DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2026.06.001 文章编号:1009-1831(2026)06-0001-07 中图分类号:TM73

碳-绿证市场背景下基于广义纳什议价的多虚拟电厂点对点交易模型

明 昊,倪悦凡,高赐威
(东南大学 电气工程学院,南京 210096)

摘要:为探索碳-绿证-电多重市场耦合下含综合能源的多虚拟电厂(virtual power plant,VPP)点对点(peer-to-peer,P2P)交易模式,构建包括光伏、风电、电储能、热储能、燃气轮机、燃气锅炉、热电联产和用户负荷的多VPP聚合模型;基于合作博弈理论,构建广义纳什议价模型,实现多VPP联盟利益最大化;最后基于改进的交替方向乘子法分布式求解,建立非对称纳什议价模型对合作剩余利润进行分配,并通过算例验证所提模型在提升经济效益的同时有效削减VPP的CO_2排放。

关键词:碳-绿证市场耦合;多虚拟电厂;点对点交易;广义纳什议价

Generalized Nash bargaining based peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants under carbon-green certificate markets

MING Hao, NI Yuefan, GAO Ciwei
(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To investigate peer-to-peer (P2P) trading among multi-energy virtual power plants (VPPs) under the coupling of carbon, green-certificate, and electricity markets, an aggregated VPP model incorporating photovoltaics, wind turbines, electrical and thermal storage, gas turbines, gas boilers, combined heat-and-power units, and flexible loads is constructed. Based on cooperative game theory, a generalized Nash bargaining model is formulated to maximize the social welfare of the VPP coalition. An enhanced alternating-direction method of multipliers (ADMM) is then employed for distributed solution, and an asymmetric Nash bargaining model is established to allocate the cooperative surplus. Case studies verify that the proposed approach simultaneously improves economic benefits and effectively reduces VPP CO_2 emissions.

Key words: CET-GCT; multi-virtual power plants; P2P trading; generalized Nash bargaining

0 引言

在“双碳”目标背景下,电力行业是减少碳排放的重要着力点,着重发展清洁能源正在成为能源行业的共识[1]。同时,分布式能源发展也带来了问题:① 分布式能源自身具有较强的波动性与随机性[2];② 分布式能源各主体之间的信息难以及时交换,不易进行协调调度[3]。基于虚拟电厂(virtual power plant,VPP)先进的信息技术,可以实现分布式能源的“多源聚合、柔性调度、实时响应”,以及分布式资源协调优化与消纳[4]。同时,含综合能源的VPP在电力VPP基础上,把多能流全部纳入统一调度平台,可以实现“多能互补、梯级利用、柔性互济”,显著提升能源消纳水平、减少碳排和降低成本[5]。近年来,国家层面密集出台政策,推动VPP从示范探索走向规模化应用[2]:截至2025年底,全国已建成VPP项目470个,经测试的最大调节能力达1 685万kW,同比增长约70%,形成全球规模领先的VPP集群。这些项目涵盖工业、商业与居民多类场景,已参与需求响应、调峰辅助服务与现货市场等多类型交易。

目前针对单个VPP优化调度的相关研究已较为丰富,对于VPP优化调度的研究重点在于经济性最优[6-7]。随着全国碳排放权交易市场于2021年7月正式启动,并明确将发电行业率先纳入管控,以及2023年8月《国家发展改革委 财政部 国家能源局关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作、促进可再生能源电力消费的通知》(发改能源〔2023〕1044号)进一步健全绿证制度,碳-绿证两大市场已从“制度设计”阶段进入“落地运行”阶段。VPP既能内部聚合分布式新能源批量产出绿证,又能通过优化调度降低碳排配额,能够有效控制成本和实现碳减排。文献[8]基于碳交易成本模型,引

收稿日期:2026-06-25;修回日期:2026-08-24
基金项目:国家自然科学基金项目(52207081);国家自然科学基金项目(52577092)

入碳交易机制，通过“奖励低碳、惩罚高碳”的激励方式，降低VPP运行成本，并引导其优先消纳风电等可再生能源。文献[9]在基于市场价格建立碳-绿证协同交易模型的基础上，考虑了源-荷-市场的不确定性。但在上述VPP优化调度、VPP参与碳市场和绿证市场的研究中仅考虑了单一VPP的运行，没有考虑多VPP的协同优化。

然而，随着碳市场、绿证市场与电力市场的逐步耦合，单一VPP独立优化模式已难以应对多市场下的复杂博弈关系，亟须引入更具协同性的交易机制。分布式能源点对点交易（peer to peer，P2P）是分布式交易的直接形态，多VPP间的电能P2P交易能够实现VPP联盟的资源互补。交替方向乘子法（alternating direction method of multipliers，ADMM）广泛应用于求解电力P2P交易。文献[10-12]验证了多VPP间电能交易的可行性，提出了VPP合作联盟与配电网多主体协同优化模型，资源共享的同时兼顾了个体与联盟效益。

目前的国内外研究中，已经将博弈理论引入VPP参与市场交易模式中。VPP参与市场交易的模式可大致分为非合作博弈与合作博弈两类。非合作博弈中，各VPP以个体收益最大化为目标，基于价格信号或主从博弈参与市场交易。此类模式虽能体现市场主体的自主性，但在多市场耦合背景下暴露出明显劣势[8,12,13]：① 非合作博弈易导致“囚徒困境”式低效均衡，个体理性决策可能引发整体社会福利损失；② 难以有效内部化碳-绿证协同收益，VPP为争夺有限配额可能虚报成本或策略性抬价，进而削弱市场效率；③ 非合作框架下交易价格剧烈波动，增大了投资决策的不确定性。

相较之下，合作博弈通过构建联盟机制，允许VPP间共享资源与收益[11,14]，显著改善了非合作博弈的低效缺陷：① 通过联合优化实现联盟整体福利最大化，避免非合作均衡的低效性；② 引入Shapley值、纳什议价解等公平分配规则，可量化各VPP在碳-绿证协同中的贡献；③ 在碳-绿证-电多重市场耦合下，凭借绿证共享降低整体履约成本。合作生效的两个前提是成员资源互补（如一方富余绿证可抵消另一方碳配额）与可信的利益分配规则，否则联盟易解体。然而现有利益分配研究仍显不足：文献[13]在电-碳耦合框架中用改进加权Shapley值分摊效益，随着VPP数量增加，Shapley值所需遍历的联盟组合数呈指数级增长，导致计算资源耗尽，只能退而求其次，接受局部最优的近似分摊方案；文献[14]虽转向纳什议价模型，却仍局限于单一电能共享的利润划分。随着碳-绿证交易的深化，必须同时考量VPP在碳、绿证、电等多品种市场的多元贡献，方能实现真正合理的联盟收益分配。

