 同样的, 可以得到  $u_i(t+1), i \in [1, 4], v_j(t+1), j \in [1, 3]$  和  $k(t+1)$ . 基于此, 利用矩阵半张量积得到交易参与者的策略及策略更新规则的代数形式如下:

$$\begin{aligned}
 F_{u_1}^{II} &= \delta_2[2, 1, 2, 2, 2, 2, \dots, 2, 1, 1, 2, 1, 2, \dots, 1, 1, 1, 1, 2, 1], \\
 F_{u_2}^{III} &= \delta_2[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2], \\
 F_{u_3}^{II} &= \delta_2[2, 1, 2, 2, 2, 2, \dots, 2, 1, 1, 2, 1, 2, \dots, 1, 1, 1, 1, 2, 1], \\
 F_{u_4}^{III} &= \delta_2[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2], \\
 G_{v_1}^{II} &= \delta_2[1, 2, 1, 1, 1, 1, \dots, 1, 2, 2, 1, 2, 1, \dots, \\
 &\quad 2, 2, 2, 2, 1, 2], \\
 G_{v_2}^{II} &= \delta_2[1, 2, 1, 1, 1, 1, \dots, 1, 2, 2, 1, 2, 1, \dots, \\
 &\quad 2, 2, 2, 2, 1, 2], \\
 G_{v_3}^{III} &= \delta_2[1, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 2], \\
 H_1^I &= \delta_2[1, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2], \\
 H_2^I &= \delta_2[2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1]. \tag{39}
 \end{aligned}$$

设置以下两个情景对微电网能源交易策略展开分析: 情景 1 为完全信息下的微电网能源交易; 情景 2 为不完全信息下的微电网能源交易.

表2 每个参与者的整体收益

收益	策略											
	111111111	111111112	111111121	...	112222211	112222212	112222221	...	122222211	122222212	122222221	
$C_{\mathcal{U}_1}$	-1	-1	1	...	-2	-2	1	...	-2	-2	2	
$C_{\mathcal{U}_2}$	-2	-2	1	...	-1	-2	1	...	-1	-1	-1	
$C_{\mathcal{U}_3}$	-1	-1	1	...	1	2	2	...	0	0	0	
$C_{\mathcal{U}_4}$	-1	-1	2	...	1	2	2	...	-1	-1	-1	
$C_{\mathcal{V}_1}$	2	-1	-1	...	1	-1	-1	...	1	1	1	
$C_{\mathcal{V}_2}$	1	0	-1	...	1	-1	-1	...	0	0	0	
$C_{\mathcal{V}_3}$	1	-1	-2	...	1	-1	-1	...	1	1	1	
$C_{\mathcal{K}}$	1	7	1	...	-2	3	3	...	2	2	-2	

收益	策略											
	211111121	211111122	211111211	...	212222221	212222222	221111111	...	222222212	222222221	222222222	
$C_{\mathcal{U}_1}$	-1	-2	1	...	1	1	-2	...	-2	-2	-2	
$C_{\mathcal{U}_2}$	1	1	-1	...	2	2	-2	...	-2	-2	-2	
$C_{\mathcal{U}_3}$	1	1	-1	...	1	1	-1	...	-2	-2	-2	
$C_{\mathcal{U}_4}$	1	1	-1	...	1	1	-1	...	-2	-2	-2	
$C_{\mathcal{V}_1}$	1	-1	2	...	-1	-1	1	...	2	2	2	
$C_{\mathcal{V}_2}$	1	-1	1	...	0	0	2	...	3	3	3	
$C_{\mathcal{V}_3}$	1	-1	1	...	-1	-1	1	...	3	3	3	
$C_{\mathcal{K}}$	-5	2	-2	...	-3	-3	2	...	0	0	0	

