第 49 卷 第 4 期：1341-1351 高电压技术 Vol.49, No.4: 1341-1351
2023 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220948

园区多微网 P2P 电−碳耦合交易市场设计

葛少云[1]，程雪颖[1]，刘　洪[1]，李俊锴[1]，李吉峰[2]
（1. 天津大学智能电网教育部重点实验室，天津 300072;
2. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司，大连 116001）

摘　要：针对园区多微网交易多以单纯经济性为导向而忽略碳排放效益的问题，设计了端对端(peer-to-peer，P2P)能量交易与碳交易的耦合市场，以期进一步实现园区低碳运营。首先，基于电力系统在配电网节点处的边际碳排放因子，提出了分布式可再生能源发电低碳贡献的度量方法，构建了各微网基于电−碳交易的收益度量模型。其次，运用基于博弈的 P2P 交易机制，设计了完全竞争条件下保障各微网能够根据实时电−碳价格灵活调整发用电行为与购售角色的日前电−碳联动市场，并证明了所设计市场博弈均衡点的存在性。再次，基于电能和碳配额的供求关系，推导了电价与碳价的表达式，并提出了可有效保证用户隐私的迭代优化算法。最后，通过算例验证了所设计市场可以有力支撑园区多微网交易中经济效益和低碳效益的融合。

关键词：多微网；端对端交易；碳电耦合；不确定性；低碳度量；分布式求解

Market Design of P2P Electricity Carbon Coupling Transaction Among Multi-microgrids in a Zone

GE Shaoyun[1], CHENG Xueying[1], LIU Hong[1], LI Junkai[1], LI Jifeng[2]
(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Dalian Electric Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Dalian 116001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the multi-microgrid transactions in the zone are purely economic oriented and ignore the benefits of carbon emissions, a coupling market of peer-to-peer (P2P) energy trading and carbon trading is designed to further realize the low-carbon operation of the zone. Firstly, based on the marginal carbon emission factor of the distribution network, the measurement method of the low-carbon contribution of distributed renewable energy generation is proposed, and the revenue measurement model of each microgrid based on electricity-carbon trading is constructed. Secondly, by using the P2P trading mechanism based on game theory, a day-ahead electricity-carbon linkage market is designed under the condition of perfect competition, so that each microgrid can flexibly adjust the electricity generation and consumption behavior and the purchase and sale role according to the real-time electricity and carbon price; moreover, the existence of the designed market game equilibrium point is proved. Thirdly, based on the supply-demand relationship of electricity and carbon quotas, the expressions of electricity price and carbon price are derived, and a distributed optimization algorithm which can effectively ensure the privacy of users is proposed. Finally, simulation results verify that the designed market can effectively support the integration of economic benefits and low-carbon benefits in the zone.

Key words: multi-microgrids; peer-to-peer transaction; electricity carbon coupling; uncertainty; low carbon measurement; distributed solving algorithm

0　引言

随着“双碳”目标的提出，国家大力发展可再生能源发电，分布式可再生能源高比例接入已成为配电网的新形态[1]，用户角色已逐步从消费者转变为产消者。此外，随着柔性负荷等灵活性资源的增加，配电网中的可控资源愈加丰富，微电网已成为发挥配电环节灵活性的重要能源利用形式。鉴于园区内资源禀赋丰富、可调度空间较大且能耗偏高[2]，通过多微网的协同交易，可以有效促进源侧的清洁能源利用和荷侧的绿色用能行为引导，进而发挥用户侧的减排潜力，为园区低碳运行提供新的解决方案。

端对端(peer-to-peer，P2P)交易机制是配电网侧

基金资助项目：国家自然科学基金(51777133)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51777133).

市场的一种去中心化的交易模式。在 P2P 交易机制下，产消者和产消者之间能够直接交易，交易价格由 P2P 交易平台制定或者由交易双方协商确定，不需要配电网运营商(distribution system operator，DSO)的介入。这种交易机制在分布式可再生能源高比例接入场景下，能够实现多方利益主体的共赢局面，激励各灵活性资源消纳新能源，促进新能源良性发展，实现低碳目标。目前，P2P 交易机制在能源交易中的研究已趋于成熟。现有研究按照交易目标可将 P2P 交易分为 2 类：1）能够实现社会福利最大的 P2P 交易：可以通过分布式算法或者合作博弈收益分摊的交易机制实现；2）达到“均衡”状态的 P2P 交易：此类市场设计的交易目标虽然无法使最终的交易结果达到社会福利最大，但更符合现实场景。对于第 1 类交易，文献[3]运用线性规划模型模拟市场运行，给出了能量流的交易结果；文献[4]采用 Nash 议价的方式对优化模型得到的社会福利进行分配；文献[5-6]运用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers，ADMM)、次梯度法、共识机制等分布式求解方法模拟产消者之间的信息传递过程，得到能量流和资金流的交易结果。第 2 类交易根据交易机制即实现方式的不同，又可分为平台定价、拍卖、多主多从博弈 3 种。对于平台定价的交易机制，文献[7]总结了供需比、中间市场率以及账单分享 3 种典型的平台定价机制，并建立了基于平台定价机制的仿真框架和性能评价指标体系；文献[8]对供需比机制进行改进，弥补了其供大于求情况下价格无法调节的缺陷；对于拍卖类型的交易，文献[9]提出了一种启发式的投标策略，运用储能状态给出能源投标价格，并在佛罗里达国际大学智能电网测试系统中进行实际的实施和运行；文献[10-11]提出了一种基于双拍卖市场的 P2P 能量交易方法，各产消者考虑历史交易决策信息，以个体利益最大为目标，通过交互有限的信息，在产消者之间互相发起交易请求。与拍卖类型的 P2P 交易机制不同，多主多从博弈交易模式下，产消者之间可以交互决策和行为，是一种“动态”博弈。文献[12]通过非合作博弈理论和进化博弈理论分析了 P2P 交易过程中存在的卖方价格竞争以及买方选择竞争问题。文献[13]提出了一种针对分布式市场参与者的用户级自主调度模型和一种考虑多主体非合作博弈的 P2P 交易机制。然而，根据实时价格灵活调整购售角色的市场交易模式还有待深入研究。

尽管 P2P 能量交易能够促进新能源消纳从而实现低碳运行，但是“碳中和、碳达峰”的“双碳”目标的提出对降低碳排放提出了更高的要求。目前，碳税、碳配额和碳交易是进一步减少能源系统碳排放的有效机制。与碳税与碳配额相比，碳交易由于其市场属性更具灵活性，能够更加高效地实现减排目标。文献[14-15]运用双层模型实现了 DSO 与用户之间的能源与碳交易，上层 DSO 制定碳价，下层用户响应能源和碳价得到运行策略。文献[16]向发电商收取碳补贴，向消费者提供货币补偿，将发电商与消费者之间的碳交易建模为多主多从博弈。上述文献考虑了碳交易，但是没有将碳交易耦合到 P2P 能量交易中。文献[17-18]运用 ADMM 分布式求解的方法将 P2P 碳交易与能源交易相结合，但是这种方式可能会损害部分用户的利益，在现实中无法达到均衡状态。文献[19]将碳配额和电能在 P2P 市场中进行拍卖，这种方式需要将历史拍卖价格等作为投标依据，交易结果具有随机性。文献[20]运用非合作博弈模型描述了碳交易机制下产消者 P2P 交易的行为与决策，但是其博弈模型得到的碳价不是时变的，无法根据市场状态实时激励用户参与碳减排。现有对端碳电耦合交易的研究的不足之处体现在：1）在“均衡”状态的 P2P 交易机制下，需要事先确定买卖角色且在交易过程中不能改变，限制了市场交易的灵活性；2）碳价非时变，体现不出碳交易在时间尺度上调节供求关系的优势。