针对上述问题，本文针对含综合能源的VPP，在碳-绿证市场背景下，基于广义纳什议价（generalized Nash bargaining，GNB）设计了一种多虚拟电厂点对点交易模型，对不同VPP考虑电、热两类能量流动进行议价能力量化与利益分配。模型与已有研究的区别如下：① 在P2P交易背景下的VPP聚合资源方面，已有研究主要是对输出电能机组的建模，少见热能机组，而本模型补足了这一点；② 在多VPP间P2P交易方面，基于目前的新能源强制配额制度背景，将碳-绿证交易加入P2P交易，采用改进的分布式ADMM算法对模型进行求解，比常规的ADMM算法求解速度更快；③ 针对现有文献在多能协同利益分配研究方面的不足，本文采用GNB计算多能VPP参与碳-绿证市场的议价因子，从而进行收益分配。通过算例分析验证了所提模型相对于独立运行成本的显著降低，促进了分布式能源消纳，同时减少了VPP在运行中的碳排。

1 考虑碳-绿证市场的多VPP电-碳P2P交易模型

分布式能源激增导致信息碎片化，亟须去中心化机制以提升选择自由度并强化隐私。P2P交易恰好契合这一需求，因此本文构建的多VPP间P2P交易模型，同步耦合了绿证与碳市场。我国现行电力市场可按年、季、月和日滚动结算，而碳配额仍以年度为单位一次性核定。为使碳-绿证交易与电力日前市场同步，本文将碳配额交易周期缩短至日，实现电-碳同频联动[15]。此外，本文提出的绿证-碳耦合模型属于前瞻性研究，假定未来政策允许绿证与碳配额通过折算系数相互转换，用于量化多市场协同潜力，不等同于现行制度。1张绿证对应1 MWh可再生能源上网电量，本文取折算系数0.1 tCO_2/张，即按绿证对应电量乘以区域电网平均二氧化碳排放因子折算可抵扣的碳配额量。

考虑碳-绿证市场的多VPP间P2P交易如图1所示。

1.1 多VPP多市场P2P交易机制

P2P交易框架由VPP、P2P交易信息中心以及碳-绿证监管部门组成。监管部门负责确保VPP履行碳配额义务和可再生能源消费义务。交易信息中心作为中央协调机构，通过组织和传递各VPP的电力及预期价格等信息，确保整个VPP系统的供需平衡。详见附录A、附录B。

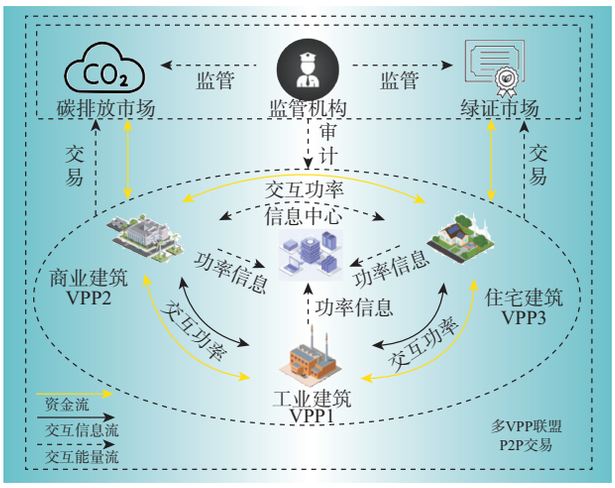


图1　多VPP间P2P交易

Fig. 1　P2P transactions among multiple VPPs

1.2　碳-绿证协同交易机制

在该机制下，VPP获得的绿证可抵消部分碳排放配额，具体的绿证交易（green certificate trading，GCT）-碳排放权交易（carbon emission trading，CET）协同交易成本如下

$$\begin{cases} C_{\mathrm{CET},i}=\eta_{\mathrm{CET},i}B_{\mathrm{CET},i} \\ C_{\mathrm{GCT},i}=\eta_{\mathrm{GCT},i}n_{\mathrm{g},i} \\ \eta_{\mathrm{GCT},i}=\eta_{\mathrm{GCT},i,0}+\beta n_{\mathrm{g},i} \\ n_{\mathrm{g},i}=\partial\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{L},i}^{t}-\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{WP},i}^{t}+P_{\mathrm{PV},i}^{t})/1\,000 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$C_{\mathrm{CET},i}$、$C_{\mathrm{GCT},i}$和$B_{\mathrm{CET},i}$分别为碳排交易成本、绿证交易成本和需购买的碳配额；$\eta_{\mathrm{CET},i}$、$\eta_{\mathrm{GCT},i}$和$\eta_{\mathrm{GCT},i,0}$分别为单位碳交易价格、单位绿证价格和绿证交易基准价格；$n_{\mathrm{g},i}$为需购买的绿证配额；∂为可再生能源配额系数。

公式(1)包含了VPP所需承担的绿证配额和碳配额的计算方法。同时，为了体现绿证价格受市场供求关系的影响，采用了古诺模型确定绿证的价格。详见附录C。

2　基于广义纳什议价的多VPP能量共享方法

2.1　广义纳什议价模型

假设VPP作为交易主体是独立且理性的，VPP间进行P2P交易时希望寻求一种VPP间收益相对平衡的交易策略，以实现多VPP联盟收益的最大化。据此，本文引入广义纳什议价机制，统一厘定VPP间能源价格与合作盈余分配。具体的GNB模型及约束条件如下

$$\begin{cases} \max\prod_{i=1}^{N}\left(C_i^0-C_i\right)^{w_i} \\ \text{s.t.}\ \ C_i^0\geqslant C_i,\ \text{式(1)—式(6)} \end{cases} \tag{2}$$

式中：C_i^0为议价破裂点对应的成本；C_i为每日运营成本。

在本文中，对于某一VPP，若其不参与P2P交易并独立与上层能源网络进行交易，此时，运行成本即构成纳什议价破裂点（简称议价破裂点）：若某VPP通过P2P交易无法比独立运行时减少成本，则其退出协商，该临界成本即为议价破裂点。单一VPP单独运行时，其成本模型C_i^0如下

$$\begin{cases} C_i^0=C_{\mathrm{op},i}+C_{\mathrm{net},i}+C_{\mathrm{CET},i}+C_{\mathrm{GCT},i} \\ C_{\mathrm{net},i}=\sum_{t=1}^{T}\begin{bmatrix} P_{\mathrm{e,net}}^{t}\max\left(P_{\mathrm{net,e},ij}^{t},0\right)+ \\ p_{\mathrm{h,net}}^{t}\max\left(P_{\mathrm{net,h},ij}^{t},0\right)+ \\ P_{\mathrm{e,min,net}}^{t}\min\left(P_{\mathrm{net,e},ij}^{t},0\right)+ \\ p_{\mathrm{h,min,net}}^{t}\min\left(P_{\mathrm{net,h},ij}^{t},0\right) \end{bmatrix} \\ \left|P_{\mathrm{net},ij}^{t}\right|\leqslant P_{\mathrm{P2P,max}},\ \left|H_{\mathrm{net},ij}^{t}\right|\leqslant H_{\mathrm{P2P,max}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$C_{\mathrm{net},i}$为与上级电网的交易成本；$P_{\mathrm{net},ij}^{t}$和$H_{\mathrm{net},ij}^{t}$为与上级电网交易功率；$P_{\mathrm{P2P,max}}$和$H_{\mathrm{P2P,max}}$为电、热能传输上限。