在情景 1 中, 通信过程中信息的传输是完整的, 即式 (17) 中的  $w_i(t)$  满足以下概率分布:

$$\begin{cases} \mathbb{P}\{w_{u_1}(t) = 1\} = 1, \mathbb{P}\{w_{u_2}(t) = 1\} = 1, \\ \mathbb{P}\{w_{u_3}(t) = 1\} = 1, \mathbb{P}\{w_{u_4}(t) = 1\} = 1, \\ \mathbb{P}\{w_{v_1}(t) = 1\} = 1, \mathbb{P}\{w_{v_2}(t) = 1\} = 1, \\ \mathbb{P}\{w_{v_2}(t) = 1\} = 1. \end{cases} \quad (40)$$

令  $h(t) = \times_{i=1}^4 h_{u_i}(t) \times_{j=1}^3 h_{v_j}(t)$ , 表示所有参与者接收到的实际策略;  $x(t) = \times_{i=1}^4 x_{u_i}(t) \times_{j=1}^3 x_{v_j}(t)$  表示所有参与者接收到的正确策略. 在情景 1 中,  $h(t) = x(t)$ , 由式 (18) 可得, 情景 1 中微电网能源交易的策略演化方程为

$$x(t+1) = Lx(t) \quad (41)$$

其中:

$$L = \delta_{128} [81, 7, 81, 82, 81, 82, 82, 82, 81, 81, 81, 82, 81, 82, 82, 82, 82, 7, 7, 81, 8, 81, 8, 82, 82, 81, 7, 81, 82, 81, 82, 82, 82, 7, 47, 7, 48, 7, 48, 82, 48, 7, 47, 81, 48, 81, 48, 82, 122, 7, 7, 81, 8, 81, 8, 82, 82, 81, 7, 81, 82, 81, 82, 82, 82, 47, 47, 47, 48, 47, 48, 122, 48, 47, 47, 121, 48, 121, 48, 122, 122, 47, 47, 47, 48, 47, 48, 122, 48, 122, 48, 47, 47, 121, 48, 121, 48, 122, 122, 47, 47, 47, 48, 47, 48, 48, 48, 48, 47, 47, 47, 48, 47, 48, 122, 48].$$

主电网运营商的能源价格演化方程为

$$k(t) = Hx(t) \quad (42)$$

其中:

$$H = \delta_4 [2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 4, 2, 3, 2, 3, 1, 3, 2, 4, 2, 3, 2, 3, 1, 3, 2, 4, 2, 3, 2, 3, 1, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 3, 2, 4, 2, 3, 2, 3, 1, 3, 2, 4, 2, 3, 2, 3, 1, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 3, 3].$$

在情景 2 中, 考虑通信过程中信息传输的不完整, 以概率来描述随机的信息丢失. 设定场景 2 中参与者的信息不完整概率满足以下概率分布:

$$\begin{cases} \mathbb{P}\{w_{u_1}(t) = 1\} = 1, \mathbb{P}\{w_{u_2}(t) = 1\} = 0.5, \\ \mathbb{P}\{w_{u_3}(t) = 1\} = 1, \mathbb{P}\{w_{u_4}(t) = 1\} = 0.3, \\ \mathbb{P}\{w_{v_1}(t) = 1\} = 1, \mathbb{P}\{w_{v_2}(t) = 1\} = 0.6 \\ \mathbb{P}\{w_{v_2}(t) = 1\} = 1. \end{cases} \quad (43)$$

令  $z(t) = x(t)h(t-1)$ , 可得扩维后的微电网能源交易策略演化方程为

$$z(t+1) = Qz(t) \quad (44)$$

式中:  $Q \in \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{27}\}$  且  $\mathbb{P}\{Q = Q_{\sigma_s}\} = p_{\sigma_s}$ . 通过计算得到非零  $p_{\sigma_s}$  有:

$$\begin{cases} p_{\sigma_{85}} = 0.14, p_{\sigma_{87}} = 0.21, p_{\sigma_{93}} = 0.06, \\ p_{\sigma_{95}} = 0.09, p_{\sigma_{117}} = 0.14, p_{\sigma_{119}} = 0.21, \\ p_{\sigma_{125}} = 0.06, p_{\sigma_{128}} = 0.09. \end{cases} \quad (45)$$