在碳度量方面，大多数文献中碳交易的交易标的是交易对象所分配的碳配额与其发电行为实际产生碳排放的差值，并未考虑清洁能源发电对系统低碳的贡献以及用电行为产生的虚拟碳排放。文献[19]通过碳潮流计算了产消者用能行为的碳排放，但是碳潮流的计算使用的是平均碳排放因子，只能度量真实的碳排放情况，无法度量其发电或用电行为产生碳排放的边际成本，用于市场交易中无法准确激励低碳行为。

为此，本文以园区为研究对象，以多微网为市场主体，设计了多微网 P2P 电−碳耦合交易市场。首先，基于电力系统在配电网节点处的边际碳排放因子，提出了分布式可再生能源发电的低碳贡献度量方法，构建了各微网考虑碳电交易的运行模型。其次，设计了完全竞争条件下各微网能够灵活改变产消角色，且电价、碳价能够实时激励发用电行为

的日前碳电联动 P2P 交易市场，并证明了市场均衡的存在性。再次，基于电能和碳配额的供求关系，推导了电价与碳价的表达式，并提出了相应的迭代算法以保证用户的隐私。最后，通过算例验证了所设计市场机制在园区经济性和低碳效益方面的有效性。

1　微电网总收益度量

1.1　不确定性处理

园区内多微网内部资源包括光伏(photovoltaic，PV)、风机(wind turbine，WT)、微型燃气轮机(micro-turbines，MT)、柔性电负荷。其中，微型燃气轮机、柔性电负荷是各微网的决策变量，光伏和风机出力作为边界条件具有不确定性。假设光伏出力服从 Beta 分布，风机出力服从 Weibull 分布。为了确定各微网在日前市场中的交易量，给出确定的可再生能源出力 $P_{\mathrm{RES},i,t}$，其含义为微网 i 的分布式可再生能源在 t 时刻的出力，大于 $P_{\mathrm{RES},i,t}$ 的置信度为 $1-\alpha$。微网根据 $P_{\mathrm{RES},i,t}$ 进行日前 P2P 交易，真实出力与 $P_{\mathrm{RES},i,t}$ 不匹配的部分可与上级市场进行交易。置信度 $1-\alpha$ 衡量了 P2P 市场的风险水平。

1.2　低碳贡献度量方法

假设园区内有 N 个微网，由于分布式可再生能源发电会产生低碳效益，负荷用能会产生虚拟碳排放成本，微电网 i 在 t 时刻可交易的碳配额为

$$E_{i,t}=E_{\mathrm{cap},i,t}+c_{\mathrm{e},t}\left(P_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}-P_{\mathrm{D},i,t}\right)-c_{\mathrm{g},t}P_{\mathrm{MT},i,t} \tag{1}$$

式中：$E_{\mathrm{cap},i,t}$ 为微电网 i 在 t 时刻初始分配的碳配额；$P_{\mathrm{MT},i,t}$ 为微电网 i 在 t 时刻微型燃气轮机的出力；$P_{\mathrm{D},i,t}$ 为微电网 i 在 t 时刻的负荷；$c_{\mathrm{e},t}$ 为配电系统的边际碳排放因子；$c_{\mathrm{g},t}$ 为燃气网的碳排放因子。一般来说，$c_{\mathrm{e},t}>c_{\mathrm{g},t}$。

1.3　微电网收益度量模型

微电网的收益度量模型如下所示：

$$\begin{aligned}\max\left(R_{\mathrm{total},i,t}\right)=&U_{i,t}\left(P_{\mathrm{D},i,t}\right)+\pi_t\left(P_{\mathrm{s},i,t}-P_{\mathrm{b},i,t}\right)-\\&\pi_t^{\max}P_{\mathrm{b},i,t}^{\mathrm{DSO}}+\pi_t^{\min}P_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{DSO}}-C_{i,t}\left(P_{\mathrm{MT},i,t}\right)+\\&\rho_t\left(E_{\mathrm{s},i,t}-E_{\mathrm{b},i,t}\right)-\rho_t^{\max}E_{\mathrm{b},i,t}^{\mathrm{CO}}+\rho_t^{\min}E_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{CO}}\end{aligned} \tag{2}$$

$$U_{i,t}\left(P_{\mathrm{D},i,t}\right)=\lambda_{i,t}P_{\mathrm{D},i,t}-\beta_{i,t}\left(P_{\mathrm{D},i,t}\right)^2 \tag{3}$$

$$C_{i,t}\left(P_{\mathrm{MT},i,t}\right)=a_i\left(P_{\mathrm{MT},i,t}\right)^2+b_iP_{\mathrm{MT},i,t}+c_i \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{D},i,t}+P_{\mathrm{s},i,t}+P_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{DSO}}=P_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}+P_{\mathrm{b},i,t}+P_{\mathrm{b},i,t}^{\mathrm{DSO}} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}&E_{\mathrm{s},i,t}+E_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{CO}}=E_{\mathrm{b},i,t}+E_{\mathrm{b},i,t}^{\mathrm{CO}}+E_{\mathrm{cap},i,t}+\\&c_{\mathrm{e},t}\left(P_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}-P_{\mathrm{D},i,t}\right)-c_{\mathrm{g},t}P_{\mathrm{MT},i,t}\end{aligned} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{D},i,t}^{\min}\le P_{\mathrm{D},i,t}\le P_{\mathrm{D},i,t}^{\max} \tag{7}$$

$$0\le P_{\mathrm{MT},i,t}\le P_{\mathrm{MT},i,t}^{\max} \tag{8}$$

式中：π_t 为 P2P 市场的交易电价；$P_{\mathrm{s},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{b},i,t}$ 为 P2P 市场上的售电量和购电量；$\pi_t^{\max}$ 和 $\pi_t^{\min}$ 为 DSO 的售电电价和上网电价；$P_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{DSO}}$ 和 $P_{\mathrm{b},i,t}^{\mathrm{DSO}}$ 为微电网与 DSO 交互的售电量和购电量；ρ_t 为 P2P 市场的交易碳价；$E_{\mathrm{s},i,t}$ 和 $E_{\mathrm{b},i,t}$ 为 P2P 市场上的售碳量和购碳量；$\rho_t^{\max}$ 和 $\rho_t^{\min}$ 为上级碳市场销售和购买碳价；$E_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{CO}}$ 和 $E_{\mathrm{b},i,t}^{\mathrm{CO}}$ 为微电网与上级碳市场交互的售碳量和购碳量。式(2)中 max(·)表示求极大化；式(2)的第 1 项 $U_{i,t}$ 为用户用能的效用函数，如式(3)所示，$\lambda_{i,t}$ 反映了用户偏好，$\beta_{i,t}$ 为预先定义的常数；第 2 项为 P2P 电能交易收益；第 3、第 4 项为与 DSO 交易电能的支出和收益；第 5 项为燃气轮机的成本函数，如式(4)所示，其中 a_i、b_i、c_i 分别为二次项系数、一次项系数和常数项系数；第 6 项为 P2P 碳交易的收益；第 7 项和第 8 项为与上级碳市场交易碳配额的支出和收益。式(5)为电能平衡约束。式(6)为碳配额平衡约束。式(7)和式(8)分别为用能范围约束和燃气轮机容量限制，其中，$P_{\mathrm{D},i,t}^{\min}$、$P_{\mathrm{D},i,t}^{\max}$ 为用能最小值与最大值；$P_{\mathrm{MT},i,t}^{\max}$ 为燃气轮机出力的最大值。

2　耦合市场模型

2.1　耦合市场架构

园区多微网 P2P 电−碳耦合交易市场架构如图 1 所示。微网可选择与其他微网交易电能和碳配额，也可以从 DSO 和上级碳市场购买或销售电能和碳配额。碳电交易平台负责在微网间传递各微网上报的电能和碳配额的交易价格和交易量。