本文采用一种基于指数函数的映射方法来估算VPP在能源共享中的贡献值[14]。计算方法如下

$$\begin{cases} w_i=\frac{1}{2}\left(\exp(E_{\mathrm{sup},i}/\sum_{i=1}^{N}E_{\mathrm{sup},i})\right)+\exp\left(E_{\mathrm{rec},i}/\sum_{i=1}^{N}E_{\mathrm{sup},i}\right) \\ E_{\mathrm{sup},i}=\sum_{j=1,i\neq j}^{N}\sum_{t=1}^{T}\max\left(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t},0\right)+\max\left(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t},0\right) \\ E_{\mathrm{rec},i}=\sum_{j=1,i\neq j}^{N}\sum_{t=1}^{T}\min\left(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t},0\right)+\min\left(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t},0\right) \end{cases} \tag{4}$$

式中：w_i为议价能力；$E_{\mathrm{sup},i}$和$E_{\mathrm{rec},i}$分别为单个VPP所提供的能量与所接收的能量之和。

VPP运行成本涵盖碳-绿证费用、设备运行成本、P2P交易成本及网络传输成本，其中网损部分由购能方支付。VPP间进行P2P交易时，VPPi的总成本计算方法如下

$$\begin{cases} C_i=C_{\mathrm{op},i}+C_{\mathrm{P2P},i}+C_{\mathrm{CET},i}+C_{\mathrm{GCT},i}+C_{\mathrm{pass},i} \\ C_{\mathrm{P2P},i}=\sum_{t=1}^{T}p_{\mathrm{e},ij}^{t}(t)P_{\mathrm{P2P},ij}^{t}+p_{\mathrm{h},ij}^{t}H_{\mathrm{P2P},ij}^{t} \\ C_{\mathrm{pass},i}=\sum_{t=1}^{T}\eta_{\mathrm{e,pass}}\left|\min\left(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t},0\right)\right|+\eta_{\mathrm{h,pass}}\left|\min\left(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t},0\right)\right| \\ C_{\mathrm{op},i}=\sum_{t=1}^{T}\eta_{\mathrm{op}}(P_{\mathrm{GT},i}^{t}+P_{\mathrm{GB},i}^{t}+P_{\mathrm{CHP},i}^{t}+P_{\mathrm{ch},i}^{t}+P_{\mathrm{dis},i}^{t}+H_{\mathrm{ch},i}^{t}+H_{\mathrm{dis},i}^{t}) \end{cases} \tag{5}$$

式中：$C_{\mathrm{P2P},i}$和$C_{\mathrm{pass},i}$分别为P2P交易成本和网络传输成本。

为避免某一VPP对能源价格进行价格虚报，同时促使VPP优先进行P2P交易，VPP之间的交易价格应保证处于上级能源网络的购销价格区间内。因此，P2P交易时的能源交易价格应满足以下约束条件

$$\begin{cases} p^t_{\mathrm{e,min,net}} \leqslant p^t_{\mathrm{e},ij} \leqslant p^t_{\mathrm{e,net}} \\ p^t_{\mathrm{h,min,net}} \leqslant p^t_{\mathrm{h},ij} \leqslant p^t_{\mathrm{h,net}} \end{cases} \tag{6}$$

GNB具有非凸非线性的特点，难以求解[16]。需要通过ADMM算法将其近似转化为两个连续的凸优化问题，以降低计算复杂度。模型可转化为两个子问题：多VPP成本最小化子问题和利润分配问题。同时，为了便于求解将其转化为凸优化问题，转化结果如下

$$\begin{cases} \min -w_i \sum_{i=1}^{N} \ln(C_i^0 - C_{1,i}^* - C_{\mathrm{P2P},i}) \\ \min \sum_{i=1}^{N} C_{1,i} = \min \sum_{i=1}^{N} (C_{\mathrm{op},i} + C_{\mathrm{CET},i} + C_{\mathrm{GCT},i} + C_{\mathrm{pass},i}) \end{cases} \tag{7}$$

2.2 纳什议价模型求解

与单一能源P2P交易（如电能P2P交易）相比，多能P2P交易中待求解变量的维度更高、复杂性更大，这使传统ADMM算法需要更长时间才能收敛。因此，本研究采用热启动-自适应步长交替方向乘子法（warm-start adaptive step-size alternating direction method of multipliers，WAS-ADMM）[17]，结合了热启动和自适应步长迭代策略，以分散的方式解决这两个子问题。详见附录D。

（1）热启动：将对偶变量和惩罚因子设置为较小的值，以获得良好的迭代效果。在每次迭代中，将上一次迭代的参数更新结果作为输入。

（2）自适应步长迭代：传统ADMM算法大多采用固定惩罚因子，这会导致算法收敛速度非常缓慢。自适应步长迭代策略基于对偶残差和原始残差的数值变化趋势，动态调整惩罚因子的大小，从而加快最优解的逼近速度。在本文中，通过对数函数更新惩罚因子，并设置相应的约束条件来确定更新方法，具体如下

$$\rho_{1,k+1} = \begin{cases} \rho_{1,k} / \left[1 + \lg(d^k_{\mathrm{dual}} / d^k_{\mathrm{pri}})\right] & d^k_{\mathrm{dual}} \geqslant 10 d^k_{\mathrm{pri}} \\ \rho_{1,k} \left[1 + \lg(d^k_{\mathrm{pri}} / d^k_{\mathrm{dual}})\right] & d^k_{\mathrm{pri}} \geqslant 10 d^k_{\mathrm{dual}} \\ \rho_{1,k} & \text{其他} \end{cases} \tag{8}$$

式中：d^k_{dual}和d^k_{pri}分别为对偶残差和原始残差。

3 算例分析

3.1 算例设置

在本文中，根据图1所示的多VPP间P2P交易示意图，设置由工业VPP（VPP1）、商业VPP（VPP2）和住宅VPP（VPP3）组成的多VPP联盟P2P交易模型并进行算例验证。为了验证本文所提出模型的有效性，将所提出的P2P交易模型与以下4种方案进行比较：① VPP无法接入上层能源网络，二者不存在能源交互，同时不考虑碳-绿证交易；② 在方案1的基础上，考虑碳-绿证协同交易；③ VPP能够接入上层能源网络，并与之进行能源交互，即议价破裂点；④ 采用本文提出的交易方法。交易模型具体方案的比较见表1，燃气轮机、锅炉、热电联产运行参数以及每个VPP的风电光伏输出功率见文献[17]，热、电负荷曲线如附录图E-1、附录图E-2，热、电价设置见附录图E-3。对于WAS-ADMM算法，设置电能、热能初始对偶变量为0，收敛条件为小于10^{-2}。关于功率、负荷、热电价的设置以及收敛性的分析详见附录E。

