# 基于集中-分散交易机制的多产消者两阶段鲁棒优化模型

王善磊[1],孙国强[1],吴 晨[1,2],胡国伟[2],周亦洲[1],陈 胜[1],卫志农[1]
(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院,江苏 南京 210008)

**摘要:**针对产消者参与电力市场交易过程中的不确定性,提出一种多产消者两阶段鲁棒集中-分散交易模型。考虑产消者之间可进行点对点分散交易,建立多产消者集中-分散市场交易模型;考虑光伏出力不确定性对交易策略的影响,构建多产消者两阶段鲁棒市场交易模型;采用Nash谈判法实现多产消者合作剩余的公平分配。仿真算例验证了所建模型的有效性。

**关键词:**产消者;集中-分散交易;Nash谈判;两阶段鲁棒优化;点对点交易
**中图分类号:**TM 73 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202202008

## 0 引言

随着分布式能源技术的快速发展以及电力体制改革的稳步推进,兼具电能生产与消费能力的产消者在配电网中的数量逐渐增多,并且开始作为新兴的市场主体参与用户侧市场化交易。产消者一般是由用户侧分布式光伏PV(PhotoVoltaic)、电动汽车EV(Electric Vehicle)、中央空调系统CACS(Central Air-Conditioning System)等资源整合而成的聚合体[1],具有源荷双重属性,其显著特点是电力与信息高度融合交互,且对价值信号高度敏感。

2017年11月,国家发展改革委、国家能源局发布了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》,为用户侧市场化交易的开展提供了政策支撑。然而,以产消者为代表的用户侧独立主体在参与市场交易时不可避免地面临以下问题:受到自身容量限制,产消者单独参与电力现货市场交易缺乏市场竞争力;产消者多位于系统末端,电网对其不可观,因此难以被准确地调控[2]。在此背景下,地域上相邻的各产消者可组成多产消者联盟,通过彼此间及与市场运营商MO(Market Operator)的协调进一步提高自身用电经济性与供电可靠性,实现多种能源的优势互补与梯级利用。

目前,国内外学者在产消者的能量管理与市场化交易方面已取得了较多的研究成果。文献[3-4]采用兼顾控制与经济手段的交互能源机制对大规模产消者群进行优化调度。文献[5]研究在集中交易模式下产消者的需求响应机制,在满足用户舒适度的前提下对建筑能耗进行系统优化。文献[6]提出一种在分时电价TOU(Time Of Use)场景下的产消者日前竞标模型,通过"源-荷-储"的协同调度优化产消者的集中交易电量。文献[7]设计适用于大量产消者参与的合作模型收益分配方案。

然而,文献[3-7]仅考虑产消者与外部电网的单一交互关系,各主体仅与上级MO存在能量交互,没有很好地利用各主体的互补特性,在整体资源的最优利用方面存在欠缺。实际上,由于多个产消者的用电行为以及用电模式具有良好的互补特性以及交互关系,因此对产消者交易策略的研究不应局限于产消者与上级MO之间,还应逐渐向产消者之间的协调发展。文献[8]研究社区产消者市场交易策略,基于主从-演化博弈方法确定产消者之间的分散交易电价。文献[9]基于连续双向拍卖机制模拟竞争市场环境下产消者间的分散交易机制。文献[10]设计基于点对点P2P(Peer to Peer)模式的多产消者分散交易机制,通过有限的信息交互实现模型的迭代求解,降低了交易方的信息暴露风险。文献[11-12]研究基于合作博弈的多产消者能量共享策略,并采用Shapley值法对合作剩余进行分配。尽管文献[8-12]考虑了产消者之间的分散交易模式,但是产消者的集中-分散交易策略往往需要在日前作出决定,且这些文献均未考虑PV等不确定因素对产消者市场交易策略的影响。

因此,本文在上述研究的基础上,进一步采用两阶段鲁棒优化方法处理PV出力的不确定性,建立基于两阶段鲁棒优化的多产消者集中-分散市场交易模型,将该模型转换为电能交易状态组合主问题以及不确定性因素影响下的经济调度子问题,并通过列和约束生成C&CG(Column and Constraint Generation)法交替迭代主问题与子问题,实现模型的高效求解,求解结果能在一定程度上降低产消者交易策略的保守性,提高决策的经济性。此外,为了保证联盟长期稳定,在交易策略确定后,进一步采用Nash谈判法对多个产消者的合作剩余进行统一分配。相较于仅考虑边际贡献度的Shapley值法,Nash谈判法