2.2　市场均衡模型

本文假设 P2P 市场是一个完全竞争市场，当市场处于均衡状态时，电能交易价格是相同的[21-22]。电−碳耦合市场均衡模型为式(2)—(10)，i=1…N。

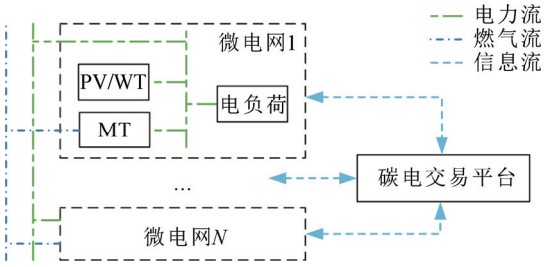


图 1　园区多微网 P2P 电−碳耦合交易市场架构

Fig.1　Multi-microgrid P2P electricity-carbon coupling trading market structure in the zone

$$\sum_i P^*_{\mathrm{b},i,t}=\sum_i P^*_{\mathrm{s},i,t} \tag{9}$$

$$\sum_i E^*_{\mathrm{b},i,t}=\sum_i E^*_{\mathrm{s},i,t} \tag{10}$$

式中：$P^*_{\mathrm{b},i,t}$ 和 $P^*_{\mathrm{s},i,t}$ 分别为微电网 i 在 P2P 市场上的最优购、售电量；$E^*_{\mathrm{b},i,t}$ 和 $E^*_{\mathrm{s},i,t}$ 分别为微电网 i 在 P2P 市场上的最优购、售碳配额量。本文中*上标代表该变量在其优化问题中的最优解。

根据式(5)—(6)，式(9)—(10)可以表示为：

$$\sum_i\left(P^*_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}-P^*_{\mathrm{D},i,t}+P^{\mathrm{DSO}*}_{\mathrm{b},i,t}-P^{\mathrm{DSO}*}_{\mathrm{s},i,t}\right)=0 \tag{11}$$

$$\sum_i\begin{pmatrix}E_{\mathrm{cap},i,t}+c_{\mathrm{e},t}\left(P^*_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}-P^*_{\mathrm{D},i,t}\right)-\\ c_{\mathrm{g},t}P^*_{\mathrm{MT},i,t}+E^{\mathrm{CO}*}_{\mathrm{b},i,t}-E^{\mathrm{CO}*}_{\mathrm{s},i,t}\end{pmatrix}=0 \tag{12}$$

2.3 市场均衡存在性证明

耦合市场中，多微网间本质上是非合作博弈关系。纳什均衡存在的条件为：1）博弈的参与者为 N 个有限的微网；2）燃气轮机出力和负荷量策略集是封闭的、有界的、凸的；3）所有参与者的收益在策略空间中都是连续的。参与者的收益在策略空间中的拟凹性证明如下：

电价和碳价是 $P_{\mathrm{MT},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{D},i,t}$ 的因变量。当 $P_{\mathrm{D},i,t}$ 增加，电价和碳价会增加以激励供给抑制需求，反之亦然，$P_{\mathrm{MT},i,t}$ 同理。当价格达到边界时，$P_{\mathrm{MT},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{D},i,t}$ 的变化仍会改变供求关系，但电价和碳价已没有调节空间。因此可得

$$\frac{\partial\pi_t}{\partial P_{\mathrm{D},i,t}}\ge 0,\frac{\partial\rho_t}{\partial P_{\mathrm{D},i,t}}\ge 0,\frac{\partial\pi_t}{\partial P_{\mathrm{MT},i,t}}\le 0,\frac{\partial\rho_t}{\partial P_{\mathrm{MT},i,t}}\le 0$$

$P_{\mathrm{MT},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{D},i,t}$ 与价格的变化关系呈线性，因此

$$\frac{\partial^2\pi_t}{\partial P^2_{\mathrm{D},i,t}}=0,\frac{\partial^2\pi_t}{\partial P^2_{\mathrm{MT},i,t}}=0,\frac{\partial^2\rho_t}{\partial P^2_{\mathrm{D},i,t}}=0,\frac{\partial^2\rho_t}{\partial P^2_{\mathrm{MT},i,t}}=0$$

所以有：

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 R_{\mathrm{total},i,t}}{\partial P^2_{\mathrm{D},i,t}}=&-2\beta_{i,t}-P_{\mathrm{D},i,t}\frac{\partial^2\pi_t}{\partial P^2_{\mathrm{D},i,t}}-2\frac{\partial\pi_t}{\partial P_{\mathrm{D},i,t}}-\\ &c_{\mathrm{e},t}P_{\mathrm{D},i,t}\frac{\partial^2\rho_t}{\partial P^2_{\mathrm{D},i,t}}-2c_{\mathrm{e},t}\frac{\partial\rho_t}{\partial P_{\mathrm{D},i,t}}<0\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 R_{\mathrm{total},i,t}}{\partial P^2_{\mathrm{MT},i,t}}=&-2a_i+P_{\mathrm{MT},i,t}\frac{\partial^2\pi_t}{\partial P^2_{\mathrm{MT},i,t}}+2\frac{\partial\pi_t}{\partial P_{\mathrm{MT},i,t}}+\\ &\left(c_{\mathrm{e},t}-c_{\mathrm{g},t}\right)P_{\mathrm{MT},i,t}\frac{\partial^2\rho_t}{\partial P^2_{\mathrm{MT},i,t}}+2\left(c_{\mathrm{e},t}-c_{\mathrm{g},t}\right)\frac{\partial\rho_t}{\partial P_{\mathrm{MT},i,t}}<0\end{aligned} \tag{14}$$

收益函数对 $P_{\mathrm{MT},i,t}$ 和 $P_{\mathrm{D},i,t}$ 的二阶偏导小于 0，参与者的收益在策略空间中是拟凹的，纳什均衡存在性得证。

3 耦合市场求解方法

3.1 分析求解方法

当未触碰电价和碳价限制的约束和用能范围约束、燃气轮机容量限制约束时，微网 i 运行调度结果如式(15)—(16)所示，具体的求解过程见附录 A。

$$P^*_{\mathrm{D},i,t}=\frac{\lambda_{i,t}-\pi_t-c_{\mathrm{e},t}\rho_t}{2\beta_{i,t}} \tag{15}$$

$$P^*_{\mathrm{MT},i,t}=\frac{\pi_t-b_i+\rho_t\left(c_{\mathrm{e},t}-c_{\mathrm{g}.t}\right)}{2a_i} \tag{16}$$

由于不存在微网与上级市场间的交易，$P^{\mathrm{DSO}}_{\mathrm{s},i,t}$、$P^{\mathrm{DSO}}_{\mathrm{b},i,t}$、$E^{\mathrm{CO}}_{\mathrm{s},i,t}$ 和 $E^{\mathrm{CO}}_{\mathrm{b},i,t}$ 为 0，式(11)—(12)可以改写为：

$$\sum_i\left(P^*_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}-P^*_{\mathrm{D},i,t}\right)=0 \tag{17}$$

$$\sum_i\left(E_{\mathrm{cap},i,t}+c_{\mathrm{e},t}\left(P^*_{\mathrm{MT},i,t}+P_{\mathrm{RES},i,t}-P^*_{\mathrm{D},i,t}\right)-c_{\mathrm{g},t}P^*_{\mathrm{MT},i,t}\right)=0 \tag{18}$$