3.2 碳-绿证市场交易分析

图2和图3分别展示了多种方案对比下的碳交易与绿证交易结果。图2中的较高的柱状图代表实际碳排放量，较低的柱状图代表需购买的碳配额，它们共用一个y轴。在图3中，折线（与次y轴相连）代表分布式能源的消费率，柱状图代表获得的绿色证书数量（与主y轴相连）。

表1 4种方案的比较

Table 1 Comparison of four schemes

方案	与配网交易	GCT-CET协同交易	P2P交易
方案1	×	×	×
方案2	×	√	×
方案3	√	√	×
方案4	√	√	√

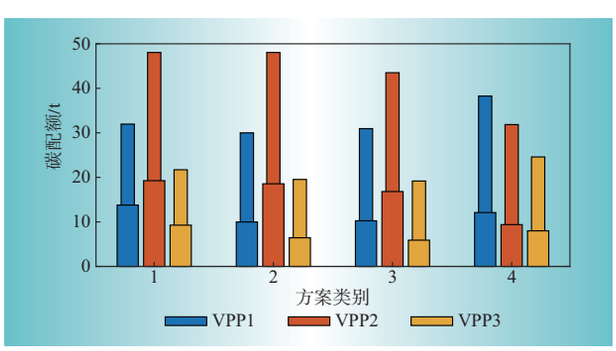


图2 碳排放交易比较分析

Fig. 2 Comparative analysis of CET

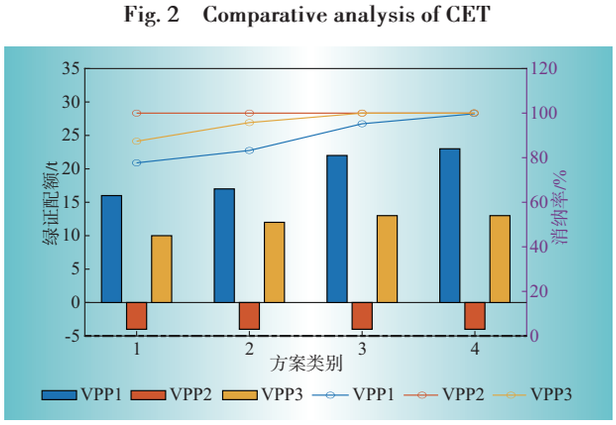


图3 绿证交易比较分析

Fig. 3 Comparative analysis of GCT

图2和图3为多VPP间碳-绿证市场交易分析。方案1至方案4的碳排放交易如图2所示。方案1和方案2的区别在于，相比于方案1，方案2具有碳-绿证交易激励。对比可以看出，在碳-绿证交易激励下，工业和住宅VPP的碳排放量分别减少了1.96 t和2.17 t。方案4中引入了P2P交易，尽管VPP联盟的实际碳排放量略高于没有引入P2P交易的方案3（约0.17 t），但每个VPP实际需要交易的碳配额更小，根据表2的计算结果，碳交易成本比方案3低1 451.61元。方案1至方案4的绿证交易如图3所示。相比于方案1，方案2下工业和住宅VPP的分布式能源消费率提高了7.61%和5.56%，绿色证书的数量分别增加了1和2。而对于商业VPP，因为能源需求高，分布式能源在4种方案下都能完全消纳。结合表2、图2和图3可以得出结论，对于不能完全消纳分布式能源的工业和住宅VPP，P2P交易能够有效挖掘系统中储能设备和需求响应的优化潜力，更多地消纳分布式能源以通过绿证抵消碳配额，并降低VPP参与碳-绿证市场的成本。经计算，与方案1和方案2相比，VPP联盟的实际碳排放量减少了3 t以上，VPP实现了分布式能源的完全消纳。上述分析表明，VPP间的P2P交易有利于低碳经济。在有效利用分布式能源的同时，它降低了整个系统的碳排放，并通过能源互动实现了碳排放的“虚拟”转移，降低了VPP联盟的碳成本。

3.3　P2P合作运营成本分析

表2为4种方案下的运营成本。方案3相比于方案2的区别在于接入了上级配网。可以看出，接入配网后VPP联盟的总成本降低了3 182.01元。接入配网为工业VPP和住宅VPP消纳分布式能源提供了新途径，同时也为商业VPP提供了新的供能渠道。然而，VPP在接入配网情况下的售电价格并不等于上级网络的电价。过低的售电价格使得VPP的利润空间远低于方案4中的P2P合作交易。根据公式(4)的计算，工业、住宅和商业VPP的议价能力分别为1.48、1.16和0.70，P2P交易下的收益分别增加了1 666.09元、1 165.23元和743.94元。VPP联盟的整体收益增加了3 575.27元，与VPP接入配网时相比，增长了3.96%。在多VPP间P2P交易中，每个VPP根据其能源贡献获得公平的收入分配。工业VPP作为大型能源供应者，分布式能源渗透率高且运营设备强大，通常作为卖方，向VPP联盟内的其他VPP供应能源。而住宅VPP能源需求较小，能够实现自给自足并分享剩余能源。商业VPP能源需求高但分布式能源渗透率较低，通常在VPP联盟内充当能源买方。

表2　不同方案下VPP运营成本结果

Table 2　Operation cost results of VPPs under different schemes

元

方案	VPP类型	碳交易	绿证交易	能量交易	总成本	VPP联盟成本
1	工业	3 364.23	−1 150.43		36 698.75	98 171.74
	住宅	2 599.26	−748.98		23 909.33	
	商业	5 481.82	327.53		37 513.66	
2	工业	2 260.34	−1 213.81		35 173.01	94 335.12
	住宅	1 390.26	−886.79		21 899.19	
	商业	5 231.08	327.53		37 262.92	
3	工业	2 386.96	−1 515.88	−2 022.30	33 085.68	91 152.43
	住宅	1 222.05	−954.19	154.94	21 165.12	
	商业	4 575.17	327.53	2 557.75	36 891.62	
4	工业	2 895.60	−1 573.31	−8 264.79	31 419.23	87 576.39
	住宅	1 734.35	−954.19	−5 664.73	20 000.64	
	商业	2 102.31	327.53	13 929.59	36 157.52	

3.4　P2P能源交易分析

图4为P2P电能交易结果。在08:00—18:00时段，住宅VPP负荷较低，分布式能源的输出较高，有富余电量参与P2P交易。在21:00—次日04:00时段，负荷增量变大，住宅VPP减少P2P电量。商业VPP的分布式能源渗透率较低，为了满足能源需求，通过P2P交易向工业和住宅VPP大量购电。因此当供电不足时，会出现从工业VPP购电的情况。图5为P2P热能交易结果。工业VPP的峰值热负荷几乎集中在08:00—17:00时段，因此该时段的热能要优先满足自身需求，与其他VPP进行热能交易时，交易量白天低、夜间高。对于商业VPP而言，由于该系统的总体碳排放量和热负荷较高，VPP的运行几乎都是依靠购买热能维持电能平衡。图6和图7分别为每个VPP的电能和热能交易价格。

