第 49 卷 第 1 期：128-139 高电压技术 Vol.49, No.1: 128-139
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220010

计及配额考核约束的发电商与大用户直购电博弈优化模型

李 飞[1,2]，李咸善[1,2]，鲁明芳[1,2]，张 磊[2]
（1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室，宜昌 443002；
2. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002）

摘 要：在大用户直购电交易中，实施可再生能源配额制(renewable portfolio standard，RPS)会引发绿、火电商之间市场力不均等的竞争性售电，大用户也需应对负荷平衡与 RPS 考核的双重压力。为解决多发电商竞价与多大用户直购电交易的耦合优化决策问题和实现多主体共赢，建立了 RPS 驱动下绿、火电商竞价和大用户直购电的双层博弈优化模型。外层多发电商构成非合作博弈，各发电商通过博弈竞价以获得大用户更多的购电；内层多发电商和多大用户构成主从博弈，各发电商优化报价以满足售电利润最大，各大用户优化购电方案满足 RPS 考核并降低交易成本，实现供需双方共赢。采用 KKT 条件和不动点型迭代算法求解优化模型，仿真结果表明，RPS 驱动和博弈竞价机制可提升绿电商竞争力，并降低了用户交易成本；但当 RPS 配比上升到一定程度时，大用户博弈能力削弱，交易成本反弹。该方法可为 RPS 下大用户直购电策略优化提供决策参考。

关键词：可再生能源配额制；大用户；直购电；KKT 条件；非合作博弈；主从博弈

Game Optimization Model of Direct Power Purchase Between Power Suppliers and Large Consumers with RPS Assessment Constrains

LI Fei[1,2], LI Xianshan[1,2], LU Mingfang[1,2], ZHANG Lei[2]
(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In direct power purchase of large consumers, the unequal competitiveness sales between suppliers of green power and thermal power are caused by the RPS mechanism, and large consumers are also faced with high-cost pressure from the dual demands of load balance and RPS assessment. To solve the coupling optimization decisions of direct power purchase between power suppliers and large consumers, a double-layer game model with green/thermal power suppliers and large consumers under the RPS mechanism was established to obtain win-win outcomes for all participants. Multi power suppliers constituted a non-cooperative game on outside layer: each power supplier tried to make its quotation competitive to obtain more electricity purchase for large consumers. Power suppliers and large consumers constituted a master-slave game model on inside layer: all power suppliers optimized the quotation to maximize their profits, meanwhile, large consumers optimized the power purchase strategies with minimizing the trading cost under RPS mechanism, further to achieve win-win for all participants. The KKT conditions and the fixed-point iterative algorithm were introduced to solve the double-layer model. The simulations show that the game bidding mechanism can improve the competitiveness of green power supplies with RPS, and reduce the trading cost of large consumers. However, when the RPS quota ratio rises to a certain extent, the trading cost of large consumers will rebound with their Nash bargaining ability being weakened. This model can provide decision references for the optimization of direct power purchase strategy of large consumers under RPS mechanism.

Key words: renewable portfolio standard; large consumers; direct power purchase; KKT condition; non-cooperative game; master-slave game

基金资助项目：国家自然科学基金(52007103)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52007103).

0　引言

随着我国“双碳”战略和可再生能源配额制(renewable portfolio standard，RPS)的深度实施[1]，新能源(绿电)将迎来更大规模发展[2-4]。RPS 机制针对电网公司和用户，通过强制配额和配套的绿色证书交易机制 (tradable green certificate，TGC)给出明确的消纳责任权重[5-6]，以绿色证书交易为媒介来满足可再生能源消纳权重的要求。在 RPS 权重范围内开展绿电交易，会使绿电商占据较大的竞价优势，进而引发各大用户直购电交易中存在多发电商(包括绿电商和火电商)之间市场力不均等竞争性售电现象，并让大用户面临负荷需求与 RPS 考核双重交易的高成本压力，进而造成发电商之间竞价行为及大用户直购电博弈决策等多层面耦合优化问题。各发电商力图使其报价在多发电商的报价中具有竞争力，以获得大用户更多的购电；而大用户希望在满足 RPS 配额的前提下，尽可能选择从报价较低的发电商购入较多的电量以降低交易成本。因此，研究 RPS 下的绿、火电商和大用户直购电交易的多层面报价与购销博弈竞争行为，有利于促进各市场参与者形成最优决策，实现多主体共赢。

现有研究中对电力市场博弈议价模型已有较多研究。主要涉及售电商之间博弈[7-8]、售电商与发电商之间博弈[9-12]、售电商与电力用户之间博弈[13-16]等。文献[8]构建了电力零售商的合作联盟，降低了各零售商的售电成本。文献[9]采用 Berge-NS 均衡解决市场中发售电商非合作博弈竞争问题，实现了博弈各方利益共赢。文献[14]构建了大用户直购电双边交易的主从博弈模型，降低了市场交易风险。文献[16]提出不完全信息下供需双方的双边博弈模型，可提升直购电双方在日前电力市场中的竞争力。然而，以上文献尚未考虑 RPS 政策对市场主体竞争性报价及直购电策略的影响。

RPS 机制引入后，各市场参与者之间不再局限于报价与购售电量之间的博弈，还需计及 RPS 与绿证对各参与者博弈行为的影响。文献[17-18]研究了 RPS 实施对市场均衡及发电商报价行为的影响。文献[19]建立了包含可再生能源发电商的电力市场多主体双层优化决策模型，分析了 RPS 权重和可再生能源渗透率对于市场均衡行为的影响。文献[20]建立了适应 RPS 的电力市场交易体系，解决了现行配额制与不同市场之间的衔接问题。文献[21]探究了绿色证书交易机制下计及输电阻塞影响的发售电商竞价策略。文献[22]构建了考虑 TGC 的市场均衡模型，分析了可再生能源供应商的决策行为。文献[23]建立了 RPS 下电力市场、绿证市场和发电商之间的均衡模型，通过各市场主体博弈竞争降低了交易风险。文献[24]研究了 RPS 下跨省区电力交易中各市场主体的最优决策。总之，上述文献均侧重于研究 PRS 下各发电商与现货市场间的均衡行为，较少考虑该背景下多发电商竞争性报价与多大用户直购电决策行为的耦合优化问题。

为此，本文研究了 RPS 背景下含绿、火电商和大用户直购电双重博弈优化问题。主要研究工作和解决的关键问题如下：

首先，建立了多发电商之间竞争性非合作博弈模型，各发电商制定报价策略，力图使其报价在多发电商的报价中具有竞争力，以获得大用户更多的购电，实现其售电利益最大化。

其次，构建了多发电商多大用户主从博弈模型，各发电商以提高售电利润为目标，通过改变报价激励大用户购电；各大用户响应发电商报价制定购电策略以实现购电成本和绿证交易成本最小。

再次，利用 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)条件将主从博弈双层优化模型转换为单层优化问题[25]，并引入不动点型迭代算法求解本双重博弈优化模型的纳什均衡点。

最后通过算例对本文所提模型进行验证分析。

1　模型假设

为了理清研究场景和突出研究主题，本文在研究 RPS 下各市场参与者之间的博弈竞争关系时，所建模型基于如下条件或假设：

1）市场参与者共有 M 个发电商(m_g 个绿电商、m_f 个火电商)和 L 个大用户参与直购电交易。由于电力小用户用电量少，在市场中的议价能力弱，不予考虑。

2）假设绿电商和火电商同时具备发电和售电资质，大用户不仅可从现货市场购电，也可与绿、火电商签订双边交易合同获取电量，各大用户需履行政府强制规定的 RPS 配额 $K(0<K<1)$的考核要求，绿证由电网公司按照每满 1 MWh 对应 1 张绿证的核算标准[5]发放，大用户可通过购买绿电或绿证 2 种方式达到配额要求。

3）假设绿电商和火电商生产的电力为同质产

品，除发电成本不同，无其他差别。

4）绿色证书只具备流通价值，不考虑流通过程中核发、交易、核查等行为。

5）新能源发电的不确定性一般通过多场景近似方法来描述，除了涉及更多变量，求解方法不变，由于本文的主旨是分析多发电商竞争性报价与大用户直购电决策的均衡行为，故忽略了不确定性而采用预测值[26]。

