

基于 Berge-NS 均衡的电力市场多主体非合作博弈竞争模型

马天男¹, 杜英¹, 苟全峰¹, 彭丽霖², 王超¹, 何璞玉¹

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川电力交易中心有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:售电侧放开促使了电力市场主体的多向性选择,同时也增强了多元主体间的激烈竞争,而市场外部因素是不确定的,每个市场主体就需要在含不确定性的博弈中研究多元主体间的竞争关系并发展竞价策略,这对于促进电力市场的发展具有重要的意义。在明确市场主体需求的基础上,分别对发电商、售电商和大用户主体构建了市场决策模型;根据 Berge-NS 均衡模型制定了电力市场多主体非合作博弈竞争的流程和步骤,并利用磷虾群(KH)优化算法对各市场主体竞价策略的动态调整和市场均衡情况进行求解。通过算例仿真对所构建竞争博弈模型及求解算法进行验证,相关结果表明:随着博弈的不断深入和市场信息的积累,市场主体间的竞价策略会逐渐达到均衡状态,从而实现各方收益共赢和协调发展,有效提高了市场效率;同时验证了 KH 优化算法在求解电力市场多主体博弈竞争问题时的可行性和有效性。

关键词:电力市场;博弈竞争;非合作博弈;电力改革;不确定性;Berge-NS 均衡;磷虾群优化算法;模型

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.028

0 引言

本轮电力体制改革的重点任务之一是推进售电侧市场化改革,并充分发挥其市场资源配置中的重要作用^[1]。更多售电公司的涌现改变了我国电力市场的结构与运营模式,市场化的购售电行为体现了交易主体多元化、市场活跃性强、竞争性增加、用户买卖电力更具活跃性等特征^[2],这使得电力市场环境下的各竞争主体均会按照利润最大化原则进行报价,买卖双方的价格策略和选择性不再单一,各主体的购售电行为也具备了多向选择性。电力市场的多向性选择会促使多元化主体间的激烈竞争,从而释放更多的改革红利,有效地降低企业成本,促进实体经济发展^[3]。因此,研究新形势下多元主体间的竞争关系及制定科学的竞价策略,对于促进电力市场发展具有重要的意义。

近年来,博弈论已经被广泛应用于电力市场主体间利益冲突及交易决策的研究中,并取得了不少成果。文献[4]在源-网-荷协调运营模式机理研究的基础上,构建了多元化发电主体和购电主体的电能交易非合作博弈模型,并探寻了模型纳什(Nash)均衡点的存在性;文献[5]根据电力市场的特征建立了电网公司、新增实体以及用户三方的非合作静态博弈模型,利用改进粒子群优化算法求解模型的 Nash 均衡解,并通过算例分析对新增实体带来的电力市场影响进行了探讨;文献[6]根据差价合约理论,采用夏普利值法构建了售电商联盟合作利益均衡模型,并采用情景分析法对售电商之间在联盟和

非联盟 2 种情况下的竞价策略进行了模拟分析;文献[7]设计了以主体收益函数为目标的电力市场多元主体博弈问题,仿真结果表明各主体市场收益与份额主要取决于双边合同市场与集中交易市场的合理分解;文献[8]基于多代理技术建立了发电商、供电商以及含分布式发电能力用户的博弈模型,通过算例仿真对发电商合作博弈和非合作博弈 2 种情景下的博弈过程进行了详细的讨论;文献[9]基于核仁分摊法研究了合作博弈情况下的电力联盟双边交易机制,并通过风险补偿机制确保了交易联盟的稳定性;文献[10]建立了基于适应性学习能力及自适应全局最优和声搜索算法(SGHS)的日前电力市场动态博弈模型,算例仿真结果充分验证了模型的科学性和合理性;文献[11]则建立了双寡头对称发电商 Bertrand 博弈 Nash 均衡模型,并发现发电商绝对量差价合约电量的增加会起到抑制市场力的作用;文献[12]建立了基于 Nash 均衡的风、火、网三方非合作博弈模型,详细分析了影响各方博弈效益的主要因素,并提出了分散点模式和链聚网模式这 2 种电力市场交易模式,研究证明了三方博弈 Nash 均衡点的存在性;文献[13]构建了多个发电商与多个大用户之间双边合同交易的主从博弈模型,算例结果表明发电商和大用户在双边合同交易中都会因参与博弈而受益。

以上研究成果为新形势下电力市场中多主体竞争的研究奠定了较好的基础,且大部分研究成果也已经证明了 Nash 均衡点的存在性,并提出了有效的求解方法。但复杂多变的电力市场环境会使多元主体间的博弈竞争产生多重 Nash 均衡解,而对于多重 Nash 均衡解的选择也变得越来越困难。市场外部因素具有不确定性,每个市场主体需要在含不确定

收稿日期:2018-08-19;修回日期:2019-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71501071)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71501071)

性的博弈中研究多元主体间的竞争关系并发展竞价策略,而如何在“有限理性”的条件下从多重 Nash 均衡解中求取多主体间的有效均衡,成为了新形势下电力市场博弈竞争中亟待解决的问题之一。随着电力市场改革进程的不断推进,各地区电力市场的建设因市场结构以及改革目标有所差异,电力市场主要以年/月度双边协商合同市场以及月/周度集中竞价和各类挂牌市场交易方式等为主;尤其以月度集中竞价和各类挂牌市场交易最为频繁,多方主体间的竞争尤为激烈,市场多主体间的互动最为活跃,由此产生的多重 Nash 均衡解为提高市场效率带来选择性问题。此外,辅助服务市场也是本次改革的目标,现货交易市场的建设也在不断推进,但考虑到辅助服务市场和现货交易市场的相对独立性和特殊性,暂不将其作为本文的研究对象。本文研究的主要对象为月度集中竞价交易,并设定集中市场采用高低匹配的出清模式。

基于上述分析,本文将采用 Berge-NS 均衡模型求解市场多主体间博弈产生的多 Pareto 最优解选择问题,并模拟得到各参与主体竞价策略的动态调整过程。首先,基于最大化收益原则建立发电商、售电商以及大用户主体的市场决策模型;其次,根据 Berge-NS 均衡模型制定电力市场多主体竞争博弈的流程和步骤;然后,基于上述市场决策模型和 Berge-NS 均衡模型,采用磷虾群(KH)优化算法对各主体报价策略的动态调整过程及市场均衡情况进行求解;最后,通过算例仿真验证 Berge-NS 均衡模型在求解电力市场多主体非合作博弈竞争中的可行性和有效性,并对结果进行分析比较。

1 市场主体决策模型

电力市场改革的目的在于通过市场手段使得资源得到优化配置,通过市场供求关系自发调节主体的市场行为。假设电力商品的均衡价格和均衡电量分别为 P^* 和 Q^* ,若市场价格上升为 P' ,则市场对商品的需求会随着价格的升高而降低到 Q' ,且 $Q' < Q^*$;同时由于市场价格的上升导致供应量也随之上升到 Q'' ,然而电力需求量 Q' 远远小于供应量 Q'' ,这样就出现了供过于求的局面。此时,供应商选择降价是明智的,当供大于求,导致价格下降时,市场又会回到最初的均衡状态(P^* , Q^*)。这种价格波动变化的过程是由市场供求双方相互博弈过程产生的结果,因此售电侧放开使得多元主体进入电力市场并相互博弈,电力交易按照市场方向有效地发展,从而还原了电能的商品属性。电改“9号文”及相关配套文件明确指出,改革后电网公司作为公共事业性质企业,其负责电能传输安全与质量,仅收取相应的过网费用,即输配电费和代收政府基金;电

力交易中心不以盈利为目的,只负责组织各类交易,并拟定相应的电力交易实施细则和提供电力交易结算依据等^[14]。因此,在该市场结构和模式下,参与电力市场博弈的主体包括发电企业、售电公司及市场用户。

售电主体的增加使得电力市场交易呈现出复杂性,其中每个成员的目的和行为均是相互独立的,彼此之间的矛盾和冲突需要通过磋商和竞争协调来解决;此外,成员间的合作与不合作对市场交易结果也有巨大的影响,市场博弈竞争方式可以形成多种不同的情况。设发电企业集合为 $\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$,售电公司集合为 $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$,电力用户集合为 $\{U_1, U_2, \dots, U_l\}$ 。市场主体各成员相互独立,形成多方交叉博弈竞争,各成员会根据自身需求自由选择交易对象,直到满足自身需求时停止交易。无论交易形式如何变化,电力市场主体交易的目的是在满足自身需求的基础上使自身利益最大化。因此,构建各电力交易主体的市场博弈模型,可使电力交易主体在市场中的动态博弈演化过程更加清晰明了。

1.1 发电商的决策模型

假设在电力市场交易中存在 n 家发电商,第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 家发电商(G_i)的发电成本函数为:

$$C_i^G(t) = \frac{1}{2}a_i(Q_i^G(p_m))^2 + b_i Q_i^G(p_m) + c_i \quad (1)$$

其中, $Q_i^G(p_m)$ 为发电商 G_i 的发电量函数, p_m 为市场出清价格; a_i ($a_i > 0$)、 b_i 、 c_i 为实值参数。

尽管当前电力市场呈现供大于求的现状,但发电商在电力交易中向售电公司和用户售电仍然可能承担部分违约风险,如西南地区枯水期可能会出现为用户提供不了全部合同电量的情况。因此,发电商 G_i 发生违约的风险成本可表示为:

$$C_i^{\text{risk}}(t) = C_{\text{VaRi}}^{\text{GtoU}}(t) + C_{\text{VaRi}}^{\text{GtoS}}(t) \quad (2)$$

其中, $C_i^{\text{risk}}(t)$ 为发电商 G_i 在预计售电时段 t 内所承担的风险总成本; $C_{\text{VaRi}}^{\text{GtoU}}(t)$ 为发电商 G_i 在时段 t 针对用户的风险成本; $C_{\text{VaRi}}^{\text{GtoS}}(t)$ 为发电商 G_i 在时段 t 针对售电公司的风险成本。

设发电商 G_i 针对售电公司和用户的合约电量分别为 $\sum_{S_j \in \Omega_S} Q_j^{\text{GtoS}}$ 和 $\sum_{U_k \in \Omega_U} Q_k^{\text{GtoU}}$,假设发电商与售电公司和用户签订的合约为物理合约,则两者售电量与发电商 G_i 的发电量相关,可以用系数法表示为:

$$\begin{cases} \sum_{S_j \in \Omega_S} Q_j^{\text{GtoS}} = \alpha_i Q_i^G(p_m) \\ \sum_{U_k \in \Omega_U} Q_k^{\text{GtoU}} = \beta_i Q_i^G(p_m) \end{cases} \quad (3)$$