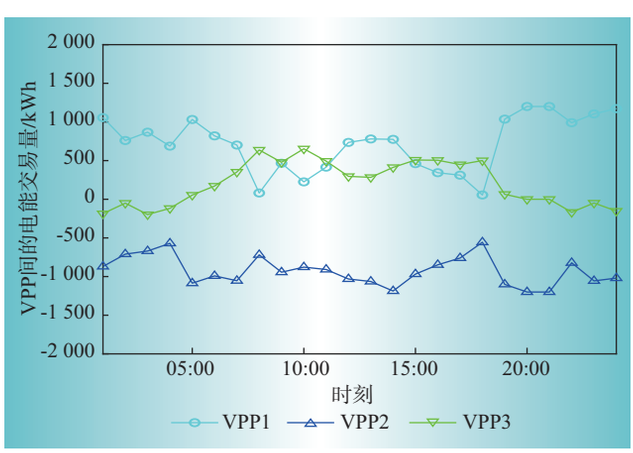


图4　P2P电能交易结果

Fig. 4　P2P electric energy trading results

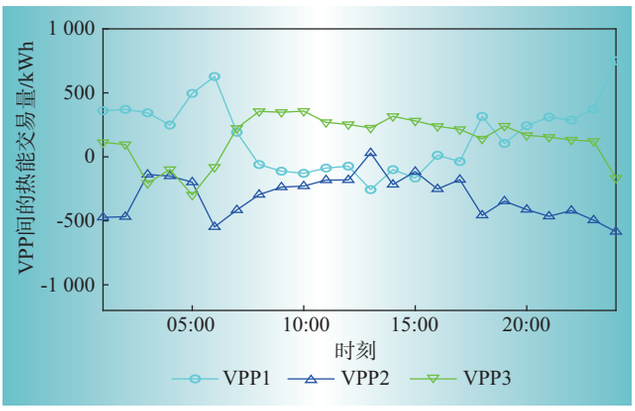


图5 P2P热能交易结果

Fig. 5 P2P heat energy trading results

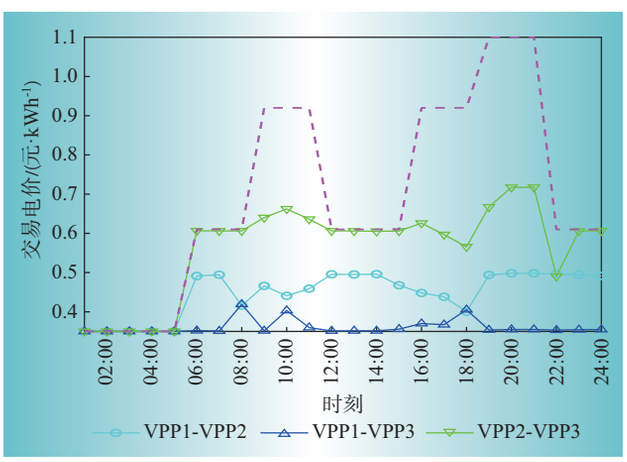


图6 P2P电能交易价格结果

Fig. 6 P2P electric energy trading price results

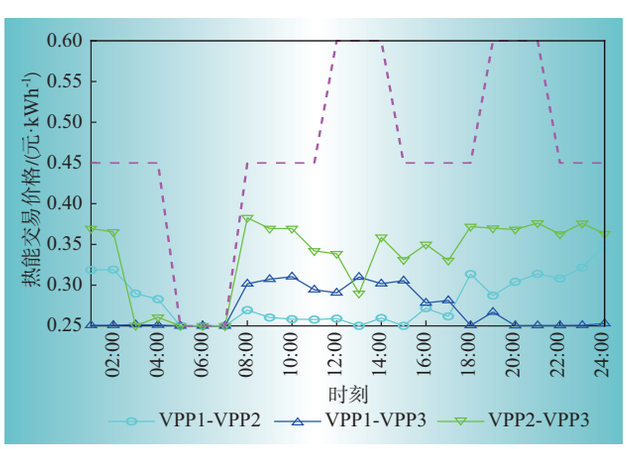


图7 P2P热能交易价格结果

Fig. 7 P2P heat energy trading price results

P2P能源交易后，任意时段的VPP间P2P交易价格均低于上级能源网销售价3%~15%，形成了套利，激励联盟优先在内部完成电量与热量交换。住宅VPP因光伏富余、热负荷低，供能成本最小但议价权重最高(0.25~0.40 元/kWh)，工业VPP因容量大、碳约束紧，被动接受较低出清价(0.25~0.30 元/kWh)。根据GNB的收益分配理论，交易价格不仅与每个时刻的能源交易量有关，而且收益的公平分配也是重要的影响因素之一。因此，住宅VPP的能源价格高于工业VPP，实现了“小主体高回报、大主体高销量”的公平分配。

4 结束语

针对碳-绿证市场背景下含综合能源VPP间P2P交易的问题，本文以差异化的VPP为研究对象，基于GNB理论构建了VPP间P2P交易模型，并通过算例分析得出以下结论：① 对于不能完全消纳分布式能源的VPP，P2P交易能够有效挖掘系统中储能设备和需求响应的优化潜力，更多地消纳分布式能源以通过绿证抵消碳配额，并降低VPP参与碳-绿证市场的成本。② 本文提出的P2P交易机制能够有效降低VPP的碳排放和运营成本，在提升分布式能源消纳率、降低碳排放和运营成本方面具有显著优势，同时通过基于能源贡献量的议价机制实现了联盟收益的公平分配，验证了合作博弈在多能VPP协同中的有效性。

附录见本刊网络版(http://dsm.ijournals.cn)。

参考文献：

[1] 陈胜，卫志农，顾伟，等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革：多能流协同技术[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：3-12.
Chen Sheng, Wei Zhinong, Gu Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12.

[2] 国家发展改革委，国家能源局. 关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见[EB/OL]. [2026-09-28].https://www.nea.gov.cn/20260701/52eef0c7dc2c43968e411487618aaf06/c.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions on accelerating the development of virtual power plants [EB/OL]. [2026-09-28]. https://www.nea.gov.cn/20260701/52eef0c7dc2c43968e411487618a af06/c.html.

[3] 朱瑛，郭健伟，周亦洲，等. 考虑碳-绿证市场耦合的多虚拟电厂电-碳P2P交易模型[J]. 电力自动化设备，2025，45(1)：51-58.
Zhu Ying, Guo Jianwei, Zhou Yizhou, et al. Electricity-carbon P2P trading model for multiple virtual power plants considering carbon-green certificate market coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 51-58.

[4] 刘吉臻，李明扬，房方，等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：5 103-5 111.
Liu Jizhen, Li Mingyang, Fang Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29)：5 103-5 111.