6）本文所提直购电模型是基于市场均衡时购售电量的申报，在市场平台上完成直购电交易。为了突出本文主体工作，暂不考虑系统潮流约束[17-18, 23]。

2 大用户直购电双重博弈模型

2.1 大用户直购电双重博弈模型架构

图 1 为 RPS 下直购电交易中各市场参与者间的双层博弈关系架构，主要包括：

1）内层博弈。多发电商与多大用户之间构成多主多从博弈关系：发电商通过改变报价激励大用户购电，实现售电利润最大化；大用户响应发电商报价制定购电策略，并与绿证市场交易，平衡 RPS 考核时的绿证余缺，以实现购电成本和绿证交易成本最小。

2）外层博弈：各发电商间构成非合作竞争性博弈，通过竞价方式分别与大用户达成双边交易，各发电商力图使其报价在多发电商的报价中具有竞争力，以获得各大用户更多的购电，实现其售电利润最大化。

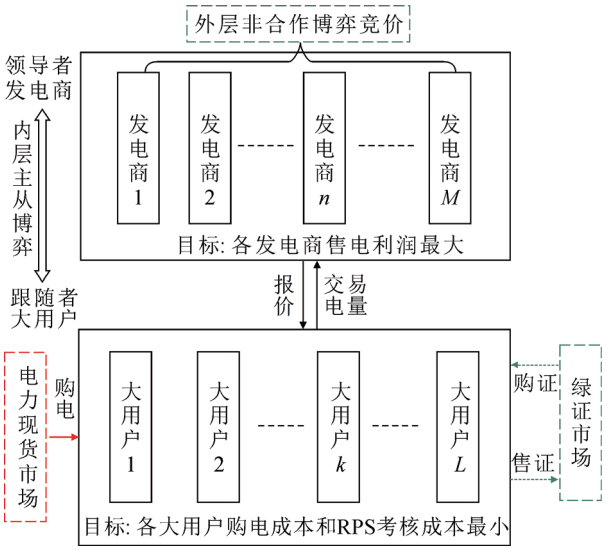


图 1 市场参与者之间的交易关系

Fig.1 Trading relationships of market participants

其中：发电商 1~M 作为领导者集合，以报价集合$\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_M\}$为决策变量$\eta_1$，目标为各自售电利润最大；$L$ 个大用户为跟随者，以交易电量集合$\{q_1,q_2,\cdots,q_L\}$为决策变量η_2，目标为各大用户成本最低。在含有多领导者多跟随者的主从博弈模型中，不是由所有领导者同时给出决策，而是由各发电商通过博弈竞价依次制定决策，其双重博弈流程如图 2 所示。

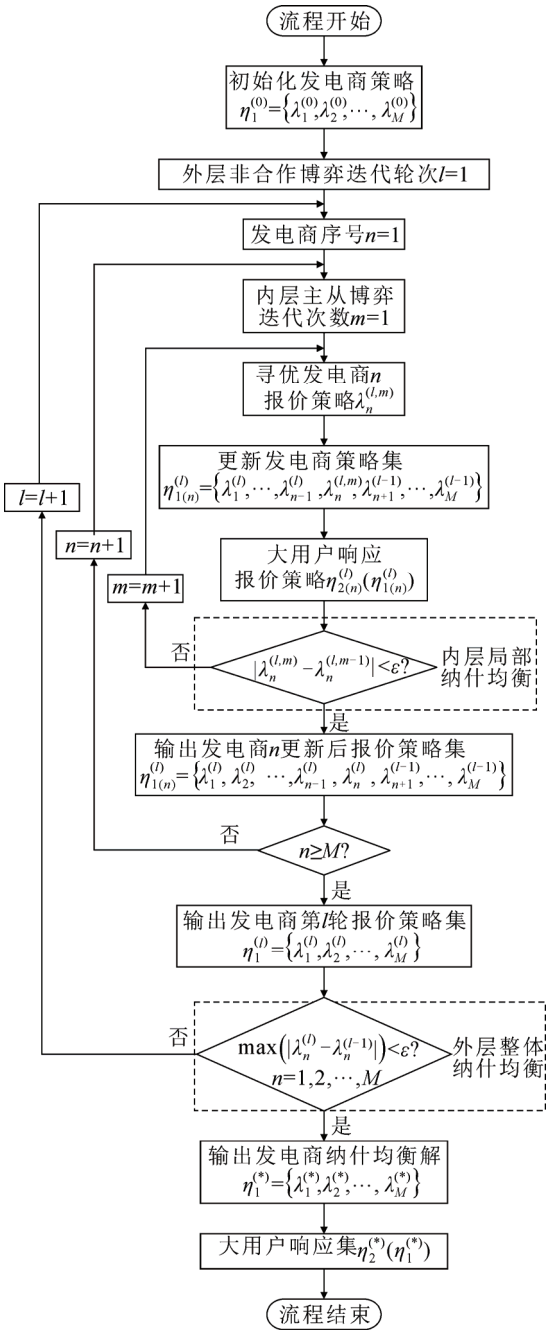


图 2 多发电商与多大用户直购电博弈流程

Fig.2 Game process of direct power purchase between multi power suppliers and multi large consumers

1）各发电商首先制定初始报价策略集 $\eta_1^{(0)}=\left\{\lambda_1^{(0)},\lambda_2^{(0)},\cdots,\lambda_M^{(0)}\right\}$，大用户给出对应的初始购电策略 $\eta_2^{(0)}(\eta_1^{(0)})=\left\{q_1^{(0)},q_2^{(0)},\cdots,q_L^{(0)}\right\}$。

2）令外层多发电商非合作博弈迭代轮次 l=1。

3）各发电商依次改变报价策略，分别与 L 个大用户进行主从博弈，令当前寻优对象为发电商 n，n=1。

4）进入发电商 n 与 L 个大用户的内层主从博弈流程，令内层博弈迭代次数 m=1。

5）以发电商 n 的报价策略为寻优变量，其他发电商策略保持不变，通过与 L 个大用户博弈寻优发电商 n 的报价 $\lambda_n^{(l,m)}$，并更新当前所有发电商策略集 $\eta_{1(n)}^{(l)}=\left\{\lambda_1^{(l)},\cdots,\lambda_{n-1}^{(l)},\lambda_n^{(l,m)},\lambda_{n+1}^{(l-1)},\cdots,\lambda_M^{(l-1)}\right\}$ 和大用户回应策略集为 $\eta_{2(n)}^{(l)}(\eta_{1(n)}^{(l)})$。

6）若发电商 n 相邻 2 次迭代的报价差值小于 $\varepsilon(\varepsilon$=0.001)，则内层博弈达到局部纳什均衡，进入步骤 7；否则，更新迭代次数 m=m+1，返回步骤 5。

7）更新所有发电商当前报价的策略集：$\eta_{1(n)}^{(l)}=\left\{\lambda_1^{(l)},\lambda_2^{(l)},\cdots,\lambda_{n-1}^{(l)},\lambda_n^{(l)},\lambda_{n+1}^{(l-1)},\cdots,\lambda_M^{(l-1)}\right\}$。

8）判断发电商序号 $n\geqslant M$? 是则进入步骤 9；否则，执行 n=n+1，返回步骤 4。

9）输出所有发电商在第 l 轮的报价策略集：$\eta_1^{(l)}=\left\{\lambda_1^{(l)},\lambda_2^{(l)},\cdots,\lambda_M^{(l)}\right\}$。

10）在外层非合作博弈中，若相邻 2 轮发电商 n 的报价策略集差值小于 ε，则外层非合作博弈满足整体纳什均衡，进入步骤 11；否则，更新迭代轮次 l=l+1，返回步骤 3。

11）输出各发电商博弈均衡解 $\eta_1^{(*)}=\left\{\lambda_1^{(*)},\lambda_2^{(*)},\cdots,\lambda_M^{(*)}\right\}$。