因此只需考虑  $Q_{\sigma_j}$ ,  $j = 85, 87, 93, 95, 117, 119, 125,$

128.  $Q_{\sigma_j}$  的取值如下:

$$\begin{aligned} Q_{\sigma_{85}} = Q_{\sigma_{93}} = Q_{\sigma_{117}} = Q_{\sigma_{128}} &= \delta_{2^{14}} [10241, 10241, \\ &10243, 10243, \dots, 15552, 833, \dots, \\ &6142, 6142, 6144, 6144], \\ Q_{\sigma_{87}} = Q_{\sigma_{95}} = Q_{\sigma_{119}} = Q_{\sigma_{125}} &= \delta_{2^{14}} [10241, \\ &10241, 10241, 10241, \dots, 15552, 833, \dots, \\ &6144, 6144, 6144, 6144]. \end{aligned} \quad (46)$$

令  $Ez(t)$  表示  $z(t)$  的数学期望, 由 (44) 可得

$$Ez(t+1) = \widehat{Q}Ez(t) \quad (47)$$

式中:  $\widehat{Q} = p_{\sigma_{85}} Q_{\sigma_{85}} + p_{\sigma_{87}} Q_{\sigma_{87}} + p_{\sigma_{93}} Q_{\sigma_{93}} + p_{\sigma_{95}} Q_{\sigma_{95}} + p_{\sigma_{117}} Q_{\sigma_{117}} + p_{\sigma_{119}} Q_{\sigma_{119}} + p_{\sigma_{125}} Q_{\sigma_{125}} + p_{\sigma_{128}} Q_{\sigma_{128}}$ . 扩维后主电网运营商能源价格演化方程为

$$k(t) = \bar{H}z(t). \quad (48)$$

其中:  $\bar{H} = \delta_4 [2, 2, 2, 2, \dots, 3, 2, \dots, 3, 3, 3, 3]$ .

## 4.2 不完全信息对微电网能源交易的影响分析

基于情景 1 中微电网能源交易模型 (41) 和情景 2 中扩维系统 (44), 根据定理 1, 情景 1 中完全信息条件下的能源交易策略经过 2 轮交易收敛于策略集合  $D = \{\delta_{128}^{47}, \delta_{128}^{82}\}$ . 根据算法 1 可得, 情景 2 中不完全信息条件下的能源交易博弈均衡集合为  $\Lambda = \{\delta_{27}^{5969}, \delta_{27}^{5970}, \delta_{27}^{5977}, \dots, \delta_{27}^{10253}, \delta_{27}^{10277}, \delta_{27}^{10285}\}$ , 将  $\widehat{Q}$  带入式 (37) 可得, 当  $T = 6$  时, 式 (37) 成立, 即情景 2 中不完全信息条件下的能源交易策略经过 6 轮交易收敛于策略集合  $\Lambda$ .

使用 MATLAB 分别对情景 1 和情景 2 中微电网能源交易策略的演化动态进行可视化. 情景 1 中完全信息条件下的微电网能源交易的整体策略演化热图如图 3 所示; 在情景 1 中任意选取三个初始策略为  $\delta_{128}^1$ ,  $\delta_{128}^{64}$  和  $\delta_{128}^{128}$ , 得到它们的策略演化轨迹如图 4 所示; 在情景 2 不完全信息条件下任意选择三个初始策略为  $\delta_{2^{14}}^1$ ,  $\delta_{2^{14}}^{8192}$  和  $\delta_{2^{14}}^{16384}$ , 得到它们的策略演化热图如图 5 所示;