将式(15)—(16)代入化简可得电价和碳价为：

$$\begin{aligned}\pi_t=&\left(c_{\mathrm{e},t}c_{\mathrm{g},t}\left(\sum_i\frac{b_i}{2a_i}\right)\left(\sum_i\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)-c_{\mathrm{g},t}c_t\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}\right)\right.\\ &\left.\left(\sum_i\frac{\lambda_{i,t}}{2\beta_{i,t}}\right)+c_{\mathrm{g},t}c_t\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}\right)\left(\sum_i P_{\mathrm{RES},i,t}\right)+\right.\\ &\left.\left(\left(\sum_i\frac{c_t}{2a_i}\right)+\left(\sum_i\frac{c_{\mathrm{e},t}}{2\beta_{i,t}}\right)\right)\left(\sum_i E_{\mathrm{cap},i,t}\right)\right)/\\ &\left(c^2_{\mathrm{g},t}\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}\right)\left(\sum_i\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)\right)\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}\rho_t=&\left(c_{\mathrm{g},t}\left(\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}\right)\left(\sum_i\frac{\lambda_{i,t}}{2\beta_{i,t}}\right)-\left(\sum_i\frac{b_i}{2a_i}\right)\left(\sum_i\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)\right)-\right.\\ &\left.\left(\sum_i E_{\mathrm{cap},i,t}\right)\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}+\sum_i\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)-\right.\\ &\left.c_{\mathrm{g},t}\left(\sum_i P_{\mathrm{RES},i,t}\right)\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}+\sum_i\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)\right)/\\ &\left(c^2_{\mathrm{g},t}\left(\sum_i\frac{1}{2a_i}\right)\left(\sum_i\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)\right)\end{aligned} \tag{20}$$

式中：$c_t=c_{\mathrm{e},t}-c_{\mathrm{g},t}$。

以碳价ρ为横坐标，电价π为纵坐标，可以画出 P2P 市场的电能平衡曲线和碳配额平衡曲线，如图 2 所示。电能平衡线上的点能够满足 P2P 市场的电能平衡约束，碳配额平衡线上的点能够满足 P2P 市场的碳配额平衡约束，其交点就是耦合市场的均衡点。

3.2 迭代求解方法

当触碰电价和碳价限制的约束和用能范围约

束、燃气轮机容量限制约束时，采用迭代的方法进行求解，求解步骤如下：

1）设置迭代次数 h=1，设置初始电价 π_t^h 和初始碳价 ρ_t^h。

2）各微网根据 π_t^h 和 ρ_t^h 求解其运行问题，确定电、碳的买卖身份和买卖电量和配额量。

3）根据式(21)—(22)更新交易电价和碳价。

4）如果满足式(23)，进入步骤 5)；否则，h=h+1，返回步骤 2)。

5）若园区内 P2P 交易的电量和碳配额量供大于求，则根据式(24)进行供需匹配；若园区内 P2P 交易的电量和碳配额量供小于求，则根据式(25)进行供需匹配。

$$\pi_t^{h+1}=\pi_t^h+\sigma_t\left(\sum_s P_{s,t}^*-\sum_b P_{b,t}^*\right) \tag{21}$$

$$\rho_t^{h+1}=\rho_t^h+\theta_t\left(\sum_s E_{s,t}^*-\sum_b E_{b,t}^*\right) \tag{22}$$

$$\begin{cases}\left|\pi_t^{h+1}-\pi_t^h\right|\le\varepsilon\\ \left|\rho_t^{h+1}-\rho_t^h\right|\le\varepsilon\end{cases} \tag{23}$$

$$\begin{cases}P_{s,b,t}^*=\left(P_{b,t}^*P_{s,t}^*\right)/\sum_s P_{s,t}^*\\ E_{s,b,t}^*=\left(E_{b,t}^*E_{s,t}^*\right)/\sum_s E_{s,t}^*\end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases}P_{b,s,t}^*=\left(P_{s,t}^*P_{b,t}^*\right)/\sum_b P_{b,t}^*\\ E_{b,s,t}^*=\left(E_{s,t}^*E_{b,t}^*\right)/\sum_b E_{b,t}^*\end{cases} \tag{25}$$

式中：σ_t 和 θ_t 分别为电价和碳价更新速度的调整参数；s 为卖家，b 为买家；$P_{s,t}^*$ 和 $E_{s,t}^*$ 为卖家 s 的售电量与售碳量；$P_{b,t}^*$ 和 $E_{b,t}^*$ 为买家 b 的购电量与购碳量；ε 为很小的正数；$P_{s,b,t}^*$ 和 $E_{s,b,t}^*$ 分别为卖家 s 销售给买家 b 的电量和碳配额量；$P_{b,s,t}^*$ 和 $E_{b,s,t}^*$ 分别为买家 b 向卖家 s 购买的电量和碳配额量。算法收敛性分析见附录 B。

4　算例分析

4.1　算例设置

将 P2P 碳电耦合市场在 33 微网园区内进行测试，其拓扑结构见图 3，调度周期为 24 h。各微网均配置燃气轮机，部分微网配置了分布式可再生能源发电，置信度为 75%。电网的边际碳排放因子 $c_{e,t}$ 见图 4，气网的边际碳排放因子 c_g 为 0.51 kg/kWh。DSO 销售电价和购电电价见图 5。上级碳市场售碳价格为 0.7 美分/kg，购碳价格为 0.35 美分/kg。

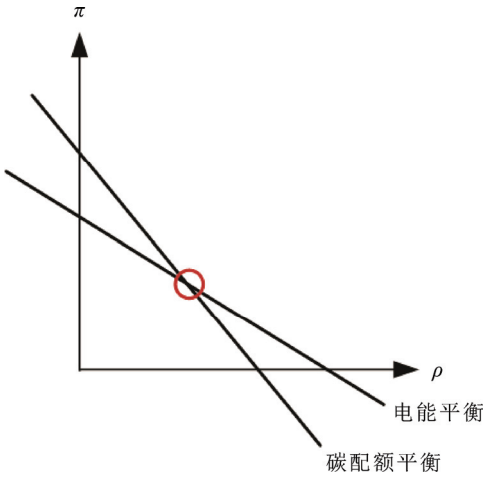


图 2　P2P 市场平衡曲线

Fig.2　P2P market equilibrium curve

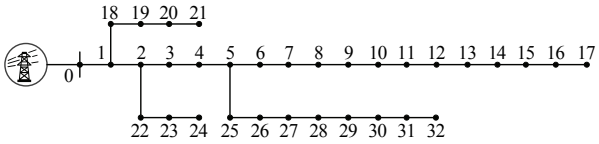


图 3　园区拓扑结构

Fig.3　Topology of the zone

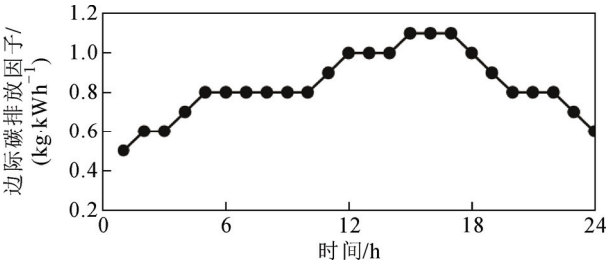


图 4　电网边际碳排放因子

Fig.4　Grid marginal carbon emission factor

4.2　P2P 交易结果对比分析

设置如下场景进行对比分析：

场景 1：不考虑 P2P 交易，碳电都只能与 DSO、上级碳市场进行交易。

场景 2：同时考虑 P2P 电能交易和碳交易。

1）展示场景 2 即耦合市场的交易情况，以微网 3、15、22 和 31 为例展示电能和碳配额交易情况。

P2P 交易价格在上级市场的销售价格和购买价格之间波动，如图 5 和图 6 所示。图 7 和图 8 展示了微网电能和碳配额供需平衡的运行结果。其中，微网 3 中的分布式可再生能源为风机，微网 22 未配置分布式可再生能源，其他 2 个微网的分布式可再生能源为光伏。夜间风机出力较大，微网 3 为卖家，