[5] 崔杨，孙喜斌，程丁然，等. 考虑“燃煤+”耦合发电与电-碳-氢-化工耦合的综合能源虚拟电厂随机低碳调度[J]. 电网技术，2025，49(6)：2 388-2 397.
Cui Yang, Sun Xibin, Cheng Dingran, et al. Stochastic low-carbon scheduling of integrated energy virtual power plant considering “coal-fired+” coupling power generation and the coupling of electricity-carbon-hydrogen-chemical[J]. Power System Technology, 2025, 49(6)：2 388-2 397.

[6] 易文飞，叶志刚. 考虑储能和条件风险价值的虚拟电厂优化调度[J]. 电力需求侧管理，2025，27(4)：86-91.
Yi Wenfei, Ye Zhigang. Optimal scheduling of virtual power plant based on energy storage and conditional value at risk[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(4)：86-91.

[7] 张大海，贠韫韵，王小君，等. 计及风光不确定性的新能源虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. 太阳能学报，2022，43(11)：529-537.
Zhang Dahai, Yun Yunyun, Wang Xiaojun, et al. Multi-time scale of new energy scheduling optimization for virtual power plant considering uncertainty of wind power and photovoltaic power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(11)：529-537.

[8] 王博闻，张博涵，鲁宇，等. 考虑碳交易的多虚拟电厂主从博弈协调策略[J]. 电力需求侧管理，2025，27(1)：80-87.
Wang Bowen, Zhang Bohan, Lu Yu, et al. Multi-virtual power plant master-slave game coordination strategy considering carbon trading[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(1)：80-87.

[9] 王愿，李彦斌，宋明浩，等. 计及多重不确定性和时间相关性的虚拟电厂参与碳-绿证协同交易优化调度[J]. 电网技术，2024，48(12)：4 938-4 947.
Wang Yuan, Li Yanbin, Song Minghao, et al. Optimal scheduling of virtual power plant participating in carbon-green certificates collaborative trading considering multiple uncertainties and time correlations[J]. Power System Technology, 2024, 48(12)：4 938-4 947.

[10] 李雪，张剑楠，王立峰，等. 计及P2P交易的多虚拟电厂机会约束优化调度模型[J]. 电力需求侧管理，2025，27(1)：14-20.
Li Xue, Zhang Jiannan, Wang Lifeng, et al. Chance constrained optimal scheduling model of multi-virtual power plants considering cooperation satisfaction[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(1)：14-20.

[11] 沈思辰，韩海腾，周亦洲，等. 基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用P2P交易模型[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：147-157.
Shen Sichen, Han Haiteng, Zhou Yizhou, et al. Electricity-carbon-reserve peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants based on conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18)：147-157.

[12] 钟荣豪，张亚超，朱蜀，等. 基于电-碳点对点交易的虚拟电厂联盟与配电网协同低碳运行策略研究[J]. 电网技术，2024，48(9)：3 554-3 563.
Zhong Ronghao, Zhang Yachao, Zhu Shu, et al. Research on collaborative low-carbon operation strategy of electricity-carbon peer-to-peer trading based virtual power plant union and power distribution network[J]. Power System Technology, 2024, 48(9)：3 554-3 563.

[13] 王佳惠，牛玉广，陈玥，等. 电-碳联合市场下虚拟电厂主从博弈优化调度[J]. 电力自动化设备，2023，43(5)：235-242.
Wang Jiahui, Niu Yuguang, Chen Yue, et al. Master-slave game optimal dispatching of virtual power plant under electricity-carbon joint market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5)：235-242.

[14] Yan X Y, Gao C W, Ming H, et al. Optimal scheduling strategy and benefit allocation of multiple virtual power plants based on general Nash bargaining theory[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 152：109 218.

[15] 庞腊成，吉斌，徐帆，等. 面向电-碳市场协同的负荷响应机制与效益分析初探[J]. 电力系统自动化，2022，46(22)：62-71.
Pang Lacheng, Ji Bin, Xu Fan, et al. Preliminary study on mechanism and benefit analysis of load response for electricity-carbon market collaboration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22)：62-71.

[16] Nash J F. The bargaining problem[J]. Econometrica, 1950, 18(2)：155-162.

[17] Meng Y, Ma G, Ye Y, et al. Design of P2P trading mechanism for multi-energy prosumers based on generalized Nash bargaining in GCT-CET market[J]. Applied Energy, 2024, 371：123 640.

（责任编辑　孙　晶　武壮壮）

附录A

该P2P交易框架由VPP、P2P交易信息中心以及碳-绿证监管部门组成。监管部门负责确保VPP履行碳配额义务和可再生能源消费义务。交易信息中心作为中央协调机构，通过组织和传递各VPP的电力及预期价格等信息，确保整个VPP系统的供需平衡。此外，信息中心还会提前向VPP传达热力和电力收费规则的安全约束以及热力和电力传输阈值。在交易过程中，信息中心仅提供信息支持，具体的交易决策由各VPP自行决定。由于VPP之间在地理位置、设备资源、负荷特性以及运行模式等方面存在差异，其P2P交易中涉及的博弈策略也有所不同。因此，多VPP系统中的VPP往往具有不同的特点。对于工业VPP，其负荷较大，对能源供应的可靠性要求较高。对于商业VPP，由于负荷量大，难以配备较高比例的可再生能源发电设备。对于住宅VPP，其主要特点是居民负荷，具有负荷需求响应的潜力。在此基础上，本文对3种典型的VPP——工业VPP、商业VPP和住宅VPP进行了差异化建模，以适应不同类型VPP参与点对点交易的方案。其中，3种典型的VPP类型包含资源设备：除了不同规模的燃气轮机、燃气锅炉和热电联产外，工业VPP还包括风力发电厂和光伏厂、电能存储和热能存储罐以及工业热电负荷；商业VPP包括大面积屋顶光伏和商业热电负荷；住宅VPP包括微型风力发电站和屋顶光伏以及可调节的居民热电负荷。具体的资源建模见附录B。

附录B

（1）燃气轮机、锅炉和热电联产模型

燃气轮机、锅炉和热电联产机组需要满足相应的功率与爬坡约束。以燃气轮机为例

$$\begin{cases} P_{\mathrm{GT},i,\min} \leqslant P_{\mathrm{GT},i} \leqslant P_{\mathrm{GT},i,\max} \\ \left| P^{t+1}_{\mathrm{GT},i} - P^{t}_{\mathrm{GT},i} \right| \leqslant \Delta P_{\mathrm{GT},i,\max} \end{cases} \tag{B-1}$$

式中：$P_{\mathrm{GT},i}$为燃气轮机输出功率；$P_{\mathrm{GT},i,\min}$、$P_{\mathrm{GT},i,\max}$分别为燃气轮机最小、最大输出功率；$\Delta P_{\mathrm{GT},i,\max}$为燃气轮机最大爬坡功率。

（2）光伏与风电模型

$$\begin{cases} 0 \leqslant P^{t}_{\mathrm{WT},i} \leqslant P^{t}_{\mathrm{WT},i,\max} \\ 0 \leqslant P^{t}_{\mathrm{PV},i} \leqslant P^{t}_{\mathrm{PV},i,\max} \end{cases} \tag{B-2}$$