其中, Q_j^{GtoS} 、 Q_k^{GtoU} 分别为发电商对售电公司 S_j 和用

户 U_k 的售电量; Ω_S 、 Ω_U 分别为售电商主体、大用户主体集合; α_i 、 β_i 为售电系数, 所有系数之和为 1。

假设发电商对售电公司和用户的实际售电量分别为 Q_{real}^S 和 Q_{real}^U , 由于违约风险成本是关于发电量的函数, 则可以将风险成本函数改写为:

$$C_i^{\text{risk}}(t) = \rho_1 p_m (\alpha_i Q_i^G(p_m) - Q_{\text{real}}^S) + \rho_2 p_m (\beta_i Q_i^G(p_m) - Q_{\text{real}}^U) \quad (4)$$

其中, ρ_1 、 ρ_2 分别为发电商与售电商、大用户主体间签订的惩罚价格倍数系数。

综上可知, 发电商 G_i 面临的总成本函数为:

$$C_i^{\text{total}}(t) = C_i^G(t) + C_i^{\text{risk}}(t) = \frac{1}{2} a_i (Q_i^G(p_m))^2 + b_i Q_i^G(p_m) + c_i + \rho_1 p_m (\alpha_i Q_i^G(p_m) - Q_{\text{real}}^S) + \rho_2 p_m (\beta_i Q_i^G(p_m) - Q_{\text{real}}^U) \quad (5)$$

此外, 发电商 G_i 通过向售电公司和用户售电以获取收益, 其收益函数可表示为:

$$R_i^G(t) = \sum_{S_j \in \Omega_S} p_j Q_j^{\text{GtoS}} + \sum_{U_k \in \Omega_U} p_k Q_k^{\text{GtoU}} \quad (6)$$

其中, p_j 、 p_k 分别为在策略空间内针对售电公司 S_j 和用户 U_k 制定的价格策略

综上可知, 当发电商的边际收益等于边际成本, 即 $M_{R_i^G} = M_{C_i^G}$ 时, 可以计算得到市场的出清价格 p_m 。因此, 发电商 G_i 将根据市场出清价格曲线, 针对不同的对象制定相应的竞价策略, 则得到其在市场交易中的目标为:

$$\max \pi_i^G(t) = \sum_{S_j \in \Omega_S} p_j Q_j^{\text{GtoS}} + \sum_{U_k \in \Omega_U} p_k Q_k^{\text{GtoU}} - \left[\frac{1}{2} a_i (Q_i^G(p_m))^2 + b_i Q_i^G(p_m) + c_i \right] - \rho_1 p_m (\alpha_i Q_i^G(p_m) - Q_{\text{real}}^S) - \rho_2 p_m (\beta_i Q_i^G(p_m) - Q_{\text{real}}^U) \quad (7)$$

其中, 售电系数 α_i 、 β_i 可利用最小二乘估计法获取。

1.2 售电公司的决策模型

在电力交易中, 售电商会根据不同发电商给出的合约电量和电价曲线选择合适的签约对象。一般在考虑供电可靠性、输配电价的基础上, 选择电价最低的发电商作为签约对象。售电商购电电量的选择主要取决于不参与直购电的市场用户的售电合同, 购电电价则取决于市场中其他发电商的竞价曲线。因此, 售电公司 S_j 的购电成本是购电电量 $Q_{j,i}^{\text{buy}}(t)$ 和购电电价 $p_{j,i}^{\text{buy}}(t)$ 的乘积, 可表示为:

$$C_j^{\text{SfromG}}(t) = \sum_{G_i \in \Omega_G} p_{j,i}^{\text{buy}}(t) Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) \quad (8)$$

其中, Ω_G 为发电商集合; $C_j^{\text{SfromG}}(t)$ 为售电公司 S_j 在时段 t 的购电成本。

此外, 售电公司 S_j 在与发电商签订合约后, 面临着偏差考核, 当合同电量与实际用电量不平衡, 且

超出偏差允许范围时, 售电商将会受到惩罚, 会出现偏差考核成本。假设允许偏差范围为 $[-\varepsilon, \varepsilon]$, 当用户实际用电量和市场竞价电量之差与实际用电量之比大于 ε 或小于 $-\varepsilon$ 时, 售电商就必须支付偏差考核费用, 如西南某省电力市场的初期允许偏差考核范围为 $[-10\%, 10\%]$, 惩罚电价为目录电价的 1.1 倍。因此, 将上述过程采用公式一般化处理, 则设定惩罚电价为 p_j^p , 售电商出现的被考核电量为 Q_j^p , 则偏差考核成本可表示为:

$$C_j^{\text{Sp}}(t) = p_j^p(t) Q_j^p(t) \quad (9)$$

偏差考核作为一种计划手段, 虽然会对电力市场化进程造成影响, 但已然成为市场多元主体博弈竞争中必须要考虑的问题之一。通常, 偏差考核机制由各地区能源监管部门发布, 偏差考核规则由政府以及各方主体代表共同商讨制定。偏差考核对售电公司运营的影响巨大, 尤其是在电力市场竞争中要时刻将正负偏差范围作为申报电量或电价获取的重要参考指标, 在竞价过程中要时刻注意当前时段获取电量对下一阶段申报电量或申报电价的影响。

当与用户或发电商签订售电/购电合同后, 造成实际直接交易电量低于合同电量规定的百分比(一般为 95%)的部分往往被视为违约电量, 此时售电商会面临违约成本, 违约成本将根据不同的对象按合同规定的系数扣除, 可表示为:

$$C_j^{\text{W}}(t) = \xi C_j^{\text{SfromG}}(t) + \psi R_j^{\text{StoU}}(t) \quad (10)$$

其中, ξ 为购电违约系数; ψ 为售电违约系数; $R_j^{\text{StoU}}(t)$ 为售电公司 S_j 的电量销售收入。

售电公司的功能在于向用户提供服务方便, 用户与售电公司签订协议电价后, 售电公司需要缴纳输配电服务电量电费以及线损费用, 即售电商面临的部分成本, 可表示为:

$$C_j^{\text{T}}(t) = p_j^{\text{T}}(t) Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) + p_j^{\text{loss}}(t) Q_j^{\text{loss}}(t) = p_j^{\text{T}}(t) Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) + p_j^{\text{loss}}(t) \Delta k Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) \quad (11)$$

其中, $p_j^{\text{T}}(t)$ 为某电压等级下的输配电价; $p_j^{\text{loss}}(t)$ 为线损电价; $Q_j^{\text{loss}}(t)$ 为网损电量; Δk 为网络损耗系数。

假设售电公司 S_j 根据用户需求制定策略协议, 则双方的签约电量可表示为:

$$Q_j^{\text{sign}}(t) = \begin{cases} Q_{j,k}(t) & p_{j,k} < \forall p_{-j,k} \\ 0 & p_{j,k} > \forall p_{-j,k} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $p_{j,k}$ 为售电公司 S_j 对用户 U_k 的协议电价; $\forall p_{-j,k}$ 为其他售电商对用户 U_k 的协议电价。若出现协议电价相同的情况, 则进行重新协商。由此可知, 当售电公司 S_j 与用户发生签约时, 则双方的签约电量 $Q_j^{\text{sign}}(t) = Q_{j,k}(t)$, 此时售电公司 S_j 才会产生电量销售收入, 可表示为:

$$R_j^{\text{StoU}}(t) = \sum_{U_k \in \Omega_U} p_{j,k}(t) Q^{\text{sign}}(t) = \sum_{U_k \in \Omega_U} p_{j,k}(t) Q_{j,k}(t) \quad (13)$$

综上可知,售电公司 S_j 在电力交易中的目的在于保证供电可靠性和成本最小的情况下追求自身利益最大化,目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} \max \pi_j^S = & \sum_{U_k \in \Omega_U} p_{j,k}(t) Q_{j,k}(t) - \sum_{G_i \in \Omega_G} p_{j,i}^{\text{buy}}(t) Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) - \\ & p_j^{\text{p}}(t) Q_j^{\text{p}}(t) - (\xi C_j^{\text{SfromG}}(t) + \psi R_j^{\text{StoU}}(t)) - \\ & p_j^{\text{T}}(t) Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) - p_j^{\text{loss}}(t) \Delta k Q_{j,i}^{\text{buy}}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

1.3 大用户决策模型

大用户在电力市场交易中既可以选择与发电企业签订直购合同,也可以选择集中在集中交易市场中与售电公司签订代理合同,其市场地位与一般市场用户并无差异。大用户在电力市场中竞价的目的在于以最小的成本获取最大的效用。

大用户 U_k 的购电成本来源于与发电商签订购电合同以及与售电公司签订代理合同,可表示为:

$$C_k^{\text{buy}}(t) = C_k^{\text{UfromG}}(t) + C_k^{\text{UfromS}}(t) = \sum_{G_i \in \Omega_G} p_{k,i}^{\text{buy}}(t) Q_{k,i}^{\text{buy}}(t) + \sum_{S_j \in \Omega_S} p_{k,j}^{\text{buy}}(t) Q_{k,j}^{\text{buy}}(t) \quad (15)$$

其中, $C_k^{\text{UfromG}}(t)$ 为大用户 U_k 向发电商的购电成本; $p_{k,i}^{\text{buy}}(t)$ 和 $Q_{k,i}^{\text{buy}}(t)$ 分别为大用户 U_k 与发电商 G_i 签订的合同电价和合同电量; $C_k^{\text{UfromS}}(t)$ 为大用户 U_k 向售电商的购电成本; $p_{k,j}^{\text{buy}}(t)$ 和 $Q_{k,j}^{\text{buy}}(t)$ 分别为大用户 U_k 与售电公司 S_j 签订的协议电价和协议电量。

此外,大用户 U_k 在电力交易中同样要面临偏差考核成本,正偏差情况说明大用户多用电量,目前大多采用出清价格缴纳偏差费用;负偏差情况说明大用户少用电量,对发电商或者售电商造成的影响较大,因此大多以出清价格的倍数缴纳偏差费用。因此,大用户 U_k 的偏差考核成本可表示为:

$$C_k^{\text{Up}}(t) = \begin{cases} p_m Q_k^{\text{p}}(t) & \text{正偏差} \\ \vartheta p_m Q_k^{\text{p}}(t) & \text{负偏差} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $C_k^{\text{Up}}(t)$ 为大用户 U_k 的偏差考核成本; $Q_k^{\text{p}}(t)$ 为大用户 U_k 在时段 t 的偏差电量; ϑ 为倍数系数。

此外,电力市场主体的信用评价机制也是新电改的重点任务之一,虽然大用户主体发生违约的现象很少,但依然存在此类问题,一旦发生违约,大用户主体就要承担高额的违约费用,具体可表示为:

$$C_k^{\text{break}}(t) = \sum_{G_i \in \Omega_G} b_1 p_m Q_{k,i}^{\text{G}}(t) + \sum_{S_j \in \Omega_S} b_2 p_m Q_{k,j}^{\text{S}}(t) \quad (17)$$

其中, b_1 、 b_2 分别为大用户 U_k 与发电商、售电商的违约价格系数; $Q_{k,i}^{\text{G}}(t)$ 为大用户 U_k 与发电商 G_i 发生的违约电量; $Q_{k,j}^{\text{S}}(t)$ 为大用户 U_k 与售电公司 S_j 发生