12）输出各大用户的博弈均衡解 $\eta_2^{(*)}\left(\eta_1^{(*)}\right)$。

2.2　各参与者目标函数

2.2.1　发电商利润函数

绿电商 i 和火电商 j 的利润为售电给大用户的收入减去发电成本，如式(1)所示。

$$\begin{cases}J_{\mathrm{R},i}=\sum_{k=1}^{L}p_{\mathrm{R},i,k}q_{\mathrm{R},i,k}-C_{\mathrm{R},i}, & i=1,2,\cdots,m_{\mathrm{g}}\\ J_{\mathrm{C},j}=\sum_{k=1}^{L}p_{\mathrm{C},j,k}q_{\mathrm{C},j,k}-C_{\mathrm{C},j}, & j=1,2,\cdots,m_{\mathrm{f}}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$C_{\mathrm{R},i}$ 和 $C_{\mathrm{C},j}$ 分别为绿电商 i 和火电商 j 的发电成本；m_{g} 和 m_{f} 分别为绿电商个数和火电商个数；发电商的售电收入为大用户与其签订双边合同的电量收入；$q_{\mathrm{R},i,k}$ 和 $q_{\mathrm{C},j,k}$ 分别为大用户 k 与绿电商 i 和火电商 j 签订的合同电量；$p_{\mathrm{R},i,k}$ 和 $p_{\mathrm{C},j,k}$ 分别为与之对应的合同电价，如式(2)所示。

$$\begin{cases}p_{\mathrm{R},i,k}=a_{\mathrm{R},i,k}+b_{\mathrm{R},i}q_{\mathrm{R},i,k}\\ p_{\mathrm{C},j,k}=a_{\mathrm{C},j,k}+b_{\mathrm{C},j}q_{\mathrm{C},j,k}\end{cases}\tag{2}$$

式中：$a_{\mathrm{R},i,k}$ 和 $a_{\mathrm{C},j,k}$ 分别为绿电商 i、火电商 j 与大用户 k 交易的基础电价；$b_{\mathrm{R},i}$ 和 $b_{\mathrm{C},j}$ 为对应的边际报价增长系数。基础报价可综合考虑发电商自身成本和效益情况进行取值，边际报价将随着电量增加而单调递增[14,26]。

发电商的成本一般表示为二次函数关系[17,23]

$$\begin{cases}C_{\mathrm{R},i}=a_iq_{\mathrm{R},i}^2+b_iq_{\mathrm{R},i}+c_i\\ C_{\mathrm{C},j}=x_jq_{\mathrm{C},j}^2+y_jq_{\mathrm{C},j}+z_j\end{cases}\tag{3}$$

式中：a_i、b_i、c_i 为绿电商 i 的成本系数；x_j、y_j、z_j 为火电商 j 的成本系数；$q_{\mathrm{R},i}$ 和 $q_{\mathrm{C},j}$ 分别为绿电商 i、火电商 j 与各大用户交易电量总和。区别于传统化石燃料发电，可再生能源发电无燃料消耗成本，然而由于其强烈的间歇性及波动性，需要考虑更多的运行维护成本及旋转备用成本[23]。

2.2.2　大用户成本函数

大用户 k 的交易成本 J_k 包括购电成本 C_k^{B} 和绿证交易成本 I_k^{T}，如式(4)所示。

$$J_k=C_k^{\mathrm{B}}+I_k^{\mathrm{T}}\tag{4}$$

式中：C_k^{B} 为大用户 k 从绿、火电商和现货市场购电的总成本；I_k^{T} 为绿证交易成本。将式(4)展开为

$$\begin{cases}C_k^{\mathrm{B}}=\sum_{i=1}^{m_{\mathrm{g}}}p_{\mathrm{R},i,k}q_{\mathrm{R},i,k}+\sum_{j=1}^{m_{\mathrm{f}}}p_{\mathrm{C},j,k}q_{\mathrm{C},j,k}+\sum_{t=1}^{T}p_tq_{k,t}\\ I_k^{\mathrm{T}}=(K\sum_{t=1}^{T}d_{k,t}-\sum_{i=1}^{m_{\mathrm{g}}}q_{\mathrm{R},i,k})p_{\mathrm{R}}\end{cases}\tag{5}$$

式中：p_t 为 t 时刻现货电价；$q_{k,t}$ 为大用户 k 在 t 时刻从现货市场购入的电量；T 为现货交易周期；p_{R} 为绿证市场价格；K 为政府强制规定的 RPS 配额；$d_{k,t}$ 为大用户 k 在 t 时刻的需求电量。为了完成 RPS 配额考核，大用户优先选择从绿电商购入电量，履行 RPS 责任后的绿证余缺通过绿证市场平衡。

另外，本节变量与图 2 中策略集的对应关系为

$$\begin{cases}\lambda_n=\begin{cases}\lambda_i=\{a_{\mathrm{R},i,1},a_{\mathrm{R},i,2},\cdots,a_{\mathrm{R},i,L}\}\\ \lambda_j=\{a_{\mathrm{C},j,1},a_{\mathrm{C},j,2},\cdots,a_{\mathrm{C},j,L}\}\end{cases}, & n\in1,2,\cdots,M\\ q_k=\begin{pmatrix}q_{\mathrm{R},1,k}+q_{\mathrm{R},2,k}+\cdots+q_{\mathrm{R},m_{\mathrm{g}},k}+\\ q_{\mathrm{C},1,k}+q_{\mathrm{C},2,k}+\cdots+q_{\mathrm{C},m_{\mathrm{f}},k}+q_{k,t}\end{pmatrix}, & k\in1,2,\cdots,L\end{cases}\tag{6}$$

2.3 计及 RPS 的大用户直购电双重博弈优化模型

根据各参与者的博弈关系和目标函数，分别构建上层领导者(绿、火电商)、下层跟随者(大用户)的优化模型。

2.3.1 领导者优化模型

(1)目标函数

发电商优化目标为利润最大，对应式(1)。

(2)约束条件

发电商报价不超过合同报价上下限。

$$\begin{cases} p_{\mathrm{R},i}^{\min} \le p_{\mathrm{R},i,k} \le p_{\mathrm{R},i}^{\max} \\ p_{\mathrm{C},j}^{\min} \le p_{\mathrm{C},j,k} \le p_{\mathrm{C},j}^{\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$p_{\mathrm{R},i}^{\max}$ 和 $p_{\mathrm{R},i}^{\min}$ 分别为绿电商 i 报价上、下限；$p_{\mathrm{C},j}^{\max}$ 和 $p_{\mathrm{C},j}^{\min}$ 分别为火电商 j 报价上、下限。报价下限可取发电商的边际成本和最低现货电价的最大值，火电商报价上限可取最高现货电价，绿电商报价上限可取最高现货电价叠加绿证价格[1]。

2.3.2 跟随者优化模型

(1)目标函数

大用户优化目标为交易成本最低，对应式(4)。

(2)约束条件

1)负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{m_{\mathrm{g}}} q_{\mathrm{R},i,k} + \sum_{j=1}^{m_{\mathrm{f}}} q_{\mathrm{C},j,k} + \sum_{t=1}^{T} q_{k,t} = \sum_{t=1}^{T} d_{k,t} \tag{8}$$

2）购电电量约束

大用户与各发电商签订的合同电量不允许超过其规定合同电量上限，从现货市场购入电量不能超过 t 时刻负荷需求电量。

$$\begin{cases} 0 \le q_{\mathrm{R},i,k} \le \overline{q}_{\mathrm{R},i} \\ 0 \le q_{\mathrm{C},j,k} \le \overline{q}_{\mathrm{C},j} \\ 0 \le q_{k,t} \le d_{k,t} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$\overline{q}_{\mathrm{R},i}$ 为绿电商 i 与大用户签订的合同电量上限；$\overline{q}_{\mathrm{C},j}$ 为火电商 j 与大用户签订的合同电量上限。