式中：$P^{t}_{\mathrm{WT},i}$、$P^{t}_{\mathrm{PV},i}$分别为风机、光伏输出功率；$P^{t}_{\mathrm{WT},i,\max}$、$P^{t}_{\mathrm{PV},i,\max}$分别为风机、光伏最大输出功率。

（3）电、热储能模型

电、热储能模型主要包含能量约束、时间耦合约束、充放电约束等。以电储能为例

$$\begin{cases} Q^{t+1}_{i} = Q^{t}_{i} + \zeta_{\mathrm{ch}} P^{t}_{\mathrm{ch},i} - \dfrac{P^{t}_{\mathrm{dis},i}}{\zeta_{\mathrm{dis}}} \\ 0 \leqslant P^{t}_{\mathrm{ch},i} \leqslant P_{\mathrm{ch},i,\max} \quad 0 \leqslant P^{t}_{\mathrm{dis},i} \leqslant P_{\mathrm{dis},i,\max} \\ P^{t}_{\mathrm{ch},i} P^{t}_{\mathrm{dis},i} = 0 \\ Q_{i,\min} \leqslant Q^{t}_{i} \leqslant Q_{i,\max} \quad Q^{0}_{i} = Q^{24}_{i} \end{cases} \tag{B-3}$$

式中：$P^{t}_{\mathrm{ch},i}$、$P^{t}_{\mathrm{dis},i}$分别为电储能充放电功率；Q^{t}_{i}为电储能能量；$Q_{i,\min}$、$Q_{i,\max}$分别为电储能能量的下限、上限；ζ_{ch}、ζ_{dis}分别为电储能充电效率、放电效率。

（4）需求响应模型

$$\begin{cases} C_{\mathrm{IDR},i} = \sum_{t=1}^{T} \eta_{s,e} |P^{t}_{\mathrm{L},s,i}| + \eta_{s,h} |H^{t}_{\mathrm{L},s,i}| + \eta_{c,e} P^{t}_{\mathrm{L},c,i} + \eta_{c,h} H^{t}_{\mathrm{L},c,i} \\ \left| P^{t}_{\mathrm{L},s,i} \right| \leqslant \varphi_{s} P^{t}_{\mathrm{L},i} \quad \left| H^{t}_{\mathrm{L},s,i} \right| \leqslant \varphi_{s} H^{t}_{\mathrm{L},i} \\ 0 \leqslant P^{t}_{\mathrm{L},c,i} \leqslant \varphi_{c} P^{t}_{\mathrm{L},i} \quad 0 \leqslant H^{t}_{\mathrm{L},c,i} \leqslant \varphi_{c} H^{t}_{\mathrm{L},i} \\ \sum_{t=1}^{T} P^{t}_{\mathrm{L},s,i} = 0 \quad \sum_{t=1}^{T} H^{t}_{\mathrm{L},s,i}(t) = 0 \end{cases} \tag{B-4}$$

（5）功率平衡条件

$$\begin{cases} P^{t}_{\mathrm{GT},i} + \alpha P^{t}_{\mathrm{CHP},i} + P^{t}_{\mathrm{WP},i} + P^{t}_{\mathrm{PV},i} = P^{t}_{\mathrm{L},i} + P^{t}_{\mathrm{ch},i} - P^{t}_{\mathrm{dis},i} + \sum_{j=1,i\neq j}^{N} P^{t}_{\mathrm{P2P},ij} \\ P^{t}_{\mathrm{GB},i} + (1-\alpha) P^{t}_{\mathrm{CHP},i} = H^{t}_{\mathrm{L},i} + H^{t}_{\mathrm{ch},i} - H^{t}_{\mathrm{dis},i} + \sum_{j=1,i\neq j}^{N} H^{t}_{\mathrm{P2P},ij} \\ \left| P^{t}_{\mathrm{P2P},ij} \right| \leqslant P_{\mathrm{P2P,max}} \left| H^{t}_{\mathrm{P2P},ij} \right| \leqslant H_{\mathrm{P2P,max}} \end{cases} \tag{B-5}$$

式中：$P^{t}_{\mathrm{P2P},ij}$、$H^{t}_{\mathrm{P2P},ij}$分别为电、热P2P交互功率；$P_{\mathrm{P2P,max}}$、$H_{\mathrm{P2P,max}}$分别为电、热P2P交互功率的上限。

附录C

在本文中，采用逐步碳交易模型来定价碳配额。公式(C-1)给出了碳交易的区间定价方法、多VPP系统的实际碳排放量、免费碳配额以及绿证抵消碳配额的计算方法。具体设备碳排放及区间定价模型如下

$$\begin{cases} \eta_{\mathrm{CET},i} = \begin{cases} \sigma B_{\mathrm{CET},i}, B_{\mathrm{CET},i}, < l \\ \sigma l + \sigma(1+\gamma)\left(B_{\mathrm{CET},i} - l\right), \\ \quad l < B_{\mathrm{CET},i} < 2l \\ \sigma(2+\gamma) l + \sigma(1+2\gamma) \\ \left(B_{\mathrm{CET},i} - 2l\right), \\ \quad 2l < B_{\mathrm{CET},i} < 3l \\ \quad \cdots \end{cases} \\ B_{\mathrm{CET},i} = B_{\mathrm{st},i} - B_{\mathrm{g},i} - B_{\mathrm{GCT},i} \\ B_{\mathrm{GCT},i} = \mu \sum_{t=1}^{T} (P^{t}_{\mathrm{WP},i} + P^{t}_{\mathrm{PV},i}) / 1\,000 \\ B_{\mathrm{st},i} = \sum_{t=1}^{T} a_1 P^{t}_{\mathrm{GT},i} + a_2 P^{t}_{\mathrm{GB},i} + a_3 P^{t}_{\mathrm{CHP},i} \\ B_{\mathrm{g},i} = \sum_{t=1}^{T} b_1 P^{t}_{\mathrm{GT},i} + b_2 P^{t}_{\mathrm{GB},i} + b_3 P^{t}_{\mathrm{CHP},i} \end{cases} \tag{C-1}$$

式中：σ为碳配额的基准价格；l为价格区间；γ为增长百分比。

附录D

（1）多VPP成本最小化子问题

由于模型(2)包含能源交易的耦合变量，因此必须满足各VPP之间购售电能、热能功率相等。因此，有必要引入功率辅助变量$\left\{P_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k},H_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k}\right\}$，将它们解耦以构建增强型的拉格朗日函数。根据ADMM算法基本原理，在子问题1中，VPPi的增广拉格朗日函数L_1为

$$\min L_{1,i}=C_{1,i}+\sum_{j=1,i\neq j}^{N}\sum_{t=1}^{T}[\lambda_{\mathrm{e},ij,1}^{t,k}(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k}+P_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k})+\lambda_{\mathrm{h},ij,1}^{t,k}(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k}+H_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k})]+\frac{\rho_{1,k}}{2}\left\|P_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k}+P_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k}\right\|_2^2+\frac{\rho_{1,k}}{2}\left\|H_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k}+H_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k}\right\|_2^2 \tag{D-1}$$