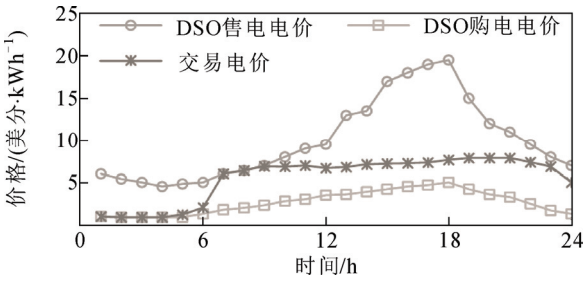


图 5 耦合市场电价

Fig.5 Electricity price of coupled market

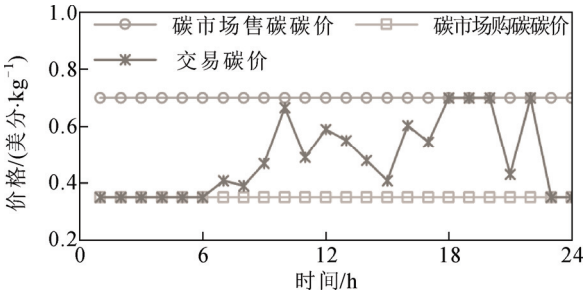


图 6 耦合市场碳价

Fig.6 Carbon price of coupled market

将电能和碳配额卖给功率和碳配额缺额的微网，还有剩余时卖给上级市场；日间光伏出力较大，微网 15 和 31 为卖方进行电−碳耦合交易。

结合 P2P 交易价格和微网电能和碳配额供需平衡的运行结果可知，当 P2P 交易价格位于价格限制最大值处时，园区需要依赖外部供给电能或碳配额，当 P2P 交易价格位于价格限制最小值处时，园区会将剩余电能或碳配额向外供给，当 P2P 交易价格位于价格限制之间时，多微网的 P2P 交易使得园区内部自给自足，价格的波动反映了不同时刻的供求关系。

2）对比 2 种场景下园区总收益和系统碳排放。具体对表 1 和图 9 的结果进行分析，由于避免了上级市场低价买入高价售出的套利行为，P2P 交易能够增加园区内微网收益。P2P 交易在 1—5 时段内增加了碳排放，在 7—17 时段内显著降低了碳排放，这是由于晚间风机出力较大，负荷需求较小，从而 P2P 交易价格降低，因此负荷增加，其产生的虚拟碳排放增加；而在日间，负荷需求增加，若无 P2P 交易，各微网只能利用自身燃气轮机发电或向上级购电来满足负荷需求，碳排放较高，进行 P2P 交易后，微网可使用其他微网多余的光伏进行供能，碳排放显著降低。根据表 1 可知，耦合市场的 P2P 交易在提升经济效益的同时能够降低系统碳排放。