的违约电量。

综上可知,大用户 U_k 的决策模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min C_k^{\text{Total}}(t) = & C_k^{\text{UfromG}}(t) + C_k^{\text{UfromS}}(t) + C_k^{\text{Up}}(t) + \\ & C_k^{\text{break}}(t) = \sum_{G_i \in \Omega_G} p_{k,i}^{\text{buy}}(t) Q_{k,i}^{\text{buy}}(t) + \sum_{S_j \in \Omega_S} p_{k,j}^{\text{buy}}(t) Q_{k,j}^{\text{buy}}(t) + \\ & \nu p_m(t) Q_k^{\text{p}}(t) + \sum_{G_i \in \Omega_G} b_1 p_m Q_{k,i}^{\text{G}}(t) + \sum_{S_j \in \Omega_S} b_2 p_m Q_{k,j}^{\text{S}}(t) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $C_k^{\text{Total}}(t)$ 为大用户 U_k 的总成本; ν 为倍数系数,当电量考核偏差为正时有 $\nu=1$,当电量考核偏差为负时有 $\nu>1$ 。

1.4 市场出清方式

本文所研究的交易方式为月度集中竞价模式,市场统一出清方式采用高低匹配模式,具体过程描述如下。

根据申报价格由低到高的顺序对发电企业进行排序,形成发电企业序列 $S_{\text{sort}} \{G_1, \dots, G_i, \dots, G_n\}$,按申报价格由高到低的顺序对用户进行排序,形成用户序列 $S_{\text{sort}} \{U_1, \dots, U_k, \dots, U_l\}$;设用户 U_k 的申报价格、申报电量分别为 $P_{U_k}^{\text{SP}}(t)$ 、 $Q_{U_k}^{\text{B}}(t)$,发电企业 G_i 的申报价格和申报电量分别为 $P_{G_i}^{\text{SP}}(t)$ 和 $Q_{G_i}^{\text{B}}(t)$ 。

将申报相同价格的发电企业(用户)打捆为1个发电电量包(用户电量包),最低价的发电电量包与最高价的用户电量包优先进行配对,当2个电量包的电量不相等时,较大电量包中各主体按各自申报电量的占比分配较小电量包的全部电量,然后将剩余电量单独打捆成新的电量包,与对方次一序列电量包进行配对,依此类推,形成价差对(用户电量包申报价格与发电电量包申报价格之差),见式(19)。

$$P_{U_k \rightarrow G_i}^{\text{SP}}(t) = P_{U_k}^{\text{SP}}(t) - P_{G_i}^{\text{SP}}(t) \quad (19)$$

当 $P_{U_k \rightarrow G_i}^{\text{SP}}(t) \geq 0$ 时,配对电量包能够成交;当 $P_{U_k \rightarrow G_i}^{\text{SP}}(t) < 0$ 时,配对电量包不能成交。

成交的配对电量包涉及的发用双方按任意一方包内各主体电量的占比匹配成交电量,成交价格 $P_{U_k \rightarrow G_i}^{\text{Done}}(t)$ 则为双方申报价格的平均值,见式(20)。

$$P_{U_k \rightarrow G_i}^{\text{Done}}(t) = \frac{P_{U_k}^{\text{SP}}(t) + P_{G_i}^{\text{SP}}(t)}{2} \quad (20)$$

当一方的所有电量包全部成交,或者价差对 $P_{U_k \rightarrow G_i}^{\text{SP}}(t) \geq 0$ 的配对电量包全部成交时,则交易结束。

2 基于 Berge-NS 均衡的动态博弈

2.1 Berge-NS 均衡模型

不确定性条件下多主体间的非合作博弈可表示为 $\Gamma \{I, X_\theta, f_\theta, Y_\theta\}$,其中 I 为所有博弈主体的集合, X_θ 为博弈主体 $\theta(\theta \in I)$ 的策略集合, f_θ 为博弈主体 θ

的支付函数或适应度函数, Y_θ 为不确定参数集合。博弈中, 各博弈主体通过选择自身的策略来最大化自身的支付函数, 当全部博弈主体均已选定各自的博弈策略后, 就可得到策略 x ; 若不确定参数为 y , 那么博弈主体 θ 可得到的收益为 $f_\theta(x, y)$, 此时可给出如下 NS 均衡的定义^[15]。

对于策略 $(x^*, y^*) \in X \times Y (X = \prod_{\theta \in I} X_\theta, Y = \prod_{\theta \in I} Y_\theta)$, 如果对于 $\forall x_\theta \in X_\theta$ 和 $\forall \theta \in I$, 有 $f_\theta(x_\theta, x_{-\theta}^*, y^*) \leq f_\theta(x_\theta^*, x_{-\theta}^*, y^*)$ 且 $f(x^*, y^*) - f(x^*, y) \notin \text{int } R_+^\delta$, 则对于 $\forall y \in Y$, 称 (x^*, y^*) 为多方博弈的 NS 均衡, 记:

$$f = \{f_1, f_2, \dots, f_\delta\} \quad (21)$$

$$\text{int } R_+^\delta = \{(r_1, r_2, \dots, r_\delta) \in \mathbf{N}^* \mid r_\theta > 0, \theta = 1, 2, \dots, \delta\} \quad (22)$$

$$R_+^\delta = \{(r_1, r_2, \dots, r_\delta) \in \mathbf{N} \mid r_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, \delta\} \quad (23)$$

其中, $\text{int } R_+^\delta$ 为 δ 个正整数的集合; R_+^δ 为 δ 个非负实数的集合; r_θ 为第 θ 个正实数; $\delta = m + n + l$ 为各方主体的数量总和。

在电力市场博弈中, 各主体间的策略选择会受到其他主体策略的影响, 在考虑不确定因素和非合作行为的市場博弈中, 引入如下所述的 Berge-NS 均衡^[16]概念。

设非合作博弈集为 $\Delta = \{I, \tilde{G}, \tilde{S}, \tilde{U}, X_\theta, Y, f_\theta, Q\}$, 其中 $\tilde{G} = \{G_1, \dots, G_i, \dots, G_n\}$ 为发电商集合, $\tilde{S} = \{S_1, \dots, S_j, \dots, S_m\}$ 为售电商集合, $\tilde{U} = \{U_1, \dots, U_k, \dots, U_l\}$ 为用户集合, $\tilde{G}, \tilde{S}, \tilde{U}$ 均为 I 的子集; $Q: X \rightarrow 2^Y$ 为不确定性参数的可行映射。此模型中博弈主体的策略选择可以影响不确定性参数的范围, 当博弈主体各自选择策略后得到的策略组合为 x , 此时影响博弈主体的不确定性参数集合为 $Q(x)$, 则对于策略 $(x^*, y^*) \in X \times Y$, 如果满足: ①对于任意 $G_i \in \tilde{G}, S_j \in \tilde{S}, x_{U_k} \in X_{U_k}, f_{S_j}(x_{U_k}, x_{-U_k}^*, y^*) \leq f_{S_j}(x^*, y^*)$; ②对于 $y^* \in Q(x^*)$ 且 $f_{S_j}(x^*, y^*) \leq f_{S_j}(x^*, y) \notin \text{int } R_+^\delta$, 则对于 $\forall y \in Q(x^*)$, 则称 (x^*, y^*) 为博弈的 Berge-NS 均衡。

另外, 以发电商 G_i 偏离均衡策略 x 为例来说明

Berge-NS 均衡与其他均衡之间的关系。特别地, 在 Berge-NS 均衡中有以下 3 种情况。

a. 如果 $Q(x) = Y$, 对于 $\forall x \in X$ 有:

$$f_{G_i}(x, y) \geq f_{G_i}(x, \bar{x}_{G_i}, y) \quad (24)$$

$$f_{S_j}(x, y) \geq f_{S_j}(x, \bar{x}_{G_i}, y) \quad (25)$$

$$f_{U_k}(x, y) \geq f_{U_k}(x, \bar{x}_{G_i}, y) \quad (26)$$

即当发电商 G_i 的策略发生变化时, 不会使其他主体的情况变坏, 则 Berge-NS 均衡成为不确定条件下的 NS 均衡。

b. 如果 $Q(x) = Y$, 对于 $\forall x \in X$ 有:

$$f_{G_i}(x, y) \geq f_{G_i}(\bar{x}_{G_i}, x_{\Lambda \setminus \{G_i\}}, y) \quad (27)$$

$$f_{S_j}(x, y) \geq f_{S_j}(\bar{x}_{G_i}, x_{\Lambda \setminus \{G_i\}}, y) \quad (28)$$

$$f_{U_k}(x, y) \geq f_{U_k}(\bar{x}_{G_i}, x_{\Lambda \setminus \{G_i\}}, y) \quad (29)$$

即当任何主体单独偏离均衡策略 x 时, 发电商 G_i 的收益不会多于 $f_{G_i}(x, y)$, 也就是说每个主体都极大化其他主体 $\Lambda \setminus \{G_i\}$ 的收益, 则 Berge-NS 均衡成为不确定性条件下的 Berge 均衡。

c. 如果 $Q(x) = Y$, 对于 $\forall x \in X$ 有:

$$f_{\Lambda \setminus \{G_i\}}(x, y) \geq f_{\Lambda \setminus \{G_i\}}(\bar{x}_{G_i}, \bar{x}_{\Lambda \setminus \{G_i\}}, y) \quad (30)$$

即当发电商 G_i 发生策略改变时, 其他主体 $\Lambda \setminus \{G_i\}$ 不能因为违背均衡策略 x 而获利, 则 Berge-NS 均衡成为不确定性条件下的强 Berge 均衡。

举例说明: 假设电力市场中有 3 个发电商主体 G_1, G_2 和 G_3 在某阶段进行非合作竞价博弈, 各主体均有降价 (-P)、不降价 (P) 和抬价 (+P) 3 种策略, 此时在没有外部因素影响的情况下, 各个主体在选择各自策略下的收益如表 1 所示。

由表 1 可得如下结论。

a. 在某轮博弈中, 当已知发电商 G_3 的竞价策略为 -P 时, 发电商 G_1 只有采取降价 (-P) 策略才能获得最大收益 3, 发电商 G_2 也应采取降价 (-P) 策略才能获得最大收益 3, 因此得到在此情况下三方的均衡策略为 (-P, -P, -P); 同理, 在发电商 G_3 确定自身的策略为 P 和 +P 的情况下, 当三方的均衡策略分别为 (P, P, P) 和 (+P, +P, +P) 时, 出现了多重 Nash

表 1 电力市场中各博弈主体的收益

Table 1 Benefit of each gamer in electricity market

G_1 竞价策略	G_2 竞价策略	G_3 竞价策略	发电商收益	G_1 竞价策略	G_2 竞价策略	G_3 竞价策略	发电商收益	G_1 竞价策略	G_2 竞价策略	G_3 竞价策略	发电商收益
		-P	3,3,3			-P	2,3,3			-P	1,3,3
	-P	P	3,3,2		-P	P	2,3,2		-P	P	1,3,2
		+P	3,3,1			+P	2,3,1			+P	1,3,1
		-P	3,2,3			-P	2,2,3			-P	1,3,3
-P	P	P	3,2,2	P	P	P	4,4,4	+P	P	P	3,4,4
		+P	3,2,1			+P	4,4,3			+P	3,4,3
		-P	3,1,3			-P	2,1,3			-P	1,1,3
	+P	P	3,1,2		+P	P	4,3,4		+P	P	3,3,4
		+P	3,1,1			+P	4,3,3			+P	5,5,5