2.4 主从博弈模型的 KKT 条件转化

KKT 条件是利用线性规划对偶定理将原优化模型转换为线性最优性条件[25]，由原下层问题的约束条件、对偶问题的约束条件、松弛互补条件和拉格朗日函数梯度构成。大用户决策购电量时，各发电商报价是既定的，若将下层大用户的优化问题用 KKT 条件代替，可将主从博弈的双层优化问题转换成单层线性优化模型，以降低求解复杂度，KKT 条件的公式推导详见附录 A。

3 大用户直购电双重博弈模型求解

3.1 非合作博弈均衡解的存在性和唯一性证明

详见附录 B。

3.2 模型求解流程

本文所提的大用户直购电双重博弈模型，采用传统的不动点型迭代算法求解其纳什均衡点，先将下层大用户优化模型用等价 KKT 条件转化，再利用 Yalmip/CPLEX 依次循环求解每个发电商竞价问题的主从博弈单层优化模型，直至满足整体纳什均衡。具体求解流程如图 3 所示，其中 $l_{\max}$ 为最大迭代轮次，主要步骤如下：

1）输入模型参数与算法参数。包括各发电商初始报价、现货市场电价、绿证价格、RPS 配额比、各发电商成本系数、负荷需求电量等。

2）形成博弈参与者策略集。包括领导者(多发电商)集合 $\left\{\lambda_1^{(0)},\lambda_2^{(0)},\cdots,\lambda_M^{(0)}\right\}$，跟随者(多大用户)策略集 $\left\{q_1^{(0)},q_2^{(0)},\cdots,q_L^{(0)}\right\}$。

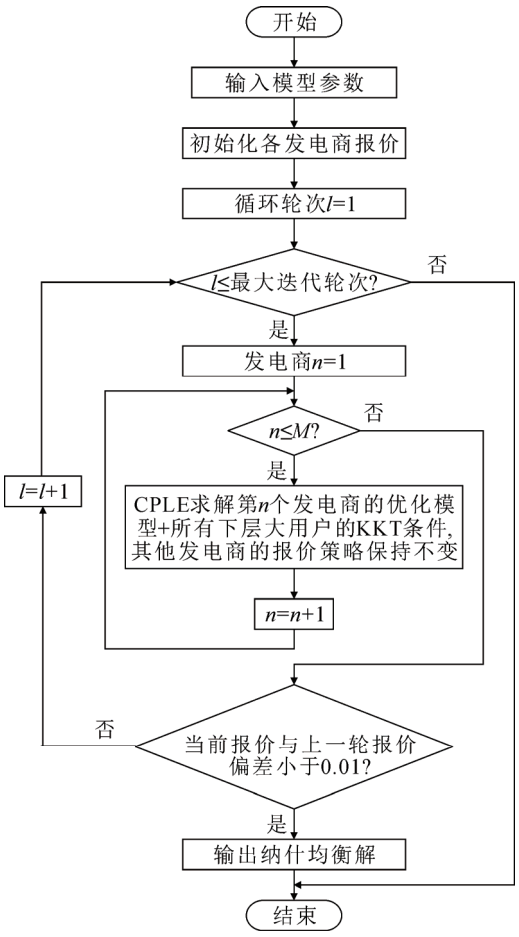


图 3 双重博弈模型求解流程

Fig.3 Solution process of the double-layer game model

3）设定当前迭代轮次 l=1。

4）寻优发电商 n 的报价策略，令 n=1，保持其他发电商策略不变，利用 CPLEX 求解发电商 n 与 L 个大用户的主从博弈模型，更新发电商 n 的报价策略为 $\lambda_n^{(l)}$。

5）更新发电商序号 n=n+1，依次求解各发电商的报价策略，直至求解完成，此时 n=M，输出第 l 轮的报价策略集 $\left\{\lambda_1^{(l)},\lambda_2^{(l)},\cdots,\lambda_M^{(l)}\right\}$。

6）若当前轮次任一发电商报价与上一轮报价偏差小于 ε，则进入步骤 7；否则更新循环轮次 l=l+1，返回步骤 4。

7）输出博弈均衡解 $\left\{\lambda_1^{(*)},\lambda_2^{(*)},\cdots,\lambda_M^{(*)}\right\}$，以及大用户回应集 $\left\{q_1^{(*)},q_2^{(*)},\cdots,q_L^{(*)}\right\}$，博弈流程结束。

4　算例分析

4.1　算例参数

设市场参与者包括 2 个绿电商(S1, S2)，4 个火电商(C1, C2, C3, C4)和 4 个大用户(L1, L2, L3, L4)。政府规定 RPS 配额 K 为 0.3；绿证市场价格取 28.28 美元/MWh[23]；现货分时电价取自文献[27]，并乘以 1.5 倍系数。各大用户负荷曲线如图 4 所示。绿、火电商参数分别如表 1 和表 2 所示[17-18]。现货交易周期为 1 d，直购电交易合同采用日前交割方式。

4.2　仿真结果分析

4.2.1　各市场参与者决策分析

图 5 为配额 K=0.3 时各发电商与大用户 2 的报价收敛曲线。各市场参与者在经历多轮博弈之后，其报价在第 20 轮左右趋于稳定。因绿电具有绿证和电力的双重属性，在市场驱动力下绿电商最终报价高于火电商。

4.2.2　配额 K 变化对各发电商报价策略的影响

图 6 和图 7 分别为 RPS 配额 K 从 5%上升到 30%时，2 绿电商的报价变化曲线；图 8 为配额 K 变化对各大用户直购绿电电量的影响曲线。

从图 6 和图 7 可见，随着配额比的升高，大用户对于绿电的需求提高了，激发了绿电商在市场均衡中的竞争力，因绿电具备绿证和电力的双重属性，在多发电商之间的非合作博弈过程中，绿电商电价持续提升。从图 8 绿电商售电量来看，其市场份额总体上随着配额比例的升高而升高。

图 9 和图 10 分别为配额比 K 从 5%上升到 30%时，火电商 2 和火电商 3 的报价变化曲线；图 11 为配额 K 变化对火电商售电量的影响曲线。

表 1　各绿电商参数

Table 1　Parameters of green power suppliers

绿电商	a_i	b_i	c_i	$\overline{q}_{\mathrm{R},i}$	$b_{\mathrm{R},i}$
S1	0.085	32	0	200	0.25
S2	0.08	37.889	0	250	0.15

表 2　各火电商参数

Table 2　Parameters of thermal power suppliers

火电商	x_j	y_j	z_j	$\overline{q}_{\mathrm{C},j}$	$b_{\mathrm{C},j}$
C1	0.061	25.265	0	400	0.43
C2	0.082	26.471	0	250	0.26
C3	0.073	25.837	0	200	0.27
C4	0.076	25.588	0	120	0.25