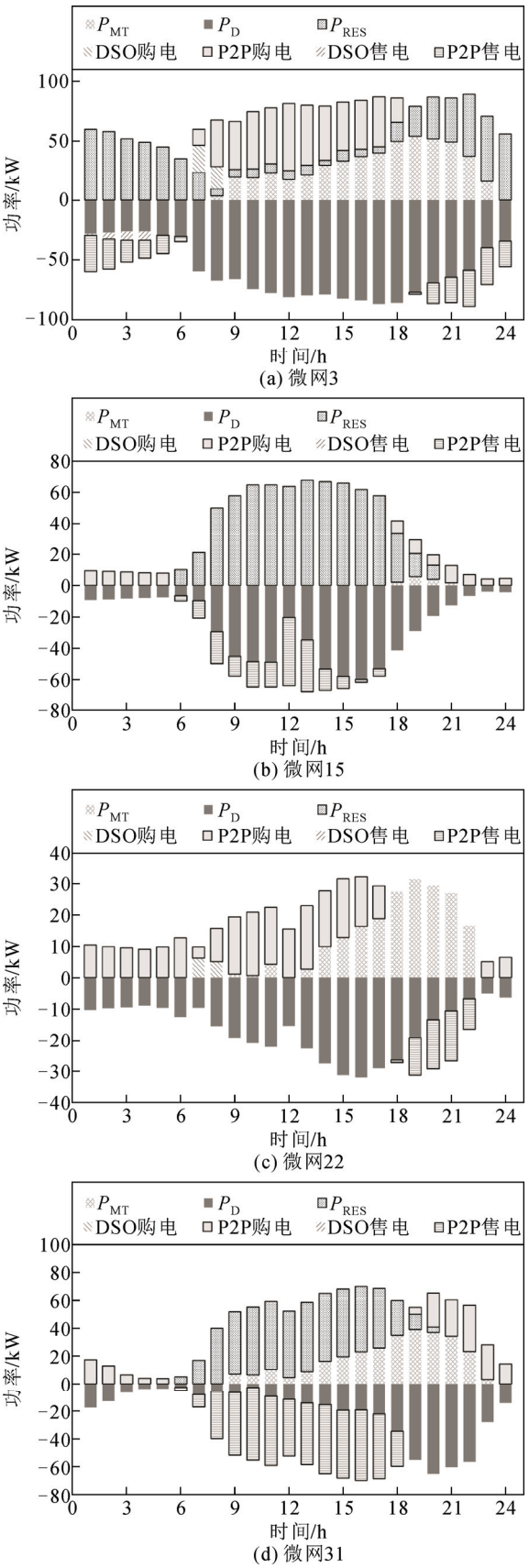


图 7 微网电能交易平衡结果

Fig.7 Microgrid electricity transaction balance

4.3 碳电交易结果对比

再设置如下场景对比分析 P2P 碳交易的效果：

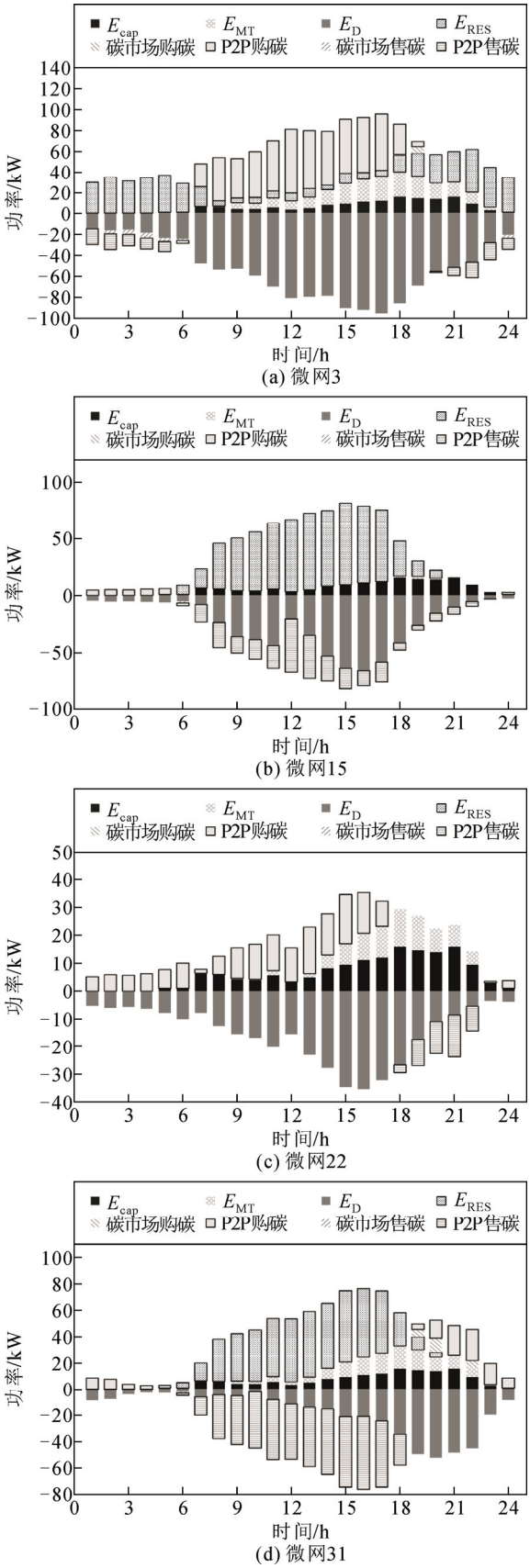


图 8　微网碳交易平衡结果

Fig.8　Microgrid carbon transaction balance

场景 3：同时考虑 P2P 电能交易和碳交易，初始分配碳配额设置为场景 2 的 50%。

表 1　园区总收益和系统碳排放情况对比

Table 1　Comparison of total income and system carbon emission of the zone

场景	园区 24 h 总收益/元	园区碳排放情况/kg
1	17 641.35	28 852.15
2	19 317.43	26 968.95

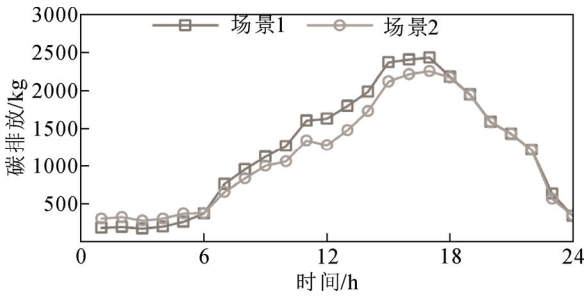


图 9　系统碳排放对比

Fig.9　Comparison of system carbon emission

场景 4：只考虑 P2P 电能交易。

对比 2—4 场景下的园区总收益和系统碳排放如表 2 所示。

结合表 2 可以看出，耦合 P2P 碳交易后虽然牺牲了一定的经济性，但是能够进一步降低园区的碳排放。随着初始碳配额的降低，碳交易对系统碳排放降低的激励作用更为显著。

4.4　不确定性对交易结果的影响

图 10 展示了不同的分布式可再生能源的置信度对 P2P 交易电价和碳价的影响。随着置信度的增加，微网行为趋于保守，市场风险降低，从而参与 P2P 交易的分布式可再生能源出力降低，导致电−碳耦合市场供应紧张，电价碳价呈现上升趋势。

4.5　迭代求解收敛性分析

选取场景 2 下的 9 h 和 18 h，分析迭代求解收敛性。9 h 时，P2P 电−碳交易均未达到价格边界；18 h 时，电价未达到价格边界，碳价处于价格上限处。2 种场景下分布式算法都可收敛。

5　结论

本文针对园区市场运营模式未充分考虑低碳因素的问题，设计了园区多微网间的端对端能量交易与碳交易的耦合市场，得到如下结论：

1）P2P 能量交易本身具有减碳优势，将碳交易耦合到能量交易中，能进一步挖掘用户侧减排潜力，激励低碳的能源利用方式，降低用户侧碳排放，为“双碳”目标的实现提供了有效途径。

表 2 园区总收益和系统碳排放情况对比

Table 2 Comparison of total income and system carbon emission of the zone

场景	园区 24 h 总收益/元	园区碳排放情况/kg
2	19 317.43	26 968.95
3	19 199.73	26 859.95
4	19 329.74	27 378.86

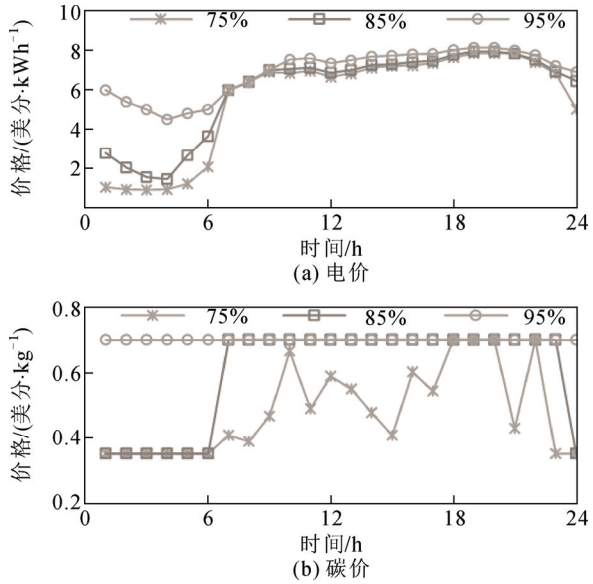


图 10 不同置信度下的 P2P 交易电价和碳价

Fig.10 Electricity and carbon price of coupled market under different confidence levels

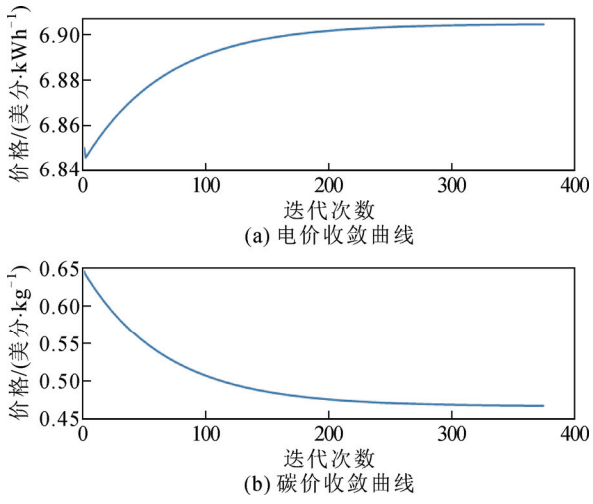


图 11 迭代求解算法的价格收敛曲线(9 h)

Fig.11 Price convergence curve of distributed algorithm (9 h)

2）在 P2P 市场中，微网根据园区内电能和碳配额的供求状态改变自己的购售角色，能够进一步激发市场活力和灵活性；实时变化的 P2P 交易碳价

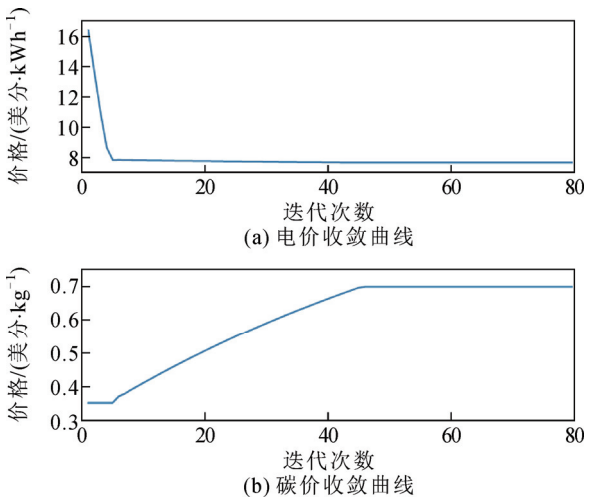


图 12 迭代求解算法的价格收敛曲线(18 h)

Fig.12 Price convergence curve of distributed algorithm (18 h)

电价在反应园区当前供求状态的同时，更能体现出碳交易应用于用户侧的市场优势。

3）微网低碳贡献度量方法能够将多微网的收益从能耗较高的微网向分布式可再生能源配置容量较高的微网转移，为未来的低碳规划提供交易运行基础。

4）与分析方法相比，迭代求解方法不需要各微网内部的参数信息，保护了用户隐私。

在后续的研究中，首先，将会引入储能等元素参与 P2P 交易，分析储能等非线性时段耦合元件对市场交易的影响；其次，将运用机会约束、条件风险价值(conditional value at risk，CVaR)等方法进一步分析不确定性所带来的市场风险；最后，将在市场架构中考虑综合能源利用形式，对多能源−碳耦合市场展开研究。

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

参考文献 References

[1] 乔学博，杨志祥，李 勇，等. 计及两级碳交易和需求响应的多微网合作运行优化策略[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2573-2583.
QIAO Xuebo, YANG Zhixiang, LI Yong, et al. Optimization strategy for cooperative operation of multi-microgrids considering two-level carbon trading and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2573-2583.