均衡解。

b. 然而,当发电商的竞价策略 x^* 在不确定性因素 y (如得知某种市场信息) 的影响下发生偏离时,就会产生新的收益,且这种收益使得其他主体不能违背竞价策略 x^* 而获利。如 G_2 选择新策略 P 能为其带来收益 6,而 G_1 、 G_3 在 G_2 选择新策略的情况下依然只能选择降价 (-P) 策略才能获得最大收益 (3 和 3),此时将收益 (3,6,3) 对应的均衡策略 (-P,P,-P) 称为强 Berge 均衡。

c. 简单 Berge 均衡是指在不确定因素影响条件下,当主体偏离均衡点时,各局中人都极大化其他局中人的支付,如表 1 中的均衡策略 (-P,-P,-P) 为 Nash 均衡解,若 G_1 改变策略为 P,其收益为 3,此时 G_2 在 -P 策略下的收益会成为 4,那么 (3,4,3) 对应的均衡策略 (P,-P,-P) 即为简单 Berge 均衡。

d. Berge-NS 均衡是指当博弈主体的策略选择不确定性因素的影响下发生偏离时,新策略 x^* 会对其他主体的不确定性参数影响范围产生影响,而其他主体也会根据选择新策略不会使得其他人的情况变坏,从而产生新的均衡,即在不确定性因素的影响下多重 Nash 均衡会发生变化,从中选取最佳均衡策略使得所有主体的情况不会变坏。如当 G_3 的策略为 -P 时, G_1 偏离 Nash 均衡并选择 P 策略时能产生最大的收益 4,此时根据 G_1 、 G_3 的策略, G_2 的不确定性因素范围发生变化,当其选择 P 策略也能为其带来最大收益 4,则此时均衡策略为 (P,P,-P);同理,当 G_3 的策略为 P 时,新的均衡策略 (P,-P,P) 对应的收益为 (2,5,4);当 G_3 的策略为 +P 时,新的均衡策略 (P,P,+P) 对应的收益为 (6,3,5)。可以看出,在不确定性因素的影响下新的均衡策略 (P,P,-P) 并没有使其他发电商的情况变坏,而均衡策略 (P,-P,P) 和 (P,P,+P) 使至少有一个主体的收益比 Nash 均衡策略 (P,P,P) 和 (+P,+P,+P) 对应的收益变小,由此选择均衡策略 (P,P,-P) 即为 Berge-NS 均衡。

通过上述分析可对 Berge-NS 均衡、简单 Berge 均衡、强 Berge 均衡以及 Nash 均衡有基本的了解。而在竞争性电力市场环境下,市场主体的类型少但数量较多,多主体间的市场博弈会使得决策环境充满不确定性,外部因素诸如政策规则、气候条件以及市场寻租行为等都会对电力市场主体竞价行为产生影响,在市场博弈竞争过程中主要体现在主体的“有限理性”上,而不是“完全理性”行为。在外部因素的刺激下,市场主体的不确定性主要会使其他“有限理性”主体的决策变量变为不确定性参数,而市场主体仅能对这些决策变量的参数范围变化做出预判,根据历史竞价行为和当前已完成竞价行为来判断其他主体的不确定性参数范围,从而为自身竞价策略

的制定提供决策依据。在这种博弈情况下,不确定因素的影响使得电力市场多主体非合作竞争容易出现多个 Nash 均衡解的存在。众所周知,Nash 均衡在多目标最优解的多重性及选择性问题上并不完美,而 Berge 均衡恰好能解决多 Nash 均衡解的选择性问题^[17],因此,本文将对电力市场多主体间竞争博弈所产生的 Berge-NS 均衡进行探讨和研究。

2.2 Berge-NS 均衡解的存在性

并非每个非合作博弈都存在均衡点。在电力市场的竞争博弈中,各主体间的策略选择受到其他主体的影响,其他主体的不确定性行为在非合作状态下会使均衡发生变化,因此有必要证明本文所构建博弈模型存在 Berge-NS 均衡解。因为篇幅所限,Berge-NS 均衡解存在性的证明详见附录 A。

2.3 Berge-NS 均衡下电力市场多主体博弈流程

设发电商集合为 $\Omega_G = \{G_i | i=1,2,\dots,n\}$,发电商的全部交易量为 $Q_G = \sum_{G_i \in \Omega_G} Q_{G_i}$;设售电商交易主体的集合为 $\Omega_S = \{S_j | j=1,2,\dots,m\}$,售电商所需交易量为 $Q_S = \sum_{S_j \in \Omega_S} Q_{S_j}$;设大用户交易主体的集合为 $\Omega_U = \{U_k | k=1,2,\dots,l\}$,大用户所需交易量为 $Q_U = \sum_{U_k \in \Omega_U} Q_{U_k}$,严格规定两两主体间的购电量与售电量相等,且当两两之间发生交易时一方的售电价格等于对方的购电价格。在多元主体交易模式下,无论是发电商、售电商还是用户,相互之间存在购/售电价及电量间的博弈,都可以同时选择与多个交易对象间进行电价、电量竞争,且交易双方都不唯一;市场博弈可呈现多种形式,如发电商交叉博弈、售电商交叉博弈、交易双方交叉博弈等。因此,基于 Berge-NS 均衡的电力市场多主体竞争博弈的步骤可描述如下。

a. 初始化操作。分别将发电商、售电商以及大用户随机放置于统一圆盘中,形成首尾相接的圆形链条。为了提高运算效率,本文规定在每轮博弈中各博弈主体仅与其相邻的主体之间进行竞价操作,且每次竞价伴随电量申报。设置博弈回合数为 N_{\max} ,在可行区域内随机初始化主体的竞价策略空间为:

$$X = \{p_{G_1}, p_{G_2}, \dots, p_{G_n}, p_{S_1}, p_{S_2}, \dots, p_{S_m}, p_{U_1}, p_{U_2}, \dots, p_{U_l}\} \quad (31)$$

$$Y = \{Q_{G_1}, Q_{G_2}, \dots, Q_{G_n}, Q_{S_1}, Q_{S_2}, \dots, Q_{S_m}, Q_{U_1}, Q_{U_2}, \dots, Q_{U_l}\} \quad (32)$$

其中, X 、 Y 分别为各市场主体的价格策略和电量策略空间集合,每个价格策略对应相应的电量策略; p_{G_i} 、 Q_{G_i} ($i=1,2,\dots,n$) 分别为发电商 G_i 的初始化竞价策略、初始化申报电量; p_{S_j} 、 Q_{S_j} ($j=1,2,\dots,m$) 分别

为售电商 S_j 的初始化竞价策略、初始化申报电量; $p_{U_k}, Q_{U_k} (k=1, 2, \dots, l)$ 分别为大用户主体 U_k 的初始化竞价策略、初始化申报电量。

b. 排序操作。 发电商博弈主体按照本轮让利价格 Δp^G (发电商申报电价与上网电价之差) 策略按从大到小进行排序, 售电商和大用户分别根据报价差 $\Delta \hat{p}^S$ 和 $\Delta \hat{p}^U$ (售电商或大用户的申报电价与目录电价之差) 按从小到大进行重新排序。

$$\Delta p^G = p_{G_i} - p^{\text{grid}} \quad (33)$$

$$\Delta \hat{p}^S = p_{S_j} - p^{\text{tariff}} \quad (34)$$

$$\Delta \hat{p}^U = p_{U_k} - p^{\text{tariff}} \quad (35)$$

其中, p^{grid} 为上网电价; p^{tariff} 为目录电价。

c. 计算当前策略下各博弈主体的最优适应度函数值 $f_{G_i}, f_{S_j}, f_{U_k}$ 。 判断各主体的适应度函数值是否满足自身条件 γ , 若满足, 则按上述顺序进行市场电量交易, 并转步骤 **e**; 若不满足, 则转步骤 **d**。

d. 判断当前博弈回合是否有市场主体发生竞价策略突变, 即加入了不确定性因素 $y^* \in Y$, 若存在突变, 则重新计算含有不确定性因素的市场主体适应度函数值 $f'_{G_i}, f'_{S_j}, f'_{U_k}$; 若不存在, 则转步骤 **e。**

e. 判断是否满足均衡条件。 以任意售电商 S_j 为例, 对于当前竞价策略 (x^*, y^*) , 判断是否满足条件 $f_{S_j}(x_{S_j}, x_{-S_j}, y^*) \leq f_{S_j}(x^*, y^*)$ 和条件 $f_{S_j}(x^*, y^*) \leq f_{S_j}(x^*, y) \notin \text{int } R^0$, 若满足, 则说明达到 Berge-NS 均衡; 若不满足, 则继续循环。

f. 各主体根据当前情况更新竞价策略, 形成新的竞价策略空间 X_{new} 并转步骤 **d 继续循环。** 博弈主体 θ 的竞价策略 p_θ 可由其相邻主体策略 p_θ^+ 和 p_θ^- 、其他群体整体策略 $p_{-\theta}^{\text{other}}$ 以及不确定性因素 y 共同判断制定, 即 $p_\theta \leftrightarrow \{p_\theta^+, p_\theta^-, p_{-\theta}^{\text{other}}, y\}$ 。

g. 循环条件判断, 并输出 Berge-NS 均衡电价策略和电量交易情况。

3 基于 KH 优化算法的 Berge-NS 均衡求解

电力市场多主体非合作博弈实质上是一个多目标优化问题, 每个主体策略受到其他主体策略的约束, 在每一轮市场竞价博弈中可直接以对偶表示形式进行求解, 但从整体动态博弈模型角度来看, 为了保证在全局寻优基础上对竞价策略进行长期调整及其收敛性, 对多主体产生的 Berge-NS 均衡解显然难以用常规解析方法进行求取, 因此需要一种快速且保证全局寻优的启发式算法来对模型进行求解。本文将采用 KH 优化算法对所构建的电力市场多主体非合作动态博弈模型进行求解, 以实现各博弈主体的 Berge-NS 均衡。KH 优化算法是一种新型的群智能优化算法, 其迭代过程是通过 3 种运动的协同合

作来更新粒子的位置, 随后通过彼此间的信息交流来寻找复杂优化问题的最优解。KH 优化算法利用随机搜索方向替代函数梯度方向, 不依赖于所求解问题函数的具体信息, 算法采用群体搜索具有高度的并行性和鲁棒性, 相比于其他群智能优化算法, KH 优化算法具有更快的收敛性^[18], 更适用于电力市场多主体动态博弈模型的求解。