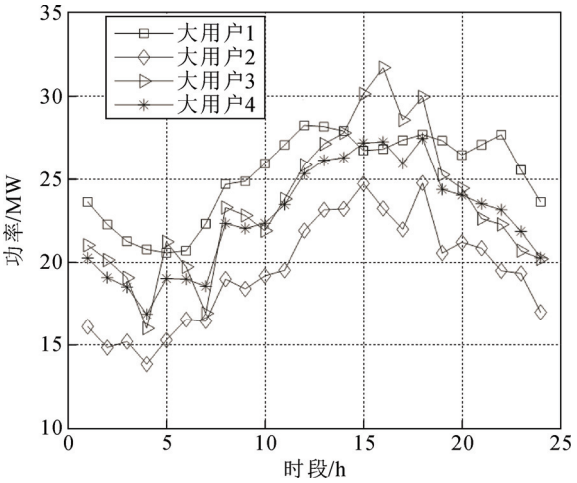


图 4　各大用户的负荷曲线

Fig.4　Load curves of each large consumer

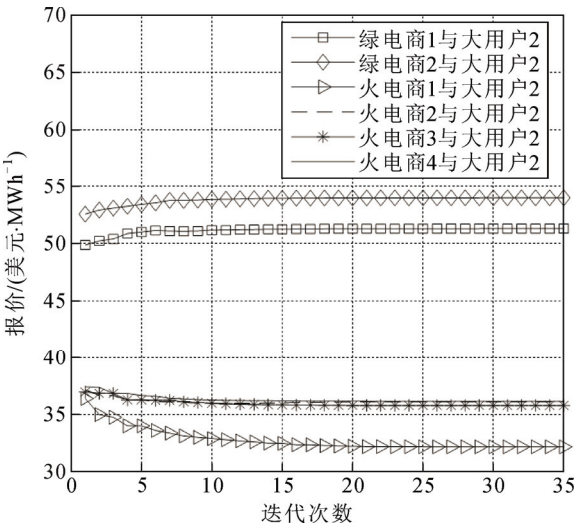


图 5　各发电商与大用户 2 的报价收敛曲线

Fig.5　Quotation convergence curves between power supplies and L2

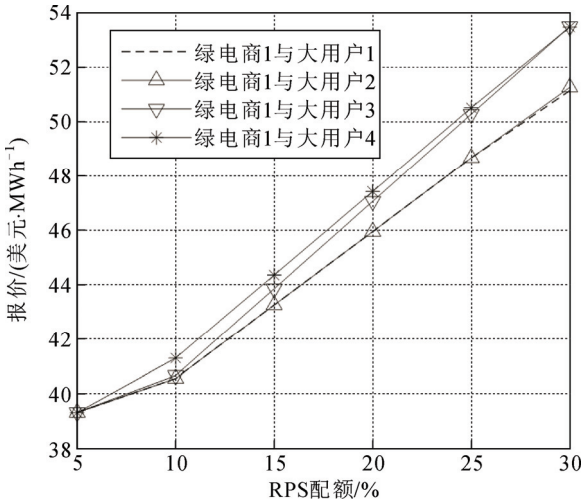


图 6 配额变化对绿电商 1 报价的影响

Fig.6 Influence of RPS quota change on quotation of S1

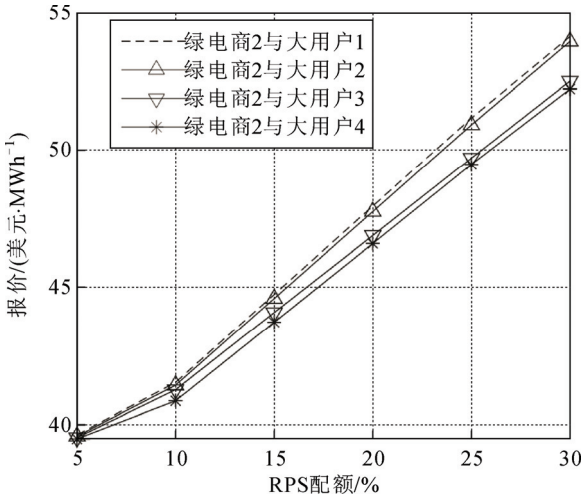


图 7 配额变化对绿电商 2 报价的影响

Fig.7 Influence of RPS quota change on quotation of S2

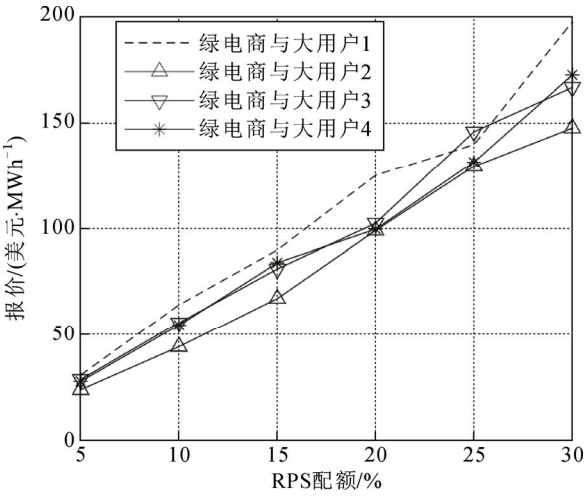


图 8 配额变化对绿电商售电量的影响

Fig.8 Influence of RPS quota change on electricity sales from green power suppliers

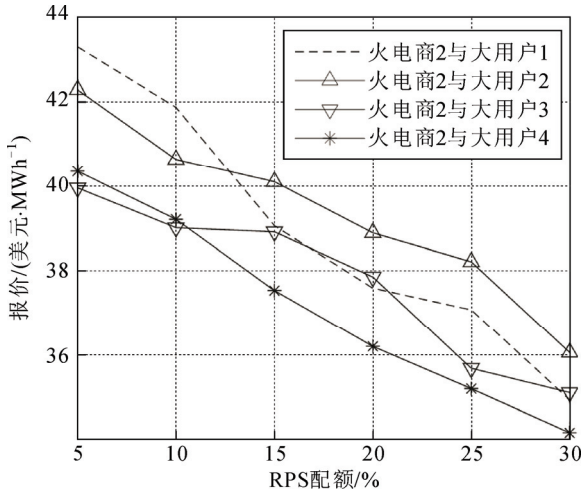


图 9 配额变化对火电商 2 报价的影响

Fig.9 Influence of RPS quota change on quotation of C2

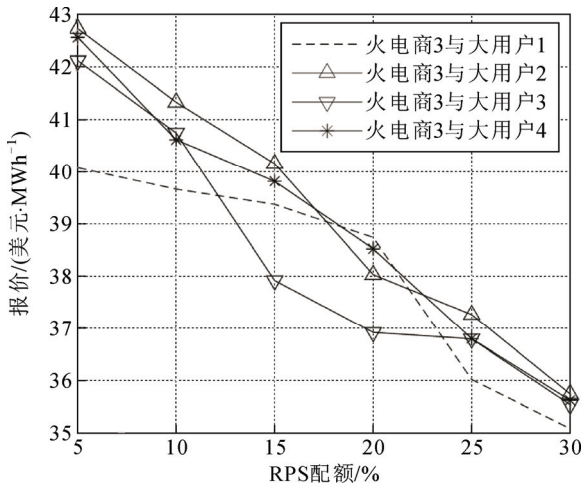


图 10 配额变化对火电商 3 报价的影响

Fig.10 Influence of RPS quota change on quotation of C3

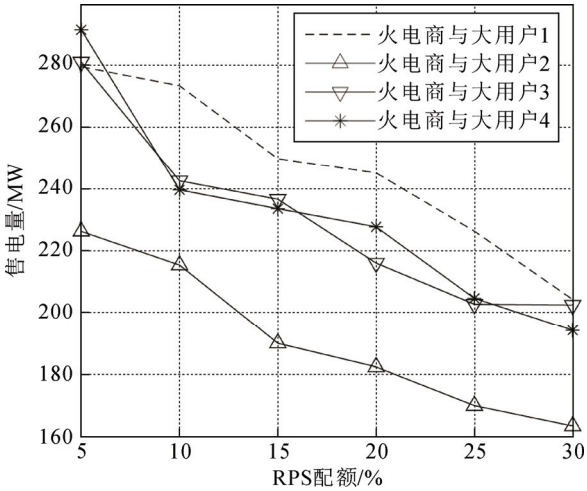


图 11 配额变化对火电商售电量的影响

Fig.11 Influence of RPS quota change on electricity sales from thermal power suppliers

从图 9 和图 10 可见，随着配额 K 的升高，大用户对于火电的需求降低了，削弱了火电商在市场中的竞争力，因火电仅具备电力属性，火电商的电价随其竞争力的降低而降低。由图 11 可见，其售电量市场份额总体上随着 RPS 配额 K 的升高而降低。

4.2.3　现货电价变化对直购电策略的影响分析

当配额 K=0.3 时，现货市场电价倍数依次取 0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75、2 时，各发电商对大用户 1 的报价随现货电价变化的曲线见图 12。

图 12 中，各发电商报价与现货市场电价基本成正比例关系，当现货电价较低时，发电商也会降低报价，避免报价过高导致大用户从现货市场购买，进而损失合同电量。因绿电商具备绿证和电力双重属性，绿电商在竞争性售电优势更大，其报价上升速度相对更快。