[2] 李笑竹，陈来军，殷 骏，等. 面向低碳供能的多园区共享氢储能系统容量规划[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2534-2544.
LI Xiaozhu, CHEN Laijun, YIN Jun, et al. Capacity planning of multiple parks shared hydrogen energy storage system for low-carbon energy supply[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2534-2544.

[3] DYNGE M F, DEL GRANADO P, HASHEMIPOUR N, et al. Impact

of local electricity markets and peer-to-peer trading on low-voltage grid operations[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117404.

[4] WEI C, SHEN Z Z, XIAO D L, et al. An optimal scheduling strategy for peer-to-peer trading in interconnected microgrids based on RO and Nash bargaining[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117024.

[5] LYU C, JIA Y W, XU Z. Fully decentralized peer-to-peer energy sharing framework for smart buildings with local battery system and aggregated electric vehicles[J]. Applied Energy, 2021, 299: 117243.

[6] 吴界辰，艾　欣，胡俊杰，等. 面向智能园区多产消者能量管理的对等模型(P2P)建模与优化运行[J]. 电网技术，2020，44(1)：52-60.
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Peer-to-peer modeling and optimal operation for prosumer energy management in intelligent community[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 52-60.

[7] ZHOU Y, WU J Z, LONG C. Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework[J]. Applied Energy, 2018, 222: 993-1022.

[8] 黄弦超，封　钰，丁肇豪. 多微网多时间尺度交易机制设计和交易策略优化[J]. 电力系统自动化，2020，44(24)：77-88.
HUANG Xianchao, FENG Yu, DING Zhaohao. Design of multi-time scale trading mechanism and trading strategy optimization for multiple microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 77-88.

[9] CINTUGLU M H, MARTIN H, MOHAMMED O A. Real-time implementation of multiagent-based game theory reverse auction model for microgrid market operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 1064-1072.

[10] WANG Z B, YU X D, MU Y F, et al. A distributed peer-to-peer energy transaction method for diversified prosumers in Urban Community Microgrid System[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114327.

[11] 高红均，张　凡，刘俊勇，等. 考虑多产消者差异化特征的社区微网系统 P2P 交易机制设计[J]. 中国电机工程学报，2022，42(4)：1455-1469.
GAO Hongjun, ZHANG Fan, LIU Junyong, et al. Design of P2P transaction mechanism considering differentiation characteristics of multiple prosumers in community microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1455-1469.

[12] PAUDEL A, CHAUDHARI K, CHAO Long, et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6087-6097.

[13] GE S Y, LI J F, HE X T, et al. Joint energy market design for local integrated energy system service procurement considering demand flexibility[J]. Applied Energy, 2021, 297: 117060.

[14] HUANG Y J, WANG Y D, LIU N. Low-carbon economic dispatch and energy sharing method of multiple integrated energy systems from the perspective of system of systems[J]. Energy, 2022, 244: 122717.

[15] MARTELLI E, FRESCHINI M, ZATTI M. Optimization of renewable energy subsidy and carbon tax for multi energy systems using bilevel programming[J]. Applied Energy, 2020, 267: 115089.

[16] HUA W Q, JIANG J, SUN H J, et al. Consumer-centric decarbonization framework using Stackelberg game and Blockchain[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118384.

[17] YAN M Y, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Blockchain for transacting energy and carbon allowance in networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4702-4714.

[18] YANG L F, LUO J Y, XU Y, et al. A distributed dual consensus ADMM based on partition for DC-DOPF with carbon emission trading[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 1858-1872.

[19] HUA W Q, JIANG J, SUN H J, et al. A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets[J]. Applied Energy, 2020, 279: 115539.

[20] CHEN S, CONEJO A, WEI Z N. Conjectural-variations equilibria in electricity, natural-gas, and carbon-emission markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4161-4171.

[21] YAN M Y, SHAHIDEHPOUR M, PAASO A, et al. Distribution network-constrained optimization of Peer-to-Peer transactive energy trading among multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1033-1047.

[22] 贾宏杰，王梓博，余晓丹，等. 城市园区微网系统端对端能量交易技术研究现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2453-2468.
JIA Hongjie, WANG Zibo, YU Xiaodan, et al. State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading technology in urban community microgrid system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2453-2468.



葛少云
1964—，男，博士，教授，博导
主要从事城市电力系统规划、电力系统的优化运行与控制、电力市场方面的研究工作
E-mail: syge@tju.edu.cn

GE Shaoyun
Ph.D., Professor



刘　洪(通信作者)
1979—，男，博士，教授，博导
主要从事配电系统仿真分析与规划运行、分布式能源/储能的接入模式与优化配置、电动汽车充换电设施规划与有序充电策略、区域/用户侧综合能源系统仿真分析与规划运行方面的研究工作
E-mail: liuhong@tju.edu.cn

LIU Hong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-06-13　网络出版日期　2022-10-20　　编辑　冉沐晨

附录 A

微网 i 运行调度模型可简化为：

$$\max\left(R_{\text{total},i,t}\right)=U_{i,t}\left(P_{\text{D},i,t}\right)+\pi_t P_{i,t}-C_{i,t}\left(P_{\text{MT},i,t}\right)+\rho_t E_{i,t} \tag{A1}$$

$$P_{\text{D},i,t}+P_{i,t}=P_{\text{MT},i,t}+P_{\text{RES},i,t} \tag{A2}$$

$$E_{i,t}=E_{cap,i,t}+c_{\text{e},t}\left(P_{\text{MT},i,t}+P_{\text{RES},i,t}-P_{\text{D},i,t}\right)-c_{\text{g},t}P_{\text{MT},i,t} \tag{A3}$$

式中：$P_{i,t}$ 和 $E_{i,t}$ 表示微网的购售电量和碳配额量，当 $P_{i,t}$ 和 $E_{i,t}$ 大于 0 时，代表微网向外销售电能和碳配额，当 $P_{i,t}$ 和 $E_{i,t}$ 小于 0 时，代表微网购买电能和碳配额。因此，简化后的微网 i 运行调度模型为一个无约束优化问题，且目标函数是严格凸函数，可用目标函数对决策变量的一阶偏导为 0 求得决策变量的最优解，即微网 i 的运行调度结果。

附录 B

迭代求解方法收敛性的证明可以根据 3.1 节的分析求解方法的原理给出：

（1）在 3.1 的假设下，P2P 市场平衡曲线如原文中图 2 所示。迭代求解的价格收敛过程能够在图 2 中表示，初始碳价和电价可以是平面中的任意一点。在当前价格下，P2P 市场的电能和碳配额的供求关系可以计算得到，如图 B1 所示。电能或碳配额平衡曲线上的点代表该交易商品的供求平衡；曲线以上区域，该交易商品供小于求，该交易商品的价格应该降低以调节供求关系；曲线以下区域，该交易商品供大于于求，该交易商品的价格应该增加。供求关系在 P2P 耦合市场中对价格的影响如图 B-2 所示，当价格处于两条曲线上方某一点时，电能供小于求，电价应降低，碳配额供小于求，碳价也应降低，碳价和电价向交点方向变化。分析后可知，当价格处于平面上任意一点，即任意初始价格下，