**收稿日期:**2021-04-09;**修回日期:**2021-12-10
**在线出版日期:**2022-02-21
**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52077060)
Project supported by the General Program of the National Nature Science Foundation of China(52077060)

综合考虑了各产消者的风险偏好、边际贡献及供需比等因素，评价指标更全面，分配策略更科学。最后，以包含1个MO与3个产消者的算例验证了所建模型在决策经济性、新能源消纳、调度灵活性方面的优势，并对C&CG算法的性能进行了系统测试。

## 1 基于集中-分散交易机制的多产消者两阶段鲁棒交易模型

由于多个产消者的用电行为以及用电模式具有良好的互补特性以及交互关系，因此，可将价格作为驱动力对集群化产消者进行资源的有效管理，从而在多时间尺度、多层级上发挥产消者聚合资源的灵活性价值，这种能源交易机制又被称为交互式能源TE（Transactive Energy）机制。目前，已有部分区域的电力系统能源交易与管理初步采用了该方法，如北欧电力市场的日前能源交易[13]。在具体项目方面，美国的Olympic Peninsual项目、Transactive Grid项目及荷兰的Powermatching City项目均为比较典型的交互能源项目，目前我国的浙江能源服务商也在积极探索以TE机制推进浙江高弹性电网的建设。

总体而言，现阶段TE机制主要包括集中式交易模式以及集中-分散混合交易模式[13]。在集中式交易模式下，可供产消者选择的交易策略较为单一，产消者仅能够直接与MO进行交易。而在集中-分散混合交易模式下，各产消者以价格信号作为导向，可以灵活选择与其他产消者或MO进行交易，该模式下产消者的市场交易框架如图1所示。由图可见，产消者内部含有能量管理系统EMS（Energy Management System）等计算资源，其具有人机交流、数据分析、预测以及决策优化等功能，能够及时收集上级MO发布的电价以及服务费用信息，并结合自身新能源出力预测值确定相应的能量管理策略，提高能量管理水平。通常情况下，多电产消者向MO售电的电价

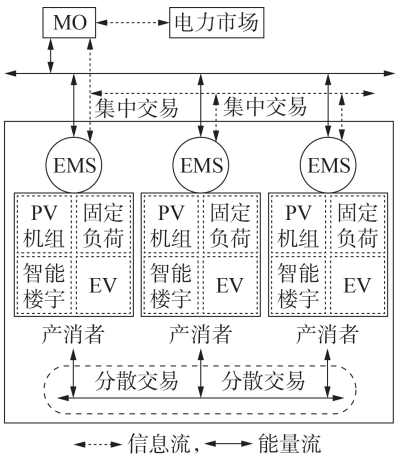



图1 多产消者集中-分散交易框架

Fig.1 Centralized-decentralized trading framework of multiple prosumers

要低于少电产消者从MO购电的电价[11]，故同一配电区域的多个产消者可组成合作联盟，通过联盟内部的电能共享，减少整体向MO的购电量，从而节约用电成本，提高经济效益。

集中-分散交易模式下，各产消者的交易顺序如下：各产消者优先与相邻产消者进行交易，使得清洁能源以及多电产消者的电能尽可能地在系统内部消纳，该交易为去中心化的交易，由产消者之间直接P2P进行交易，交易平台为P2P交易平台[14]；分散交易完成后，各产消者将富余电量或缺额电量信息上报至MO，MO确定与各产消者的集中交易电量；集中交易完成后，MO结合各产消者的基本信息组织Nash谈判，并发布最终谈判结果以及收益分配系数，对多产消者的合作剩余进行统一分配。

### 1.1 产消者内部聚合单元建模

由于产消者主要是用户侧可控资源，因此本文考虑的产消者内部聚合单元包括用户侧EV、CACS、PV以及固定负荷，各部分数学模型如下。

#### 1.1.1 EV模型

本文假设各产消者内的EV用车习惯相对固定，设定为在$t_1$时刻并网，在$t_2$时刻离网，其并网时段集合记为$T_p$，EV充放电过程中会产生电池折旧费用$C_{EV}$，表示如下：

$$C_{EV}=\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N}\left(P_{i,t}^{vc}+P_{i,t}^{vd}\right)C_i^{EV} \tag{1}$$