当配额 K=0.3，2 个绿电商报价取[51.143，54.143] 美元/MWh，4 个火电商的报价取[32.124，36.07，35.748，36.114]美元/MWh 时，保持大用户 1 的需求电量不变，大用户 1 的购电策略随现货电价变化曲线如图 13 所示。

由图 13 可见，当各发电商报价一定时，伴随现货市场电价的逐步增长，大用户会选择与发电商签订较多的合同电量来降低购电费用，因用户的购电量还受 RPS 的考核，所以在现货市场价格较低时，用户仍会从绿电商购置少量绿电来满足一部分 RPS 配额的要求。

4.2.4　配额变化对各市场参与者的成本利润分析

表 3 列出了不同 RPS 配额情况下，各发电商售电利润和各大用户交易成本对比。

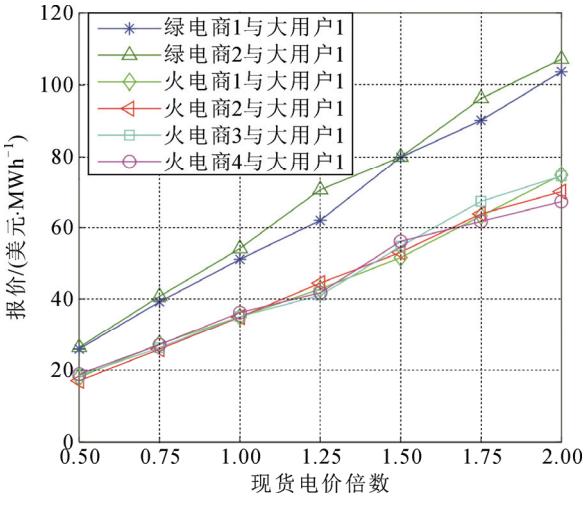


图 12　现货市场电价变化时的各发电商报价曲线

Fig.12　Quotation of power suppliers with different spot prices

从表 3 可见，随着 RPS 配额 K 的提升，绿电商的市场竞争力得以提升，其售电利润逐步升高；而火电商竞争力和利润逐步降低。大用户在绿证和电价的双重激励下，交易成本基本总体呈现下降趋势，但当强制配额 K 上升到 30%时，大用户的博弈能力被削弱，交易成本出现反弹现象。

5　结论

本文针对 RPS 背景下大用户直购电与多发电商报价决策存在的多层面耦合优化问题，建立了绿、火电商竞价与多大用户直购电双层博弈优化模型，

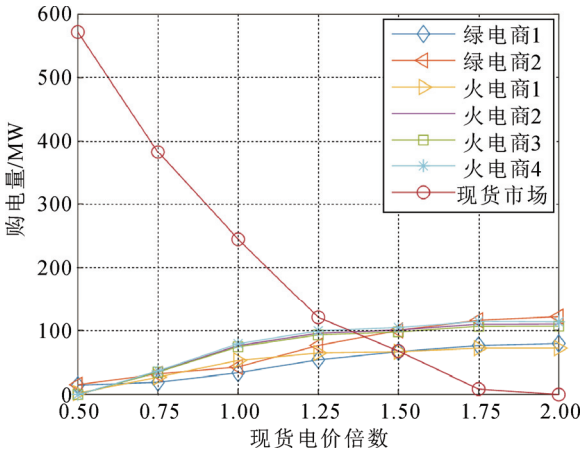


图 13　现货市场电价变化时的大用户 1 的购电策略曲线

Fig.13　Quantity strategies of L1 with different spot prices

表 3　不同配额比例下各市场参与者的成本利润对比

Table 3　Cost-profits comparison of participants under different RPS ratios

美元

市场参与者		10%	15%	20%	25%	30%
绿电	绿电 1	2071.98	2136.77	3584.93	5349.1	7281.9
	绿电 2	3019.91	3048.48	5613	9016.4	12 431.7
	绿电商利润合计	5091.89	5185.25	9197.93	14 365.5	19 713.6
火电	火电 1	1639.75	1610.01	1477.34	1425.81	1323.04
	火电 2	3327.39	3191.68	3033.1	2976.28	2814.88
	火电 3	2378.59	2305.74	2120.51	2047.48	1882.4
	火电 4	1838.44	1802.83	1578.46	1485.25	1300.13
	火电商利润合计	9184.17	8910.26	8209.41	7934.82	7320.45
大用户	大用户 1	32 187	31 110	30 350	29 995	30 183
	大用户 2	24 032	23 444	22 926	22 746	22 869
	大用户 3	29 700	28 732	28 086	27 779	27 892
	大用户 4	28 570	27 677	27 079	26 804	26 989
	交易成本合计	114 489	110 963	108 441	107 324	107 933

根据仿真分析，得到如下结论：

1）绿、火电商的报价策略受到 RPS 配额和现货市场价格的双重影响，通过寻优合理报价可实现自身利润最大化。大用户直购电在双重激励的驱动下也能降低交易成本。

2）当现货电价比绿、火电商报价低时，大用户仍会购买少量绿电来满足一部分配额的要求，伴随现货市场电价的提升，绿、火电商的报价均会随之上升，因绿电商具有较大的竞争优势，其报价上升速度相对更快。

3）大用户直购电在满足配额要求后，仍具有一定的议价空间，通过与多发电商博弈实现了交易成本最优，但当配额 K 提升到 30%左右时，其博弈能力被削弱，大用户交易成本出现反弹现象。

4）随着可再生能源占比的提高，其出力不确定性会增加绿电商参与市场行为的竞争风险；另外，交易规模的扩大也会影响系统线路潮流约束和安全校核。未来将在本文所提模型的基础上，进一步考虑源荷不确定性、线路潮流约束等因素的影响。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 蒋轶澄，曹红霞，杨 莉，等. 可再生能源配额制的机制设计与影响分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(7)：187-199.
JIANG Yicheng, CAO Hongxia, YANG Li, et al. Mechanism design and impact analysis of renewable portfolio standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 187-199.

[2] 李 晖，刘 栋，姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报，2021，41(18)：6245-6258.
LI Hui，LIU Dong，YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(18)：6245-6258.

[3] 周孝信，陈树勇，鲁宗相，等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报，2018，38(7)：1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

[4] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[5] 魏震波，隋东旭，王瀚琳，等. 含双边储备市场及绿证交易的现货市场分析[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(8)：52-60.
WEI Zhenbo, SUI Dongxu, WANG Hanlin, et al. Spot market analysis including bilateral reserve market and green certificate trading[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 52-60.

[6] 钟宇峰，黄民翔，文福拴，等. 计及绿色证书交易机制的大用户直购电市场均衡分析[J]. 电力自动化设备，2014，34(2)：144-150.
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, WEN Fushuan, et al. Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 144-150.

[7] 谭忠富，王 冠，李 鹏，等. 市场环境下的售电商合作博弈研究[J]. 中国电力，2017，50(4)：45-51.
TAN Zhongfu, WANG Guan, LI Peng, et al. Research on cooperative game of electricity providers under the market environment[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 45-51.

[8] ZHANG Z, JIANG Y C, LIN Z Z, et al. Optimal alliance strategies among retailers under energy deviation settlement mechanism in China's forward electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2059-2071.

[9] 马天男，杜 英，苟全峰，等. 基于 Berge-NS 均衡的电力市场多主体非合作博弈竞争模型[J]. 电力自动化设备，2019，39(6)：192-204.
MA Tiannan, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Non-cooperative competition game model of multiple subjects in electricity market based on Berge-NS equilibrium[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 192-204.

[10] WU C F, ZHAO Q H, XI M H. A retailer-supplier supply chain model with trade credit default risk in a supplier-Stackelberg game[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 112: 568-575.

[11] 杨 辉，莫 峻. 发电侧企业群体间竞价行为的随机演化博弈[J]. 电网技术，2021，45(9)：3389-3397.
YANG Hui, MO Jun. Stochastic evolutionary game of bidding behavior for generation side enterprise groups[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3389-3397.

[12] 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.