KH 优化算法是对海洋磷虾觅食行为仿生的启发式优化算法, 单只磷虾通过多维空间搜索逐渐移向密度更高的食物。每只磷虾的适应度函数与群体最高密度、目标食物的距离有关, 其在多维空间中的运动通常取决于诱导过程、觅食运动以及随机扩散这 3 个过程^[19]。

a. 诱导过程。 个体磷虾 i 的移动速度和移动方向受其他磷虾的影响, 速度公式为:

$$v_i = A_i v_i^{\text{max}} + B_n v_i^{\text{old}} \quad (36)$$

$$A_i = A_i^{\text{new}} + A_i^{\text{target}} \quad (37)$$

$$A_i^{\text{new}} = \sum_{j=1}^{N_s} \frac{F_i - F_j}{F_{\text{worst}} - F_{\text{best}}} \frac{o_i - o_j}{|o_i + o_j| + \text{rand}(0, 1)} \quad (38)$$

$$A_i^{\text{target}} = 2[\text{rand}(0, 2) + i/N_{\text{max}}] F_i^{\text{best}} o_i^{\text{best}} \quad (39)$$

其中, v_i^{max} 为磷虾 i 的最大感应速度; v_i^{old} 为磷虾 i 上次的感应速度; $\text{rand}(0, 1)$ 、 $\text{rand}(0, 2)$ 分别为 0~1 和 0~2 之间的随机数; A_i 为磷虾 i 的方向控制值, 受局部方向 A_i^{new} 和目标方向 A_i^{target} 的影响; B_n 为感应运动惯性权重; F_i, F_j 分别为磷虾 i, j 的适应度值; $F_{\text{best}}, F_{\text{worst}}$ 分别为群体的最优和最差适应度值; o_i, o_j 分别为磷虾 i, j 的位置; N_{max} 为最大迭代次数; $F_i^{\text{best}}, o_i^{\text{best}}$ 分别为磷虾 i 的最优适应度值和最佳位置; N_s 为感应距离 D_i 邻域内的磷虾个体数量, 感应距离公式如式(40)所示。

$$D_i = \frac{1}{5N_p} \sum_{j=1}^{N_p} |o_i - o_j| \quad (40)$$

其中, N_p 为种群规模大小。

b. 觅食运动。 磷虾个体的觅食行为主要由当前目标食物位置和上次觅食行为经验决定:

$$v_{\text{fi}} = 0.02 \vartheta_i + w_x v_{\text{fi}}^{\text{old}} \quad (41)$$

$$\vartheta_i = 2 \left(1 - \frac{i}{N_{\text{max}}} \right) F_i \frac{\sum_{j=1}^{N_s} \frac{o_j}{F_j}}{N_s} + F_i^{\text{best}} o_i^{\text{best}} \quad (42)$$

其中, ϑ_i 为食物吸引因子; w_x 为觅食运动权重系数; $v_{\text{fi}}^{\text{old}}$ 为磷虾 i 上次的觅食运动。

c. 随机扩散。 磷虾个体觅食运动的扩散是随机的, 可表示为:

$$v_{\text{di}} = \lambda v_{\text{di}}^{\text{max}} \quad (43)$$

其中, v_d^{\max} 为最大扩散速度; λ 为随机方向因子。

经过上述 3 个步骤之后, 磷虾 i 的位置得到更新。磷虾 i 的位置从时间 t 到 $t+\Delta t$ 变化为:

$$o_i(t+\Delta t) = o_i(t) + \text{rand}(0, 2) \times \sum_{i=1}^N (B_U^i - B_L^i) (v_i + v_{fi} + v_{di}) \quad (44)$$

其中, N 为控制参数的数量; B_U^i 、 B_L^i 分别为第 i 个控制变量的上限和下限, 上、下限之间的差值即为磷虾群体的搜索范围。

可将磷虾群体中的每个粒子看作一个博弈主体, 设定每个粒子携带竞价策略, 每个主体的竞价策略受到其他主体策略的影响, 3 类主体的策略可表示为:

$$X_i^{G_i} = \{p_i^{G_i} | (p_i^{-G_i}, p_i^S, p_i^U)\} \quad (45)$$

$$X_i^{S_j} = \{p_i^{S_j} | (p_i^{-S_j}, p_i^G, p_i^U)\} \quad (46)$$

$$X_i^{U_k} = \{p_i^{U_k} | (p_i^{-U_k}, p_i^G, p_i^S)\} \quad (47)$$

其中, $X_i^{G_i}$ 为发电商 G_i 在第 t 个博弈回合中的竞价策略, 其受到其他主体在第 t 个博弈回合中竞价策略不确定性范围的影响; $p_i^{G_i}$ 为发电商 G_i 在第 t 个博弈回合中确定后的竞价策略; $p_i^{-G_i}$ 为除 G_i 之外其他发电商的竞价策略; p_i^S 为在第 t 个博弈回合中全部售电商的竞价策略; p_i^U 为在第 t 个博弈回合中全部大用户主体的竞价策略; p_i^G 为在第 t 个博弈回合中全部发电商的竞价策略; $X_i^{S_j}$ 为售电商 S_j 在第 t 个博弈回合中的竞价策略; $X_i^{U_k}$ 为大用户 U_k 在第 t 个博弈回合中的竞价策略; $p_i^{-S_j}$ 为除 S_j 之外其他售电商的竞价策略; $p_i^{-U_k}$ 为除 U_k 之外其他大用户的竞价策略。综上可得到基于 KH 优化算法求解电力市场多主体博弈 Berge-NS 均衡解的流程如下。

a. 初始化设置。设定种群大小 N_p , 最大迭代次数 (博弈回合数) N_{\max} , 当前迭代次数 t ; 初始化种群个体位置 $o_\theta(t)$, 最大感应速度 v_θ^{\max} , 最大随机扩散速度 v_d^{\max} , 感应运动权重系数 B_n ; 设定搜索空间上限 B_U^θ 、下限 B_L^θ , 个体觅食运动惯性权重 w_x ; 初始化个体博弈策略空间 X_θ ; 设定每个个体仅与其相邻的 2 个个体形成博弈竞争。

b. 根据磷虾个体的策略空间, 将目标函数作为适应度值, 并评价每个个体适应度。将发电商个体按照让利价格 Δp^G 的大小进行排序, 售电商和大用户分别根据报价差 $\Delta \hat{p}^S$ 和 $\Delta \hat{p}^U$ 按从小到大的顺序重新排序。

c. 判断个体适应度值是否满足条件 γ , 若满足, 则按照顺序进行交易; 若不满足, 则判断当前回合各主体是否发生竞价策略突变, 即判断是否受到外部因素的影响而改变竞价策略。若竞价策略发生突变, 则重新计算改变策略后的个体适应度函数值, 即

个体 θ 受外部影响改变竞价策略, 其他主体会随之改变竞价策略, 各主体对其他主体的竞价策略会产生不确定性参数范围, 将其他主体的不确定性竞价策略视为主体 θ 的不确定性参数; 若个体的竞价策略不发生突变, 则按照原竞价策略进行 Berge-NS 均衡条件判断。

d. 分别计算磷虾个体运动的诱导速度 v_θ 、觅食速度 $v_{f\theta}$ 和随机扩散速度 $v_{d\theta}$ 。

e. 评价磷虾个体的适应度函数值。对于当前竞价策略 (x^*, y^*) , 判断是否满足条件 $f_\theta(x_\theta, x_{-\theta}, y^*) \leq f_\theta(x^*, y^*)$ 和 $f_\theta(x^*, y^*) \leq f_\theta(x^*, y) \notin \text{int} R_+^2$, 若满足条件, 则说明达到 Berge-NS 均衡, 跳出循环; 若不满足, 则继续循环。

f. 对个体位置 $o_\theta(t+\Delta t)$ 进行更新, 磷虾个体依照本回合的情况更新竞价策略 X_θ^{new} 。

g. 令 $t=t+1$, 返回步骤 **b** 继续循环计算, 直到满足 t 达到最大迭代次数 N_{\max} 。此时各主体的竞价策略即为 Berge-NS 均衡, 输出各主体的适应度值。

4 算例验证

本文选取西南某工业园区的 12 节点系统市场交易进行算例分析, 拓扑结构如附录 B 中的图 B1 所示。在该系统中, G_3 、 G_6 、 G_7 、 G_{11} 为 4 家发电商, 运行参数见表 2; L_1 、 L_4 、 L_5 为 3 家大用户负荷节点; L_2 、 L_8 、 L_9 、 L_{10} 、 L_{12} 为 5 个工商业类用户负荷节点, 各节点包括 5 家工商业用户。区域内存在 3 家竞争性的售电公司 S_1 、 S_2 、 S_3 。假设市场采用双边合同方式进行博弈竞价, 惩罚电价为 500 元/(MW·h), 同时假设系统不存在阻塞情况。

表 2 发电商的基本参数

Table 2 Basic parameters of generation companies

发电商	a_i	b_i	c_i	最小发电功率/MW	最大发电功率/MW
G_3	0.66	17.3	5 633.7	0	60
G_6	0.58	13.6	6 228.3	12	50
G_7	0.57	14.7	4 862.5	12	50
G_{11}	0.49	15.1	4 424.3	0	60

设定采用 KH 优化算法求解该系统的 Berge-NS 均衡时共进行 10 轮博弈仿真, 每轮博弈回合数为 200。另外, KH 优化算法的参数设置如下: 种群规模为 $N_p = 10$, 每轮最大博弈回合数 $N_{\max} = 200$, 磷虾的最大感应速度 $v^{\max} = 0.01$, 最大随机扩散速度 $v_d^{\max} = 0.001$, 感应运动权重系数 $B_n = 0.4$, 算法搜索空间范围设定为 $[-10, 10]$, 个体竞价上、下限分别设定为 1 元/(kW·h)、0.2 元/(kW·h)。测试平台环境为 Windows7 64 bit 专业版系统, Inter(R) Core(TM) i5-6200U 2.3 GHz 系列 CPU 和 8 GB RAM, 编程语言选取 MATLABR2016a。

图 1 为 KH 优化算法在第 1 轮博弈中求解市场

竞价 Berge-NS 均衡的过程。可见,各类市场主体在经历多回合市场博弈之后,竞价策略逐渐趋向一个稳定值,即市场达到均衡状态。

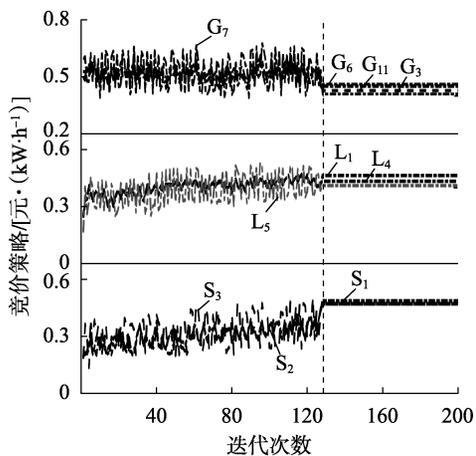


图 1 第 1 轮博弈 Berge-NS 均衡求解过程

Fig.1 Solving process of Berge-NS equilibrium in first game round

图 2 为 KH 优化算法搜索过程中各方主体竞价策略的盒装图。从图中可以看出,各方主体的竞价策略更加集中在 0.4 元/(kW·h)附近,且发电主体的竞价策略低于其他购电主体的竞价策略,说明在每轮博弈中 KH 优化算法能够从多个 Nash 解中求取 Berge-NS 均衡解,也证明了 KH 优化算法求解此类问题的有效性和可行性。此外,图 2 中还显示主体 G_3 、 L_5 、 S_1 、 S_2 和 S_3 的竞价策略出现了部分异常值,且异常值均高于平均水平,说明这几个主体在每轮博弈的竞价策略分布呈现右偏态,博弈主体可能采取了相对激进或保守的竞价策略,使得部分竞价偏离了整体水平。