式中：$\rho_{1,k}$为子问题1惩罚因子。

在求解过程中，对偶变量进行如下更新

$$\begin{cases}\lambda_{\mathrm{e},ij,1}^{t,k+1}=\lambda_{\mathrm{e},ij,1}^{t,k}+\rho_{1,k}\left(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k}+P_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k}\right)\\ \lambda_{\mathrm{h},ij,1}^{t,k+1}=\lambda_{\mathrm{h},ij,1}^{t,k}+\rho_{1,k}\left(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k}+H_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k}\right)\end{cases} \tag{D-2}$$

对偶残差和原始残差的更新由最大辅助变量差值的2–范数平方决定。WAS-ADMM算法的更新公式如下

$$\begin{cases}\left\|d_{\mathrm{dual}}^{k+1}\right\|_2^2=\max\left[\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}\left\|\rho_{1,k+1}(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k+1}-P_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k})\right\|_2^2,\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}\left\|\rho_{1,k+1}(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k+1}-H_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k})\right\|_2^2\right]\\ \left\|d_{\mathrm{prm}}^{k+1}\right\|_2^2=\max\left[\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k+1}+P_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k+1})_2^2,\sum\limits_{i=1,i\neq j}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}(H_{\mathrm{P2P},ij}^{t,k+1}+H_{\mathrm{P2P},ji}^{t,k+1})_2^2\right]\end{cases} \tag{D-3}$$

（2）利润分配子问题

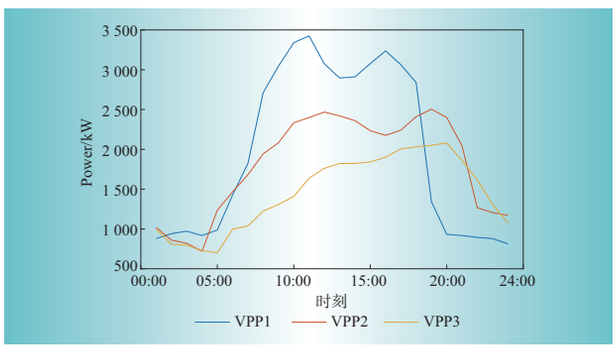
问题2与问题1类似，通过引入辅助变量$\left\{p_{\mathrm{e},ij}^{t},p_{\mathrm{h},ij}^{t}\right\}$来构建。在子问题2中，VPP$i$的增广拉格朗日函数$L2$为

$$\min L_{2,i}=-w_i\ln\left\{C_i^0-C_{1,i}^*-\sum_{j=1,i\neq j}^{N}\sum_{t=1}^{T}(p_{\mathrm{e},ij}^{t}P_{\mathrm{P2P},ij}^{*,\mathrm{t}}+p_{\mathrm{h},ij}^{t}H_{\mathrm{P2P},ij}^{*,\mathrm{t}})\right\}+\sum_{j=1,i\neq j}^{N}\sum_{t=1}^{T}\lambda_{\mathrm{e},ij,2}^{t,k}\left\{p_{\mathrm{e},ij}^{t}-p_{\mathrm{e},ji}^{t}\right\}+\lambda_{\mathrm{h},ij,2}^{t,k}\left\{p_{\mathrm{h},ij}^{t}-p_{\mathrm{h},ji}^{t}\right\}+\frac{\rho_{2,k}}{2}\left\|p_{\mathrm{e},ij}^{t}-p_{\mathrm{e},ji}^{t}\right\|_2^2+\frac{\rho_{2,k}}{2}\left\|p_{\mathrm{h},ij}^{t}-p_{\mathrm{h},ji}^{t}\right\|_2^2 \tag{D-4}$$

将子问题1的最优解$C_{1,i}^*$以及变量集$\left\{P_{\mathrm{P2P},ij}^{*,\mathrm{t}},H_{\mathrm{P2P},ij}^{*,\mathrm{t}}\right\}$代入子问题2中，进行子问题2的求解。由于子问题2仅包含P2P交易成本博弈，模型相对简单，因此采用传统的ADMM算法来求解。

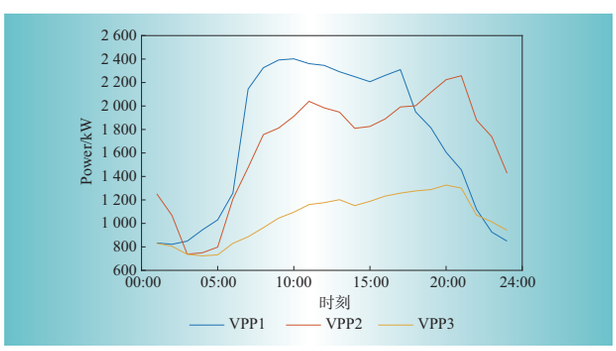
根据上述计算，初始问题(2)的最优解被分解为两个子问题的顺序最优解，这两个子问题分别是多VPP成本最小化和纳什议价收益最大化。ADMM算法能有效求解凸优化问题，因此，利用该算法求解两个子问题，具体步骤不再赘述，参见文献[14]。

附录E



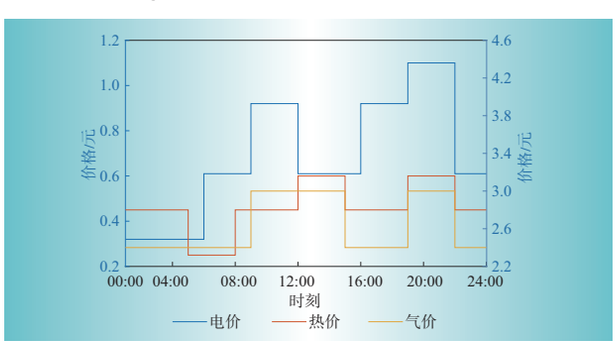
图E-1　VPP电力负荷曲线

Fig. E-1　Electric load curves of VPPs



图E-2　VPP热负荷曲线

Fig. E-2　Heat load curves of VPPs



图E-3　热、电价

Fig. E-3　Heat and electricity price

本文用WAS-ADMM分布式算法求解多VPP成本最小化子问题。当使用WAS-ADMM分布式算法求解子问题1时，在第108次迭代后，每个VPP均满足收敛条件，耗时565 s。工业VPP、住宅VPP和商业VPP的目标值分别收敛至39 684.02元、25 665.37元和22 227.93元。传统ADMM算法在求解子问题1时，在迭代198次后满足收敛条件，耗时1 333 s，3个值分别收敛至39 684.02元、25 665.37元和22 227.93元。尽管两者在收敛精度上误差仅为0.15%，但是传统ADMM算法收敛速度却是WAS-ADMM算法的两倍。因此WAS-ADMM能够更快地接近目标值，减少算法收敛时间和运算次数，与传统的ADMM算法相比，收敛速度有了显著提高。