[13] JU L W, WU J, LIN H Y, et al. Robust purchase and sale transactions optimization strategy for electricity retailers with energy storage system considering two-stage demand response[J]. Applied Energy, 2020, 271: 115155.

[14] 闵子慧，陈红坤，林洋佳，等. 新电改背景下大用户直购双边博弈模型[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(6)：77-84.
MIN Zihui, CHEN Hongkun, LIN Yangjia, et al. Bilateral game model of large consumers' direct purchasing under power system reform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 77-84.

[15] 李咸善，陈敏睿，程 杉，等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2286-2295.
LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2286-2295.

[16] 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)：18-24，75.
JIANG Wei, WU Jie, FENG Wei, 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, 75.

[17] 安学娜，张少华，李 雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化，2017，41(9)：84-89.
AN Xuena, ZHANG Shaohua, LI Xue. Equilibrium analysis of oligopolistic electricity markets considering tradable green certificates[J].

Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 84-89.

[18] 刘雨梦，陈皓勇，黄　龙，等. 基于多群体协同进化的电力市场均衡模型[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(10)：38-45.
LIU Yumeng, CHEN Haoyong, HUANG Long, et al. Equilibrium model of electricity market based on multi-swarm co-evolution[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 38-45.

[19] 林晓凡，曾佳妮，冯冬涵. 可再生能源消纳责任权重制下电力市场优化决策模型[J]. 电力系统自动化，2021，45(6)：158-168.
LIN Xiaofan, ZENG Jiani, FENG Donghan. Optimization decision model of electricity market under renewable portfolio standards[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 158-168.

[20] 张　翔，陈　政，马子明，等. 适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究[J]. 电网技术，2019，43(8)：2682-2690.
ZHANG Xiang, CHEN Zheng, MA Ziming, et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2682-2690.

[21] 周晓洁，彭　谦，杨　睿，等. 绿色电力证书交易影响下计及输电阻塞影响的综合型能源发售电商竞价策略研究[J]. 电网技术，2020，44(4)：1317-1324.
ZHOU Xiaojie, PENG Qian, YANG Rui, et al. Power price marketing strategy of comprehensive energy-based electricity sales company participating in electricity market competition under ubiquitous environment of internet of things[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1317-1324.

[22] GUO H Y, CHEN Q X, XIA Q, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1898-1910.

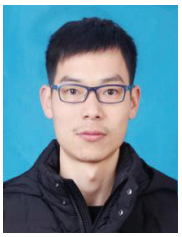
[23] 朱继忠，冯禹清，谢平平，等. 考虑可再生能源配额制的中国电力市场均衡模型[J]. 电力系统自动化，2019，43(1)：168-175.
ZHU Jizhong, FENG Yuqing, XIE Pingping, et al. Equilibrium model of Chinese electricity market considering renewable portfolio standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 168-175.

[24] 王　辉，陈波波，赵文会，等. 可再生能源配额制下跨省区电力交易主体最优决策[J]. 电网技术，2019，43(6)：1987-1994.
WANG Hui, CHEN Bobo, ZHAO Wenhui, et al. Optimal decision-making of trans-provincial power transaction subjects under Renewable Portfolio Standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 1987-1994.

[25] 李至骜，陈来军，刘当武，等. 基于主从博弈的储能电站容量电费定价方法[J]. 高电压技术，2020，46(2)：519-526.
LI Zhiao, CHEN Laijun, LIU Dangwu, et al. Subsidy pricing method for Stackelberg-game-based energy storage system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 519-526.

[26] 梅生伟，魏　韡. 智能电网环境下主从博弈模型及应用实例[J]. 系统科学与数学，2014，34(11)：1331-1344.
MEI Shengwei, WEI Wei. Hierarchal game and its applications in the smart grid[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2014, 34(11): 1331-1344.

[27] 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.



李　飞
1986—，男，博士生，讲师
主要从事新能源电力系统优化调度、电力系统稳定与控制方面的研究工作
E-mail: dqlifei@ctgu.edu.cn

LI Fei
Ph.D. candidate



李咸善(通信作者)
1964—，男，博士，教授，博导
主要从事新能源电力系统优化调度、电力系统稳定与控制、梯级水电站运行与控制等方面的研究工作
E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

LI Xianshan
Ph.D., Professor
Corresponding author



鲁明芳
1982—，女，博士生
主要从事电力系统优化运行与电力市场等方面的研究工作
E-mail: lumingfang@ctgu.edu.cn

LU Mingfang
Ph.D. candidate

收稿日期　2022-01-05　在线出版日期　2022-06-01　　编辑　程子丰

附录 A　主从博弈下层优化问题的 KKT 条件转化

A.1 下层大用户模型的 KKT 条件

1)记式(8)的对偶变量为$\{\lambda_k\}$,式(9)的对偶变量$\{\eta_k^{i+},\eta_k^{i-},\eta_k^{j+},\eta_k^{j-},\eta_{k,t}^{\mathrm{m}+},\eta_{k,t}^{\mathrm{m}-}\}$，下层大用户决策模型的增广拉格朗日函数为

$$L=\begin{cases}\sum_{i=1}^{m_\mathrm{g}}p_{\mathrm{R},i,k}q_{\mathrm{R},i,k}+\sum_{j=1}^{m_\mathrm{f}}p_{\mathrm{C},j,k}q_{\mathrm{C},j,k}+\sum_{t=1}^{T}p_tq_{k,t}+\\(K\sum_{t=1}^{T}d_{k,t}-\sum_{i=1}^{m_\mathrm{g}}q_{\mathrm{R},i,k})p_\mathrm{R}+\lambda_k(\sum_{i=1}^{m_\mathrm{g}}q_{\mathrm{R},i,k}+\\\sum_{j=1}^{m_\mathrm{f}}q_{\mathrm{C},j,k}+\sum_{t=1}^{T}q_{k,t}-\sum_{t=1}^{T}d_{k,t})+\eta_k^{i+}(q_{\mathrm{R},i,k}-\overline{q}_{\mathrm{R},i})+\\\eta_k^{i-}(-q_{\mathrm{R},i,k})+\eta_k^{j+}(q_{\mathrm{C},j,k}-\overline{q}_{\mathrm{C},j})+\eta_k^{j-}(-q_{\mathrm{C},j,k})+\\\sum_{t=1}^{T}\eta_{k,t}^{\mathrm{m}+}(q_{k,t}-d_{k,t})+\sum_{t=1}^{T}\eta_{k,t}^{\mathrm{m}-}(-q_{k,t})\end{cases}\tag{A1}$$

2)对偶变量约束条件

$$\eta_k^{i+},\eta_k^{i-},\eta_k^{j+},\eta_k^{j-},\eta_{k,t}^{\mathrm{m}+},\eta_{k,t}^{\mathrm{m}-}\geq 0,\quad \forall k,\forall t\tag{A2}$$

3)互补松弛条件

$$\begin{cases}0\leq\eta_k^{i+}\perp(q_{\mathrm{R},i,k}-\overline{q}_{\mathrm{R},i})\geq 0\\0\leq\eta_k^{i-}\perp(0-q_{\mathrm{R},i,k})\geq 0\\0\leq\eta_k^{j+}\perp(q_{\mathrm{C},j,k}-\overline{q}_{\mathrm{C},j})\geq 0\\0\leq\eta_k^{j-}\perp(0-q_{\mathrm{C},j,k})\geq 0\\0\leq\eta_{k,t}^{\mathrm{m}+}\perp(q_{k,t}-d_{k,t})\geq 0\\0\leq\eta_{k,t}^{\mathrm{m}-}\perp(0-q_{k,t})\geq 0\end{cases}\tag{A3}$$

4)拉格朗日函数在原问题最优解处梯度为 0

$$\begin{cases}a_{\mathrm{R},i,k}+2b_{\mathrm{R},i}q_{\mathrm{R},i,k}-\lambda_k-\eta_k^{i-}+\eta_k^{i+}=0\\a_{\mathrm{C},j,k}+2b_{\mathrm{C},j}q_{\mathrm{C},j,k}-\lambda_k-\eta_k^{j-}+\eta_k^{j+}=0\\p_t-\lambda_k-\eta_{k,t}^{\mathrm{m}-}+\eta_{k,t}^{\mathrm{m}+}=0\end{cases}\tag{A4}$$