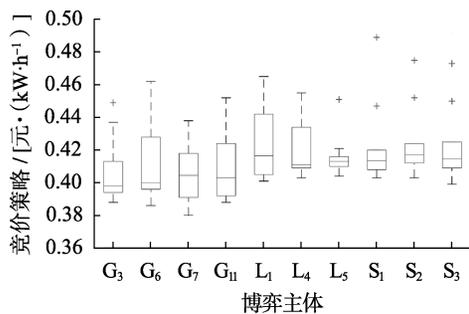


图 2 均衡状态下各主体竞价策略盒状图

Fig.2 Boxplot of each player's bidding strategy in equilibrium state

图 3、图 4 分别展示了发电商、售电商和大用户在每轮博弈达到 Berge-NS 均衡时的售/购电量。

由图 3 可知,在第 1 轮博弈中,发电商 G_7 的售电量最大,这是因为发电商 G_7 的竞价策略相对激进,让利程度大使其获取了更多交易电量的可能;相对地,发电商 G_6 的竞价策略相对保守,其报价让利程度较小,因此在该轮博弈中的排序靠后,售电量较

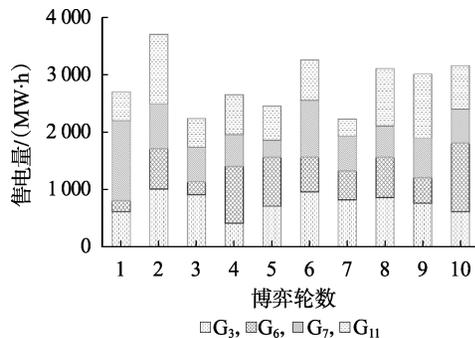


图 3 每轮博弈中发电商的售电量

Fig.3 Sold electricity of generation companies in each game round

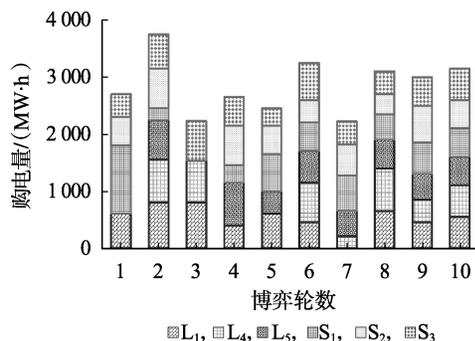


图 4 每轮博弈中大用户、售电商的购电量

Fig.4 Purchased electricity of big consumers and electric power sellers

低。而在第 2 轮博弈中,各发电商在第 1 轮交易信息的基础上采取了较为近似的竞价策略,因此除 G_7 外其他发电商的售电量均大幅度增加。在第 3 轮博弈中,由于在上一轮中部分发电商的交易量突然增大,因此各主体在本轮采取了相对保守的竞价策略,前 2 轮表现稳定的 G_{11} 则在本轮的交易量最大。随着博弈回合数的增加,发电商获取的可依据信息越来越多,因此在之后的博弈中各个主体会根据当前的需求量及每轮的信息及时调整竞价策略,最终使得主体竞争售电总量逐渐达到均衡稳定状态。

由图 4 可知,在第 1 轮博弈中,售电商 S_1 的购电量最大,说明 S_1 的让利程度最大,从而获取了与低价发电商交易电量的优先权;而大用户 L_4 、 L_5 的购电量为 0,说明 L_4 、 L_5 的竞价策略过低使其不能够与发电商的报价相匹配,从而无法完成交易。在第 2 轮博弈中,各个购电主体在第 1 轮博弈信息的基础上大胆报价,从而能够与有较高让利程度的发电商的价格相匹配, L_4 、 L_5 在本轮交易中获取了较多的电量以弥补上一轮未获取任何电量的损失;而 S_1 则考虑到偏差考核的影响,在第 2 轮博弈中降低了交易电量; L_1 、 S_2 、 S_3 在本轮交易中相对稳定。在第 3 轮博弈中, L_1 和 L_4 继续上一轮的稳定表现,获得较多的电量,但 L_5 、 S_1 、 S_2 的交易量为 0,这是因为在前几轮交易积累量和“有限理性”的作用下各主体采取了较为保守的竞价策略,收益交易量出

现较大的波动。然而随着博弈的进行,当竞价策略趋向稳定时,各购电主体的电能交易量逐渐达到了均衡。

表 3 显示了各轮博弈中发电商主体和售电商主体在均衡状态下的适应度函数值。在第 1 轮博弈中,发电商 G_7 和售电商 S_1 分别获取了较大的收益,这是因为 G_7 和 S_1 在该轮信息较少的条件下采取了激进的竞价策略,使得各自获取了交易电量的优先权,从而获得了更多的收益;在第 2 轮博弈中,售电商 S_2 和 S_3 则吸取第 1 轮博弈的经验,增加了让利程度使其获得了更多的交易电量,增加了本轮的收益;在第 3 轮博弈中,售电商 S_1 和 S_2 的收益出现负值,这是因为 S_1 和 S_2 对局势掌握不准确,其竞价策略在电力市场竞争中失去了优势,从而未能购得满足当前需求的电量,使其不能匹配大量的合同电量,从而承担了较高的惩罚费用,所以其收益明显降低;随着博弈的深入,各主体积极谋求更低的竞价优势和更高的利润空间,然而每个博弈方在“有限理性”的驱使下不断降低交易电价,各主体的整体收益不断靠拢,最后逐渐达到均衡。

表 3 发电商和售电商的适应度函数值

Table 3 Fitness function values of generation companies and electric power sellers

博弈轮数	收益/万元						
	G_3	G_6	G_7	G_{11}	S_1	S_2	S_3
1	9.66	3.48	20.02	8.20	18.96	11.76	3.68
2	14.90	10.80	12.02	16.30	1.96	14.55	10.76
3	9.81	3.22	7.50	6.90	-8.24	-7.84	12.88
4	5.00	10.40	6.71	7.07	6.874	12.75	9.15
5	7.77	9.69	3.90	7.38	11.76	10.35	6.53
6	9.50	6.54	9.20	7.35	8.86	8.42	10.45
7	9.15	5.87	5.88	3.57	10.23	10.22	7.93
8	9.18	7.70	6.11	10.40	7.96	6.85	7.55
9	7.95	4.86	7.21	11.00	9.88	13.44	8.24
10	6.30	11.80	6.54	7.58	8.24	8.47	9.30
平均值	8.922	7.436	8.509	8.575	7.648	8.897	8.647

表 4 显示了大用户主体在每轮博弈中的适应度函数值。可以看出, L_1 、 L_4 和 L_5 出现零交易量的次

表 4 大用户主体适应度函数值

Table 4 Fitness function values of big consumers

博弈轮数	成本/万元		
	L_1	L_4	L_5
1	28.4	0	0
2	36.5	34.1	31.6
3	36.7	31.7	0
4	17.8	0	31.1
5	26.9	0	16.6
6	19.6	28.7	22.7
7	0	8.59	18.5
8	26.3	30.8	20.8
9	19.5	16.3	18.2
10	24.0	22.2	20.5
平均值	23.57	17.24	18.00

数分别为 1 次、3 次和 2 次,说明 L_1 的竞价策略相对稳定,对市场博弈的把握最为稳定,而 L_4 竞价策略的波动幅度最大, L_5 次之,说明大用户主体根据自身的电量需求对竞价策略的选择最为灵活,虽然在某轮博弈中会出现零交易量的情况,但可以通过其他回合的博弈来弥补电量交易不足。此外,主体 L_1 的交易平均支付成本最大,说明其在竞争市场上获取了较多的电量, L_4 和 L_5 的平均支付成本则相差不大,但也满足了用能需求,这也表明了大用户主体更加愿意在市场竞争中从发电商直接获取电能,减少中间环节可有效降低用电成本。

此外,为了说明市场主体间竞价行为不确定性因素对博弈均衡的影响,表 5—7 分别给出了发电商、售电商、大用户在每轮博弈中不确定性参数的感知范围。影响市场主体的不确定性参数感知范围主要受到其他主体决策变量的影响,在每轮博弈中均会出现多重 Nash 均衡解,由于受到外部因素的影响,无论哪个主体率先打破 Nash 均衡,都会产生新的动态博弈,由此产生的新均衡解即为本轮博弈的 Berge-NS 均衡解。

由表 5 可看出,在第 1 轮博弈中,发电商 G_3 的不确定性参数的集合为 $\{p_{G_6}, p_{G_7}, p_{G_{11}}, p_{S_1}, p_{S_2}, p_{S_3}, p_{L_1}, p_{L_4}, p_{L_5}\}$,发电商 G_3 竞价策略的确定受到其他主

表 5 发电商不确定性参数的感知范围

Table 5 Perceived ranges of uncertain parameters for generation companies

博弈轮数	感知范围/[元·(kW·h) ⁻¹]			
	p_{G_3}	p_{G_6}	p_{G_7}	$p_{G_{11}}$
1	[0.432,0.491]	[0.429,0.483]	[0.422,0.485]	[0.436,0.501]
2	[0.443,0.468]	[0.428,0.457]	[0.442,0.464]	[0.440,0.459]
3	[0.421,0.450]	[0.418,0.457]	[0.422,0.452]	[0.412,0.458]
4	[0.402,0.439]	0.408,0.441	[0.408,0.444]	[0.407,0.439]
5	[0.412,0.429]	[0.404,0.432]	[0.404,0.429]	[0.405,0.431]
6	[0.390,0.414]	[0.395,0.415]	[0.396,0.413]	[0.394,0.418]
7	[0.388,0.416]	[0.392,0.417]	[0.402,0.417]	[0.395,0.416]
8	[0.401,0.415]	[0.405,0.420]	[0.404,0.418]	[0.394,0.415]
9	[0.402,0.422]	[0.403,0.417]	[0.403,0.419]	[0.405,0.418]
10	[0.392,0.414]	[0.395,0.415]	[0.390,0.418]	[0.393,0.420]

表 6 售电商不确定性参数的感知范围

Table 6 Perceived ranges of uncertain parameters for electric power sellers

博弈轮数	感知范围/[元·(kW·h) ⁻¹]		
	p_{S_1}	p_{S_2}	p_{S_3}
1	[0.445,0.512]	[0.435,0.492]	[0.445,0.494]
2	[0.450,0.457]	[0.451,0.458]	[0.450,0.456]
3	[0.414,0.448]	[0.424,0.451]	[0.424,0.452]
4	[0.403,0.428]	[0.409,0.433]	[0.419,0.435]
5	[0.400,0.426]	[0.402,0.424]	[0.408,0.427]
6	[0.396,0.420]	[0.395,0.420]	[0.393,0.416]
7	[0.393,0.421]	[0.392,0.418]	[0.390,0.421]
8	[0.394,0.414]	[0.396,0.421]	[0.395,0.416]
9	[0.401,0.420]	[0.401,0.413]	[0.399,0.417]
10	[0.403,0.423]	[0.411,0.428]	[0.402,0.420]