由图 3 和图 4 可知, 在完全信息条件下任意初

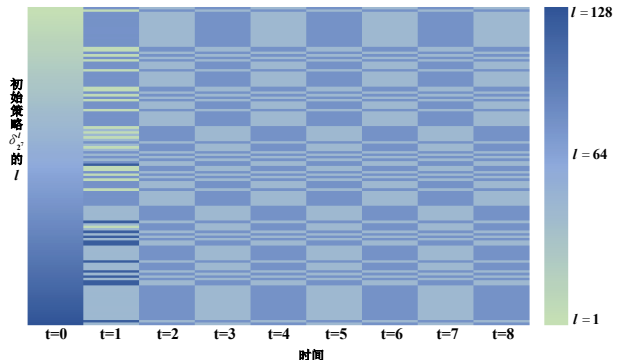


图3 完全信息下的能源交易策略演化热图

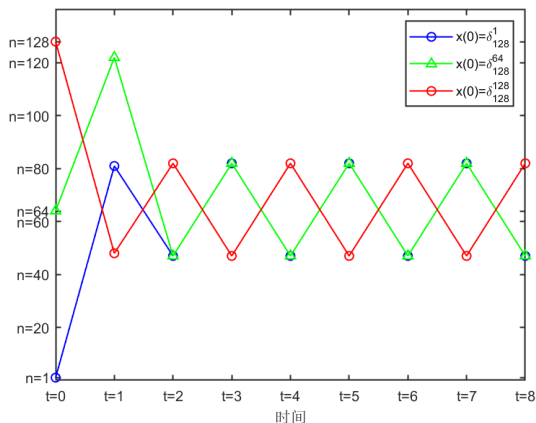


图4 完全信息下初始策略  $\delta_{128}^1$ ,  $\delta_{128}^{64}$  和  $\delta_{128}^{128}$  的演化轨迹 ( $n$  为  $\delta_{128}^n$  的序号表示)

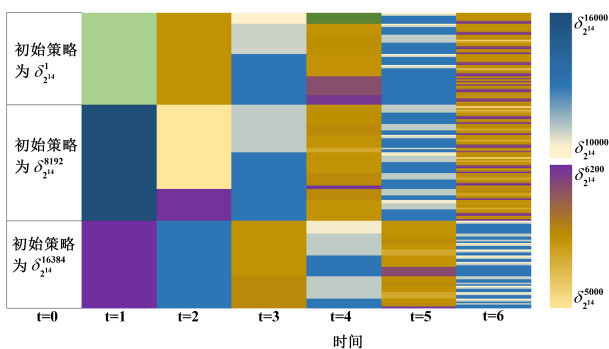


图5 不完全信息下初始策略  $\delta_{214}^{16000}$ ,  $\delta_{214}^{10000}$  和  $\delta_{214}^{5000}$  的演化热图

始策略的经过两轮交易均收敛于策略集合  $D = \{\delta_{128}^{47}, \delta_{128}^{82}\}$ , 并随后在策略集合  $D$  中进行演化. 图 5 展示了任意选取的三个初始策略在不完全信息情景下的演化情况. 由图 5 可知, 由于信息丢失的存在, 策略的演化以一定的概率向多个方向演化, 且随着交易的进行, 演化策略的类型逐渐增加, 这增加了策略演化的复杂性. 在经过 6 轮交易后, 策略收敛于策略集合  $\Lambda$ .

通过对比情景 1 和情景 2 的微电网能源交易演化结果可以发现, 在信息完备的条件下, 交易策略能够在较短时间内趋于稳定, 即在第 2 个交易周期后实现收敛, 收敛策略相对集中, 演化路径清晰. 而在不完全信息条件下, 参与者由于缺乏其他参与者策略信息, 仅能基于历史策略信息进行有限理性决策, 导致策略演化过程中出现更为显著的不确定性, 策略更新路径呈现出明显的非平稳性, 系统收敛时间显著增加. 进一步分析, 信息的不完全增加了博弈策略空间的复杂性, 使得系统更容易陷入多策略并存和动态非稳定的状态, 导致了演化策略的波动和系统的不稳定. 这种不稳定性在仿真结果中表现为演化轨迹愈加复杂, 最终对微电网内部的能源优化配

置和整体市场运行的稳定性造成不利影响. 因此, 交易策略信息的完整性在能源交易机制中具有重要意义, 其直接关系到策略演化过程的收敛性和交易系统的稳定运行.