A.2 主从博弈双层模型转化为单层线性优化模型

以绿电商 i 为例,其目标函数$J_{\mathrm{R},i}$含有两个决策变量的乘积$p_{\mathrm{R},i,k}q_{\mathrm{R},i,k}$，可以利用强对偶性质，将非线性项利用下层问题的对偶问题进行代替。设下层问题的对偶问题为$g_k(\lambda,\eta)$，具体可表示为

$$g_k(\lambda,\eta)=\begin{pmatrix}\lambda_k\sum_{t=1}^{T}d_{k,t}-\sum_{i=1}^{m_\mathrm{g}}\eta_k^{i+}\overline{q}_{\mathrm{R},i}-\\\sum_{j=1}^{m_\mathrm{f}}\eta_k^{j+}\overline{q}_{\mathrm{C},i}-\sum_{t=1}^{T}\eta_{k,t}^{\mathrm{m}+}d_{k,t}\end{pmatrix}\tag{A5}$$

由于下层优化问题与其对偶问题等价，即

$$\min J_k=\max g_k(\lambda,\eta)\tag{A6}$$

推导得到

$$p_{\mathrm{R},i,k}q_{\mathrm{R},i,k}=\begin{pmatrix}g_k(\lambda,\eta)-\sum_{ii=1,ii\neq i}^{m_\mathrm{g}}p_{\mathrm{R},ii,k}q_{\mathrm{R},ii,k}-\sum_{j=1}^{m_\mathrm{f}}p_{\mathrm{C},j,k}q_{\mathrm{C},j,k}-\\\sum_{t=1}^{T}p_tq_{k,t}-(K\sum_{t=1}^{T}d_{k,t}-\sum_{i=1}^{m_\mathrm{g}}q_{\mathrm{R},i,k})p_\mathrm{R}\end{pmatrix}\tag{A7}$$

将式(A7)代入绿电商 i 的目标函数(式(1))，可将发电商与大用户的主从博弈双层优化模型转换为单层线性优化模型，其目标函数为

$$J_{\mathrm{R},i}=\begin{pmatrix}-C_{\mathrm{R},i}+\sum_{k=1}^{L}\begin{pmatrix}g_k(\lambda,\eta)-\sum_{ii=1,ii\neq i}^{m_\mathrm{g}}p_{\mathrm{R},ii,k}q_{\mathrm{R},ii,k}-\\\sum_{j=1}^{m_\mathrm{f}}p_{\mathrm{C},j,k}q_{\mathrm{C},j,k}-\sum_{t=1}^{T}p_tq_{k,t}-\\(K\sum_{t=1}^{T}d_{k,t}-\sum_{i=1}^{m_\mathrm{g}}q_{\mathrm{R},i,k})p_\mathrm{R}\end{pmatrix}\end{pmatrix}\tag{A8}$$

该模型满足约束条件：{式(7)—式(9)，式(A2)—式(A4)}。

附录 B　非合作博弈解的存在性和唯一性证明

根据纳什均衡点存在性定理[26]：在有限个参与者的博弈问题中，若参与者的策略集合是闭合的、有界的凸集，且策略空间上的每一个目标函数是连续凸函数（按国内凸凹函数定义），则该博弈问题存在纳什均衡点。

在多发电商非合作博弈中，参与者是各发电商，报价是各发电商的寻优策略。以绿电商 i 为例，根据式(1)，得到其利润函数为

$$J_{\mathrm{R},i}=\begin{pmatrix}\sum_{k=1}^{\mathrm{L}}\left(a_{\mathrm{R},i,k}+b_{\mathrm{R},i}q_{\mathrm{R},i,k}\right)q_{\mathrm{R},i,k}-\\\left(a_iq_{\mathrm{R},i}^2+b_iq_{\mathrm{R},i}+c_i\right)\end{pmatrix}\tag{B1}$$

从式(1)可以看出，绿电商的个数为 m_g，即博弈参与人是有限的。且各发电商报价满足如下约束

$$p_{\mathrm{R},i}^{\min}\leq p_{\mathrm{R},i,k}\leq p_{\mathrm{R},i}^{\max}\tag{B2}$$

绿电商合同电价 $p_{\mathrm{R},i,k}$ 是关于其基础电价 $a_{\mathrm{R},i,k}$ 的一次函数，因此，m_g 个绿电商的基础价格策略集合是闭合的、有界的凸集，且当绿电商 i 参与电能交易时必然有对应的价格策略 $a_{\mathrm{R},i,k}$ 存在，故其策略集非空。

在多发电商非合作博弈流程中，当寻优某一绿电商 i 的报价时，其它发电商报价应保持不变，可视为常数。因此，下层大用户 k 的交易成本函数(式(4))可改写为

$$J_k=p_{\mathrm{R},i,k}q_{\mathrm{R},i,k}+\sum_{ii=1,ii\neq i}^{m_{\mathrm{g}}}p_{\mathrm{R},ii,k}q_{\mathrm{R},ii,k}+\sum_{j=1}^{m_{\mathrm{f}}}p_{\mathrm{C},j,k}q_{\mathrm{C},j,k}+\sum_{t=1}^{T}p_t q_{k,t}+p_{\mathrm{R}}(K\sum_{t=1}^{T}d_{k,t}-q_{\mathrm{R},i,k}-\sum_{ii=1,ii\neq i}^{m_{\mathrm{g}}}q_{\mathrm{R},ii,k}) \tag{B3}$$

若将常数项用 C 代替，则式(B3)可改写为

$$J_k=\left(a_{\mathrm{R},i,k}+b_{\mathrm{R},i}q_{\mathrm{R},i,k}\right)q_{\mathrm{R},i,k}-p_{\mathrm{R}}q_{\mathrm{R},i,k}+C \tag{B4}$$

对式(B4)求关于 $q_{\mathrm{R},i,k}$ 的一阶偏导，可求得大用户 k 从绿电商 i 购买的最优电量为：

$$2b_{\mathrm{R},i}q_{\mathrm{R},i,k}+a_{\mathrm{R},i,k}=p_{\mathrm{R}} \tag{B5}$$

$$q_{\mathrm{R},i,k}^{\ *}=\frac{p_{\mathrm{R}}-a_{\mathrm{R},i,k}}{2b_{\mathrm{R},i}} \tag{B6}$$

通过式(B6)可得，对于既定的发电商报价策略，大用户有与之对应的唯一购电策略，将式(B6)代入式(B1)，并将常数项用 C 代替，可得

$$J_{\mathrm{R},i}=\left(a_{\mathrm{R},i,k}+b_{\mathrm{R},i}\left(\frac{p_{\mathrm{R}}-a_{\mathrm{R},i,k}}{2b_{\mathrm{R},i}}\right)\right)\left(\frac{p_{\mathrm{R}}-a_{\mathrm{R},i,k}}{2b_{\mathrm{R},i}}\right)-\left(a_i\left(\frac{p_{\mathrm{R}}-a_{\mathrm{R},i,k}}{2b_{\mathrm{R},i}}\right)^2+b_i\left(\frac{p_{\mathrm{R}}-a_{\mathrm{R},i,k}}{2b_{\mathrm{R},i}}\right)\right)+C \tag{B7}$$

对式(B7)求关于 $a_{\mathrm{R},i,k}$ 的二阶偏导，可得

$$\frac{\partial^2 J_{\mathrm{R},i}}{\partial\left(a_{\mathrm{R},i,k}\right)^2}=-\frac{(a_i-b_{\mathrm{R},i})}{2\left(b_{\mathrm{R},i}\right)^2}<0 \tag{B8}$$

由式(B8)可见，绿电商目标函数的海森矩阵为负定矩阵，各绿电商利润函数关于其报价策略均为连续凸函数。同理可得，各火电商的利润函数也满足连续凸函数特点。

基于以上分析可得，多发电商间的非合作博弈存在唯一的纳什均衡解。