表 7 大用户不确定性参数的感知范围

Table 7 Perceived ranges of uncertain parameters of big consumers

博弈轮数	感知范围/[元·(kW·h) ⁻¹]		
	P_{L_1}	P_{L_4}	P_{L_5}
1	[0.427,0.537]	[0.418,0.511]	[0.437,0.483]
2	[0.453,0.461]	[0.448,0.529]	[0.450,0.462]
3	[0.432,0.455]	[0.414,0.459]	[0.434,0.449]
4	[0.405,0.441]	[0.412,0.440]	[0.408,0.438]
5	[0.407,0.428]	[0.405,0.433]	[0.406,0.422]
6	[0.390,0.415]	[0.395,0.422]	[0.393,0.417]
7	[0.392,0.418]	[0.390,0.416]	[0.390,0.416]
8	[0.404,0.418]	[0.393,0.415]	[0.390,0.412]
9	[0.402,0.416]	[0.409,0.424]	[0.405,0.423]
10	[0.401,0.417]	[0.403,0.420]	[0.401,0.417]

体竞价策略的影响,而发电商 G_3 竞价策略的感知范围为[0.432,0.491]元/(kW·h),结合第 1 轮博弈中 G_3 的申报价格 0.449 元/(kW·h),说明第 1 轮博弈中 G_3 的报价策略相对保守,因此在第 2 轮博弈中其他主体对 G_3 竞价策略的感知范围为[0.443,0.468]元/(kW·h),但 G_3 在第 1 轮博弈中的售电量仅为 600 MW·h,为了促进电量销售以增收效益, G_3 根据上一轮博弈中 G_6 、 G_7 、 G_{11} 的竞价表现和其他用户主体的竞价行为,最终得出第 2 轮博弈的申报价格为 0.437 元/(kW·h),售电量增加至 1 000 MW·h,收益较第 1 轮博弈有较大的提升,如此不断重复直到完成全部轮数的博弈。由此可见,主体间竞价行为的不确定性是影响主体竞价策略制定的主要因素,将其他主体的竞价策略作为判断依据,对各个不确定性参数的范围做出感知预判,进而根据需求制定竞价策略,通过每轮不断博弈、不断打破 Nash 均衡,从多重均衡解中获取 Berge-NS 均衡解。

发电商和售电商在考虑不确定性和不考虑不确定性 2 种情形下的收益对比如图 5 所示,大用户在 2 种情形下的成本对比如图 6 所示。由图 5、6 可知,在不考虑不确定性的情形下容易出现多个 NS 均衡解,与考虑不确定性情形的结果相比,发电商收益的均衡解 1 有所降低,售电商收益和大用户成本的均衡解 1 均有所增加;发电商收益的均衡解 2 比考虑不确定性的情形有所增加,但此时售电商收益的均衡解 2 却有所降低,大用户成本的均衡解 2 略微增加;大用户成本的均衡解 3 有所降低,且发电商和售电商收益的均衡解 3 也均有所下降。因此,在不考虑不确定性的情形下无论是哪个均衡解,与考虑不确定性因素的曲线相比,各类主体自身收益总会出现下降的情况,且收益出现下降的主体会通过外部因素条件来打破这种均衡,以期得到更高的收益;在博弈过程中,市场主体为了获取比 NS 均衡更高的收益而改变竞价策略,会迫使其他主体追随其改变竞价策略,在“有限理性”的驱动下,主体竞价策略的改变依据是对其他主体竞价策略的不确定性范围做

出有限的判断,以期提高自身的收益,直至达到 Berge-NS 均衡状态。

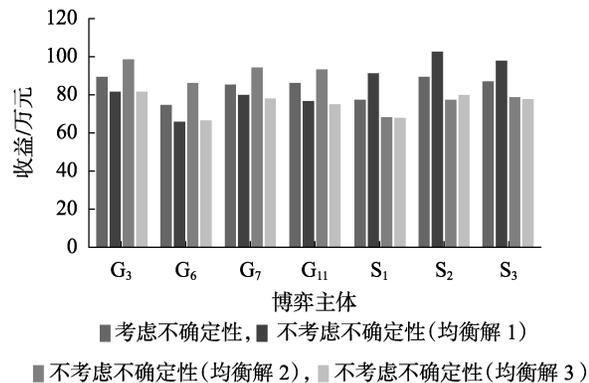


图 5 2 种情形下发电商和售电商的收益对比

Fig.5 Comparison of benefits among generation companies and electric power sellers under two situations

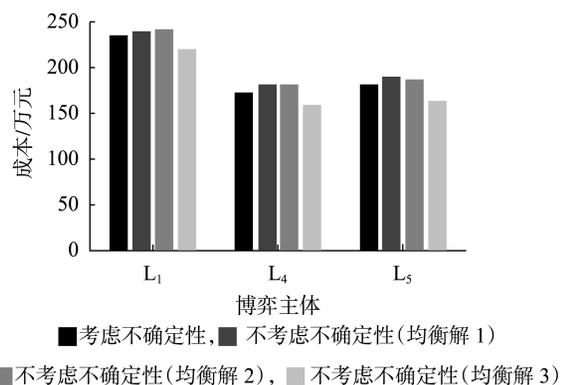


图 6 2 种情形下大用户的成本对比

Fig.6 Comparison of costs among big consumers under two situations

综上所述,KH 优化算法在求解每轮电力市场博弈问题中能够从多个 Pareto 解中找出 Berge-NS 均衡解。在博弈初期,由于信息的不完全和“有限理性”的驱使,各主体竞价策略的随机性较大,使得发电商和售电商间的收益差别较大,大用户间的购电成本差别也较大;在博弈中期,随着主体间博弈信息的不断积累,各个主体的竞价策略也在逐渐靠拢,发电商主体和售电商主体间的收益差别不断变小;在博弈后期,各主体的让利程度不断缩小,直至达到稳定的均衡状态。

5 结论

a. 本文研究了新形势下电力市场多元主体博弈竞争问题,根据各市场主体在电力交易中的需求,分别对发电商、售电商和大用户主体建立了市场决策模型,并充分考虑了多方主体之间的竞争关系和各自的目标。

b. 市场外部因素的影响会使多元主体博弈过程中竞价策略的制定出现不确定性,因此本文提出了采用 Berge-NS 均衡来解决市场中主体间竞争产

生的多重 Nash 均衡解的选择性问题,并构建了基于 KH 优化算法求解 Berge-NS 均衡的电力市场多主体竞争博弈流程。相关算例结果表明 KH 优化算法在每轮博弈中能够从多个 Nash 解中求取 Berge-NS 均衡解,证明了采用 KH 优化算法求解此类问题具有一定的有效性和可行性。

c. 在电力市场多主体博弈竞争的初期阶段,由于受到信息不完全性和市场主体“有限理性”的影响,各主体间的竞价策略选择会出现不确定性;但随着博弈竞争进程达到中期阶段,市场主体对于信息的积累会不断增多,各个主体的竞价策略也会逐渐靠拢,主体间的收益或成本差别也会不断变小;在博弈竞争的后期阶段,为了获取需求电量、降低惩罚成本,各主体间的价差会不断缩小,直至达到稳定的均衡状态,即达到了 Berge-NS 均衡状态。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘敦楠,曾鸣,黄仁乐,等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术,2015,39(11):3057-3063.
LIU Dunnan,ZENG Ming,HUANG Renle,et al. Business models and market mechanisms of E-net(2)[J]. Power System Technology, 2015,39(11):3057-3063.
- [2] 马愿谦,肖先勇,黄勇. 考虑敏感设备“以旧换新”增值服务的定价策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):164-172.
MA Yuanqian,XIAO Xianyong,HUANG Yong. Pricing strategy considering “trade-in” value-added service of sensitive equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(2):164-172.
- [3] 张晓萱,薛松,杨素,等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):1-8.
ZHANG Xiaoxuan,XUE Song,YANG Su,et al. International experience and lessons in power sales side market liberalization[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(9):1-8.
- [4] 刘连光,潘明明,田世明,等. 考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):1618-1625.
LIU Lianguang,PAN Mingming,TIAN Shiming,et al. A non-cooperative game analysis of an competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(6):1618-1625.
- [5] 张忠会,赖飞屹,谢义苗,等. 基于纳什均衡理论的电力市场三方博弈分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3671-3679.
ZHANG Zhonghui,LAI Feiyi,XIE Yimiao,et al. Analysis of trilateral game in electricity market based on nash equilibrium theory[J]. Power System Technology,2016,40(12):3671-3679.
- [6] 张晨,韩新阳,白翠粉,等. 基于合作博弈的电力市场模式下售电商购电策略模型[J]. 中国电力,2017,50(6):177-184.
ZHANG Chen,HAN Xinyang,BAI Cuifen,et al. Purchasing strategy model for power supplier based on the cooperative game theory in an open electricity market[J]. Electric Power,2017,50(6):177-184.
- [7] 曾嘉志,赵雄飞,李静,等. 用电侧市场放开下的电力市场多主体博弈[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):129-136.
ZENG Jiazhi,ZHAO Xiongfei,LI Jing,et al. Game among multiple entities in electricity market with liberalization of power demand side market[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(24):129-136.
- [8] 李刚,刘继春,魏震波,等. 含分布式电源接入的市场多主体博弈分析[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(19):1-9.
LI Gang,LIU Jichun,WEI Zhenbo,et al. Analysis of game among multi-agents in electrical power market with integration of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016,44(19):1-9.
- [9] 汪朝忠,王建琼,谢晶晶. 合作博弈下的电力联盟交易机制研究[J]. 西南民族大学学报(人文社科版),2016,37(5):140-144.
WANG Chaozhong,WANG Jianqiong,XIE Jingjing. Research on power alliance trading mechanism under cooperative game[J]. Journal of Southwest University for Nationalities(Humanities and Social Science),2016,37(5):140-144.
- [10] 赵会茹,赵名锐,王玉玮,等. 售电侧开放下日前电力市场动态博弈模型[J]. 电力建设,2017,38(4):144-152.
ZHAO Huiru,ZHAO Mingrui,WANG Yuwei,et al. Day-ahead electric power market dynamic game model based on sale-side opening up[J]. Electric Power Construction,2017,38(4):144-152.
- [11] 蒲勇健,孙衍华. 差价合约市场力抑制效应的 Bertrand 博弈模型分析[J]. 中国管理科学,2017,25(5):109-115.
PU Yongjian,SUN Xianhua. A Bertrand model based on contracts for difference for inhibiting market power[J]. Chinese Journal of Management Science,2017,25(5):109-115.
- [12] 赵文会,闫豪楠,何威. 基于风火网非合作博弈的电力市场均衡模型[J]. 电网技术,2018,42(1):103-109.
ZHAO Wenhui,YAN Haonan,HE Wei. Equilibrium model of electricity market based on non-cooperative game of wind farms,thermal power plants and power grid company[J]. Power System Technology,2018,42(1):103-109.
- [13] 吴诚,高丙团,汤奕,等. 基于主从博弈的发电商与大用户双边合同交易模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):56-62.
WU Cheng,GAO Bingtuan,TANG Yi,et al. Master-slave game based bilateral contract transaction model for generation companies and large consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(22):56-62.
- [14] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):198-210.
MA Tiannan,PENG Lilin,DU Ying,et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):198-210.
- [15] MARZBAND M,JAVADI M,DOMÍNGUEZ-GARCÍA J L,et al. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2016,10(12):2999-3009.
- [16] 杨哲. 广义不确定性下非合作博弈中 Berge-NS 均衡的存在性[J]. 系统科学与数学,2015,35(9):1073-1080.
YANG Zhe. The existence theorems of Berge-NS equilibria in non-cooperative games under generalized uncertainty[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences,2015,35(9):1073-1080.
- [17] 张会娟,张强. 不确定性下非合作博弈简单 Berge 均衡的存在性[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(9):1630-1635.
ZHANG Huijuan,ZHANG Qiang. Existence of simple Berge equilibrium for non-cooperative games under uncertainty[J]. Systems Engineering-theory & Practice,2010,30(9):1630-1635.
- [18] SINGH G P,SINGH A. Comparative study of krill herd,firefly and cuckoo search algorithms for unimodal and multimodal optimization[J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications,