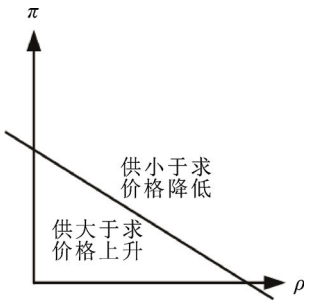


图 B1　供求关系分析图

Fig.B1　Supply and demand analysis

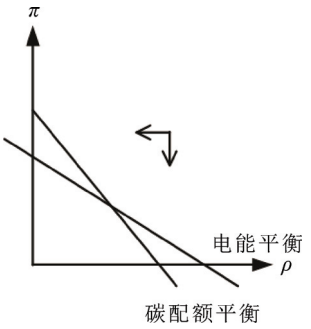


图 B2　P2P 市场供求关系分析

Fig.B2　Analysis of supply and demand in P2P Market

价格的变化都会向交点处收敛。

因此，只要保证电能平衡与碳平衡两条直线的相对位置，即可证明迭代求解方法的收敛性。

将式(18)-(19)代入式(20)-(21)后可得二元一次方程组：

$$\begin{cases}\displaystyle\sum_i\left(\frac{1}{2a_i}+\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)\pi_t+\sum_i\left(\frac{c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}}{2a_i}+\frac{c_{\text{e},t}}{2\beta_{i,t}}\right)\rho_t+\\ \displaystyle\sum_i\left(P_{\text{RES},i,t}\right)-\sum_i\left(\frac{b_i}{2a_i}+\frac{\lambda_{i,t}}{2\beta_{i,t}}\right)=0\\ \displaystyle\sum_i\left(\frac{c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}}{2a_i}+\frac{c_{\text{e},t}}{2\beta_{i,t}}\right)\pi_t+\sum_i\left(\frac{\left(c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}\right)^2}{2a_i}+\frac{c_{\text{e},t}^2}{2\beta_{i,t}}\right)\rho_t+\\ \displaystyle c_{\text{e},t}\sum_i\left(P_{\text{RES},i,t}\right)-\sum_i\left(\left(c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}\right)\frac{b_i}{2a_i}+c_{\text{e},t}\frac{\lambda_{i,t}}{2\beta_{i,t}}\right)+\\ \displaystyle\sum_i E_{\text{cap},i,t}=0\end{cases} \tag{B1}$$

只要斜率满足：

$$\frac{\displaystyle\sum_i\left(\frac{c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}}{2a_i}+\frac{c_{\text{e},t}}{2\beta_{i,t}}\right)}{\displaystyle\sum_i\left(\frac{1}{2a_i}+\frac{1}{2\beta_{i,t}}\right)}<\frac{\displaystyle\sum_i\left(\frac{\left(c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}\right)^2}{2a_i}+\frac{c_{\text{e},t}^2}{2\beta_{i,t}}\right)}{\displaystyle\sum_i\left(\frac{c_{\text{e},t}-c_{\text{g},t}}{2a_i}+\frac{c_{\text{e},t}}{2\beta_{i,t}}\right)} \tag{B2}$$

电能平衡与碳平衡两条直线的相对位置便如图 B2 所示，即可证明迭代求解方法的收敛性。

将式(B2)化简可得：

$$c_{\text{g},t}^2>0 \tag{B3}$$

由此，迭代求解方法的收敛性得证。

（2）当 3.1 节所假设的条件不满足时，分为以下两步分析迭代求解方法的收敛性.

①当考虑用户用能的范围约束和燃气轮机的容量限制时，最优解可写为：

$$P_{\mathrm{D},i,t}^{*}=\begin{cases}P_{D,i,t}^{\max} & \dfrac{\lambda_{i,t}-\pi_t-c_{\mathrm{e},t}\rho_t}{2\beta_{i,t}}>P_{D,i,t}^{\max}\\ \dfrac{\lambda_{i,t}-\pi_t-c_{\mathrm{e},t}\rho_t}{2\beta_{i,t}} & P_{\mathrm{D},i,t}^{\min}\le\dfrac{\lambda_{i,t}-\pi_t-c_{\mathrm{e},t}\rho_t}{2\beta_{i,t}}\le P_{D,i,t}^{\max}\\ P_{\mathrm{D},i,t}^{\min} & \dfrac{\lambda_{i,t}-\pi_t-c_{\mathrm{e},t}\rho_t}{2\beta_{i,t}}<P_{\mathrm{D},i,t}^{\min}\end{cases} \tag{B4}$$

$$P_{\mathrm{MT},i,t}^{*}=\begin{cases}P_{\mathrm{MT},i,t}^{\max} & \dfrac{\pi_t-b_i+\rho_t c_t}{2a_i}>P_{\mathrm{MT},i,t}^{\max}\\ \dfrac{\pi_t-b_i+\rho_t c_t}{2a_i} & 0\le\dfrac{\pi_t-b_i+\rho_t c_t}{2a_i}\le P_{\mathrm{MT},i,t}^{\max}\\ 0 & \dfrac{\pi_t-b_i+\rho_t c_t}{2a_i}<0\end{cases} \tag{B5}$$

上式的不等式约束将图 2 平面划分为多个区域，在不同的区域内，$P_{\mathrm{D},i,t}^{*}$ 和 $P_{\mathrm{MT},i,t}^{*}$ 不同，电能平衡曲线和碳配额平衡曲线不同。又由于 $P_{\mathrm{D},i,t}^{*}$ 和 $P_{\mathrm{MT},i,t}^{*}$ 是连续的，因此电能平衡曲线和碳配额平衡曲线是二维平面内的两条折线，如图 B3 所示。虚线表示不等式约束，实线表示 P2P 市场的电能平衡曲线和碳配额平衡曲线，两条折线的交点就是耦合市场的均衡点。

同样根据二元一次方程分析各区域内斜率，能够证明迭代求解方法的收敛性。

②当同时考虑式电价和碳价限制的约束和用户用能的范围约束和燃气轮机的容量限制时，由于可能存在微网与上级市场间的交易，需要在图 B3 的基础上加上价格约束即可分析市场均衡点，如图 B4 所示。红色虚线围成的矩形代表价格约束。

运用供求关系可以分析价格约束下市场如何均衡。电能平衡曲线和碳配额平衡曲线与价格约束的相对位置是不确定的，当曲线交点在价格限制内，如图 B4 所示。市场均衡点为两曲线的交点。曲线交点不在价格限制内，如图 B5 所示。电能和碳配额在初始价格下供小于求的，价格下降，可能会下降到几种不同的碳电价格处，如图中 A、B 点所示。当位于 A 点时，电能平衡，电价不变，碳配额供小于求，碳价下降，同时由于碳价下降，电能不再平衡，而是处于供大于求的区域，于是电价增加，直至达到图中均衡点；当位于 B 点时，碳价已达到最小值，碳价不变，电能供小于求，电价下降，直至达到图中均衡点.其他场景也可用类似的方法进行分析得到市场均衡点。此外，任意初始价格分析得到的市场均衡点都是一致的。

综上所述，迭代求解方法的收敛性得证。

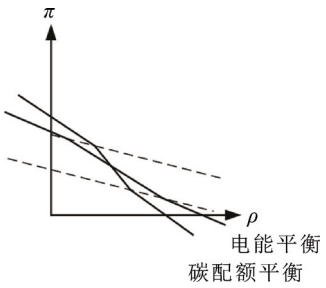


图 B3　P2P 市场平衡曲线

Fig.B3　P2P market equilibrium curve

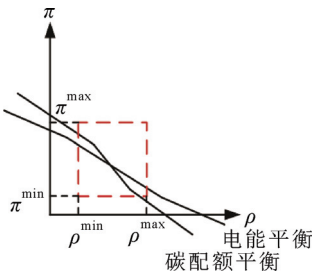


图 B4　价格约束下 P2P 市场平衡曲线

Fig.B4　P2P market equilibrium curve under price constraint

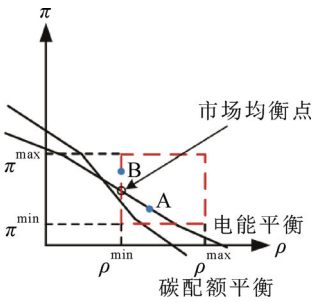


图 B5　曲线和价格限制有交点情况下收敛性分析

Fig.B5　Convergence analysis of curve and price limit with intersection