### 5 结论

本文基于网络演化博弈理论研究了不完全信息条件下微电网的周期性能源交易机制. 得到以下结论:

1) 所提出的基于网络演化博弈的微电网能源交易模型能够动态模拟交易参与者在不确定条件下的策略演化, 揭示了不完全信息对能源交易策略演化和系统稳定性的影响, 有助于分析复杂交互环境下微电网交易系统的运行机理.

2) 所提出的计算博弈均衡集合的算法和微电网能源交易模型收敛性的判定准则为博弈策略优化提供了理论依据, 具备良好的扩展性.

3) 仿真结果表明, 不完全信息将加剧微电网能源交易中策略波动和系统的不稳定, 验证了所提出收敛性准则和博弈均衡集合求解算法的有效性, 为微电网能源交易机制设计提供了新思路.

未来工作将围绕以下方向展开: 一是基于实际微电网运营平台的交易数据, 对策略更新规则进行优化, 提升模型的准确性; 二是充分考虑微电网能源交易的干扰因素, 构建更具现实性的动态通信模型. 未来可将所提出的博弈模型嵌入已有的能源管理系统的交易调控模块中, 为微电网运营中的策略引导与价格制定提供智能决策指导.

### 参考文献 (References)

[1] 季颖, 王建辉. 基于深度强化学习的微电网在线优化调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1675-1684. (Ji Y, Wang J H. Online optimal scheduling of a microgrid based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision, 2022, 37(7): 1675-1684.)

[2] 王丹璐, 孙秋野, 苏涵光. 多微网系统端网协同分布式实时智能优化[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3801-3809. (Wang D L, Sun Q Y, Su H G. Collaborative distributed real-time intelligent optimization of multimicrogrid system[J]. Control and Decision, 2024, 39(11): 3801-3809.)

[3] Gregoratti D, Matamoros J. Distributed energy trading: The multiple-microgrid case[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2551-2559.

[4] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857. (Zhao M, Shen C, Liu F, et al. A game-theoretic

- approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4): 848-857.)
- [5] Wu Y X, Zhao T Y, Yan H Y, et al. Hierarchical hybrid multi-agent deep reinforcement learning for peer-to-peer energy trading among multiple heterogeneous microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(6): 4649-4665.
- [6] Wei X, Liu J J, Xu Y L, et al. Virtual power plants peer-to-peer energy trading in unbalanced distribution networks: A distributed robust approach against communication failures[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(2): 2017-2029.
- [7] Zhou H, Aral A, Brandić I, et al. Multiagent Bayesian deep reinforcement learning for microgrid energy management under communication failures[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(14): 11685-11698.
- [8] 员江洋, 杨明, 刘宁宁, 等. 不完全信息下基于多代理深度确定策略梯度算法的发电商竞价策略[J]. *电网技术*, 2022, 46(12): 4832-4842.  
(Yun J Y, Yang M, Liu N N, et al. Bidding strategy of generation companies based on multi-agent deep deterministic policy gradient algorithm under incomplete information[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(12): 4832-4842.)
- [9] 蒋玮, 吴杰, 冯伟, 等. 日前电力市场不完全信息条件下的电力供需双边博弈模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(2): 18-24.  
(Jiang W, Wu J, Feng W, et al. Bilateral game model of power supply and demand sides with incomplete information in day-ahead electricity market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(2): 18-24.)
- [10] Yang J, Zhang Y J, Yuan Y Z, et al. Energy trading and power allocation strategies for relay-assisted smart grid communications: A three-stage game approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(12): 7438-7450.
- [11] 杨彦, 陈皓勇, 张尧, 等. 计及分布式发电和不完全信息可中断负荷选择的电力市场模型[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(28): 15-24.  
(Yang Y, Chen H Y, Zhang Y, et al. An electricity market model with distributed generation and interruptible load under incomplete information[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(28): 15-24.)
- [12] 杨楠, 李希喆, 刘毅, 等. 电力市场环境下基于多边不完全信息演化博弈的配电网规划方法研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(11): 4658-4673.  
(Yang N, Li X Z, Liu Y, et al. Distribution network planning based on multi-lateral incomplete information evolutionary game in power market[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(11): 4658-4673.)
- [13] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5009-5017.  
(Lu Q, Chen L J, Mei S W. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5009-5017.)
- [14] Cheng D Z, Xu T T, Qi H S. Evolutionarily stable strategy of networked evolutionary games[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, 25(7): 1335-1345.
- [15] 刘敏, 王金环. 基于势博弈的智能电网需求侧管理问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 545-550.  
(Liu M, Wang J H. Potential game for demand-side management of smart grids[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(2): 545-550.)
- [16] Liang Y L, Liu F, Mei S W. Distributed real-time economic dispatch in smart grids: A state-based potential game approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4194-4208.
- [17] Bistriz I, Ward A, Zhou Z Y, et al. Smart greedy distributed energy allocation: A random games approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, 67(5): 2208-2220.
- [18] Lu Q, Lü S K, Leng Y J. A Nash-Stackelberg game approach in regional energy market considering users' integrated demand response[J]. *Energy*, 2019, 175: 456-470.
- [19] Chen L D, Liu N, Li C C, et al. Peer-to-peer energy sharing with social attributes: A stochastic leader-follower game approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(4): 2545-2556.
- [20] Alshehri K, Liu J, Chen X D, et al. A game-theoretic framework for multiperiod-multicompany demand response management in the smart grid[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(3): 1019-1034.
- [21] Cheng D Z, He F H, Qi H S, et al. Modeling, analysis and control of networked evolutionary games[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(9): 2402-2415.
- [22] 冯俊娥, 李怡靓, 赵荣. 基于矩阵半张量积的有限值动态系统的最新进展[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 267-277.  
(Feng J E, Li Y L, Zhao R. Recent developments of finite-valued dynamic systems based on semi-tensor product of matrices[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(2): 267-277.)
- [23] 王元华, 张秋童, 臧文科. 切换网络演化博弈的同步[J]. *控制与决策*, 2024, 39(10): 3313-3318.  
(Wang Y H, Zhang Q T, Zang W K. Synchronization of switched networked evolutionary games[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(10): 3313-3318.)
- [24] Jia Y Z, Li Y L, Feng J E. Networked evolutionary game-based demand response via feedback controls[J].

- IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(2): 1638-1646.
- [25] Zhu B, Xia X H, Wu Z. Evolutionary game theoretic demand-side management and control for a class of networked smart grid[J]. *Automatica*, 2016, 70: 94-100.
- [26] Wang J H, Liu M, Wu H. The demand-side management and control of smart grids based on weighted network congestion games[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 43-52.
- [27] Wang J H, Gao X Y, Xu Y. Intermittent control for demand-side management of a class of networked smart

grids[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2019, 13(8): 1166-1172.

### 作者简介

张启亮 (1991-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为分布式博弈与优化、新能源电力系统优化控制、退役新能源固废热解过程智能优化运行控制理论, E-mail: [zhangqiliang@ncepu.edu.cn](mailto:zhangqiliang@ncepu.edu.cn);

武建荣 (2001-), 男, 硕士生, 主要研究方向为分布式博弈与优化, E-mail: [wujianrong@ncepu.edu.cn](mailto:wujianrong@ncepu.edu.cn).