2014,6(3):35-49.

[19] 张百甫,周步祥,魏金萧. 考虑多参数不确定性的微电网优化运行[J]. 水电能源科学,2017,35(6):208-212.

ZHANG Baifu,ZHOU Buxiang,WEI Jinxiao. Optimal operation of microgrid considering multi-parameters uncertainty[J]. Water Resources and Power,2017,35(6):208-212.

作者简介:

马天男(1992—),男,宁夏吴忠人,工程师,博士,从事电力技术经济评价、电力负荷预测、大数据分析、电力市场等方面的研究工作(**E-mail**:matiannan_1234@126.com);

杜英(1972—),女,四川成都人,高级经济师,从事技术经济评价、造价管理方面的研究工作(**E-mail**:duying72@gmail.com);



马天男

苟全峰(1976—),男,四川成都人,高级经济师,主要从事造价管理、电力技术经济评价方面的研究工作(**E-mail**:2394737812@qq.com);

彭丽霖(1991—),女,四川达州人,工程师,博士,主要从事电力技术经济、电力市场、能源互联网等方面的研究工作(**E-mail**:penglilinbj@126.com);

王超(1991—),男,内蒙古呼伦贝尔人,经济师,硕士,从事电力技术经济、输变电工程风险管理方面的研究工作(**E-mail**:chaochao91812@126.com);

何璞玉(1991—),男,陕西汉中人,经济师,硕士,从事电力技术经济管理方面的工作(**E-mail**:hepuyuncepu@126.com)。

Non-cooperative competition game model of multiple subjects in electricity market based on Berge-NS equilibrium

MA Tiannan¹,DU Ying¹,GOU Quanfeng¹,PENG Lilin²,WANG Chao¹,HE Puyu¹

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Power Exchange Center Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The release of retail side promotes the multi-directional choices of electricity market subjects and enhances the fierce competition among multiple subjects at the same time. However, the external factors of the market are uncertain, so each market subject needs to study the competitive relationships and develop the bidding strategies among multiple subjects in the game with uncertainties, which is of great significance for promoting the development of electricity market. On the basis of clarifying the demands of electricity market subjects, the market decision-making models of generation companies, electric power sellers and big consumers are constructed respectively. The processes and steps of the non-cooperative competition game among multiple electricity market subjects are generated according to Berge-NS equilibrium model. The dynamic adjustment of market bidding strategies and the market equilibrium are solved by using KH(Krill Herd) optimization algorithm. The established competition game model and its solving algorithm are verified by the example simulation and relative results show that, with the deepening of gaming process and the accumulation of market information, the bidding strategies among electricity market subjects will gradually reach an equilibrium state, so as to achieve the win-win situation and coordinated development of all electricity market subjects. In addition, the feasibility and validity of KH optimization algorithm in solving the competition problem among multiple electricity market subjects are verified.

Key words: electricity market; competition game; non-cooperative game; electricity reform; uncertainties; Berge-NS equilibrium; krill herd optimization algorithm; models

附录 A

定理 1: 不确定性条件下电力市场多主体非合作博弈 $\Delta = \{I, \tilde{G}, \tilde{S}, \tilde{U}, X_\theta, Y, f_\theta, Q\}$ 满足如下条件: ①对于任意主体 $\forall \theta \in I$, X_θ 为一个非空实数集; ②不确定性因素 Y 为一个非空实数集; ③对于 $\forall \theta \in I$, f_θ 为连续函数; ④ $\forall y \in Y$ 和 $\forall \bar{n} \in \delta$, 任意取定 $\{\omega^1, \omega^2, \dots, \omega^{\bar{n}}\} \subset X$ 、 $\{G_1, G_2, \dots, G_{\bar{n}}\} \subset \tilde{G}$ 、 $S_j \in \tilde{S}$ 和 $x = \sum_{j=1}^{\bar{n}} \lambda_j \omega^j$ ($\lambda_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^{\bar{n}} \lambda_j = 1$), 那么存在 $j_0 \in \{1, 2, \dots, \bar{n}\}$ 使得 $f_{S_{j_0}}(x, y) - f_{S_{j_0}}(\omega_{U_{j_0}}^{j_0}, x_{-U_{j_0}}, y) \geq 0$; ⑤ $\forall x \in X$, $y \rightarrow f(x, y)$ 在 R_+^δ 上拟似凸, 即 $\forall y_1, y_2 \in Y$ 和 $\forall y' \in \{y_1, y_2\}$, 有 $f(x, y_1) \in f(x, y) + R_+^\delta$, $f(x, y_1) \in f(x, y') + R_+^\delta$ 。那么不确定性条件下电力市场多主体非合作博弈至少存在 1 个 Berge-NS 均衡。

根据前文所述, 任意主体 θ 的竞价策略为申报电价 p^θ 及其申报电量 Q^θ , 主体 θ 的售电策略集合为:

$$X_\theta = \{p^\theta, Q^\theta \mid 0 \leq p^\theta \leq p_{\max}^\theta, 0 \leq Q^\theta \leq Q_{\max}^\theta\} \quad (A1)$$

其中, p_{\max}^θ 为市场主体 θ 的最大可申报价格; Q_{\max}^θ 为市场主体 θ 的最大可申报电量。因此 X_θ 是一个从 0 到最大申报价格及申报量的区间, 为紧致凸子集, 且当市场主体 θ 参与市场竞价时必然会有对应的竞价策略存在, 故 X_θ 为非空集合, 满足条件①。此外前述所构建的发电商、售电商和大用户的适应度函数竞价过程中存在时间上的连续性, 则任意主体 θ 的适应度函数 f_θ 具有连续性, 满足条件③。当竞价策略不变时, 不确定性因素发生改变必然会导致博弈主体利润值更大, 即竞价策略不变的情况下市场不确定性因素的干扰是为了得到更高的市场效率。

对于任意竞价策略 $x \in X$, $Q(x)$ 在连续区间上有 $B = \{(v, y) \in Q(x) \times Q(x) \mid f(x, y) - f(x, v) \in \text{int } R_+^\delta\}$, 那么会存在不确定因素 y 的开邻域 $Z(y)$ 使得 $f(x, y') - f(x, v) \in \text{int } R_+^\delta$ ($\forall y' \in Z(y)$), 因此对于 $\forall v \in Q(x)$, $\{y \in Y \mid (v, y) \in B\}$ 必然是非空紧致凸子集, 满足条件②。

假设存在 $(x, y) \in X \times Y$ 使得 $x \in A(x, y)$, 即存在 $\bar{n} \in \delta$, $\{\omega^1, \omega^2, \dots, \omega^{\bar{n}}\} \subset A(x, y)$, $x = \sum_{j=1}^{\bar{n}} \lambda_j \omega^j$, 那么存在 $\{G_1, G_2, \dots, G_{\bar{n}}\} \subset \tilde{G}$ 和 $S_j \in \tilde{S}$ 使得 $f_{S_j}(x, y) < f_{S_j}(\omega_{U_j}^j, x_{-U_j}, y)$ ($j = 1, 2, \dots, \bar{n}$); 但根据条件④, 存在 $j_0 \in \{1, 2, \dots, \bar{n}\}$ 使 $f_{S_{j_0}}(x, y) - f_{S_{j_0}}(\omega_{U_{j_0}}^{j_0}, x_{-U_{j_0}}, y) \geq 0$, 两者相互矛盾, 因此对于 $(x, y) \in X \times Y$, $x \notin A(x, y)$ 满足广义极大元定理, 则条件④得证。条件②、④的具体证明过程可参考文献[16]。

综上可知, Berge-NS 均衡的约束条件至此已全部满足, 可以证明在不确定性条件下电力市场多主体间非合作博弈问题存在 Berge-NS 均衡解。

附录 B

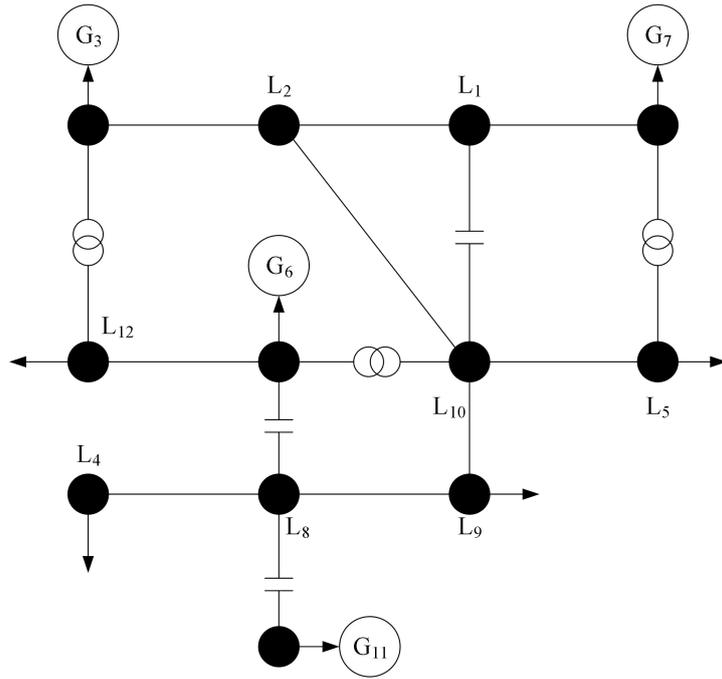


图 B1 12 节点系统的拓扑结构
Fig.B1 Topological structure of 12-bus system