式中：$N_T$、$N$分别为总时刻数、产消者总数；$P_{i,t}^{vc}$、$P_{i,t}^{vd}$分别为$t$时刻产消者$i$内EV的充电功率、放电功率；$C_i^{EV}$为产消者$i$内EV单位充放电功率的电池折旧费用。EV充放电过程中需满足的基本约束[15]如下。

1）充放电功率约束，即：

$$0\leqslant P_{i,t}^{vc}\leqslant \mu_{i,t}^{vc}P_i^{maxvc} \tag{2}$$

$$0\leqslant P_{i,t}^{vd}\leqslant \mu_{i,t}^{vd}P_i^{maxvd} \tag{3}$$

式中：$\mu_{i,t}^{vc}$、$\mu_{i,t}^{vd}$为布尔变量，分别表示$t$时刻产消者$i$内EV是否处于充电、放电状态，若是则取值1，否则取值0；$P_i^{maxvc}$、$P_i^{maxvd}$分别为产消者$i$内EV的最大充电、放电功率。

2）充放电状态约束，即：

$$\mu_{i,t}^{vc}+\mu_{i,t}^{vd}\leqslant 1 \quad \forall t\in T \tag{4}$$

$$\mu_{i,t}^{vd}=\mu_{i,t}^{vc}=0 \quad \forall t\in T\backslash T_p \tag{5}$$

式中：$T$为所有时段集合。

3）电池容量约束，即：

$$S_i^{evmin}\leqslant S_{i,t}^{ev}\leqslant S_i^{evmax} \tag{6}$$

$$S_{i,t+1}^{ev}=S_{i,t}^{ev}+\eta_i^{vc}P_{i,t}^{vc}-P_{i,t}^{vd}/\eta_i^{vd} \quad \forall t\in T_p \tag{7}$$

$$S_{i,t_2}^{ev}=S_{i,t_1}^{ev}+\sum_{t=t_1}^{t_2-1}\left(\eta_i^{vc}P_{i,t}^{vc}-P_{i,t}^{vd}/\eta_i^{vd}\right) \quad \forall t\in T_p \tag{8}$$

式中：$S_i^{evmin}$、$S_i^{evmax}$分别为产消者$i$内EV蓄电量的最小、最大值；$S_{i,t}^{ev}$为$t$时刻产消者$i$内EV的蓄电量；$\eta_i^{vc}$、$\eta_i^{vd}$分别为产消者$i$内EV的充电、放电效率；$S_{i,t_1}^{ev}$、$S_{i,t_2}^{ev}$

分别为产消者 $i$ 内 EV 刚并网、离网时的蓄电量。

1.1.2　CACS 模型

CACS 的调控需满足用户舒适度要求，本文采用预测平均投票 PMV（Predicted Mean Vote）来确定用户舒适度要求，将其记为 $\sigma_{\mathrm{PMV}}$，表示大多数人在同一环境下的冷热感觉。为保证人体舒适度在可接受的范围内，CACS 在调控过程中应满足如下约束：

$$-0.5 \leqslant \sigma_{\mathrm{PMV}} \leqslant 0.5 \tag{9}$$

$\sigma_{\mathrm{PMV}}$ 与室内温度 $T^{\mathrm{in}}$ 的关系为：

$$\sigma_{\mathrm{PMV}} = \begin{cases} 0.389\,5(T^{\mathrm{in}} - 26) & T^{\mathrm{in}} \geqslant 26^{\circ}\mathrm{C} \\ 0.406\,5(-T^{\mathrm{in}} + 26) & T^{\mathrm{in}} < 26^{\circ}\mathrm{C} \end{cases} \tag{10}$$

进一步基于热力学方程和能量守恒原理，可得到智能楼宇的室温时变方程[16]为：

$$T_t^{\mathrm{in}} = \mathrm{e}^{-\frac{\beta}{\gamma}\Delta t} T_{t-1}^{\mathrm{in}} + \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{\beta}{\gamma}\Delta t}\right)\left(\frac{\alpha}{\beta} - \frac{Q_{i,t}}{\beta}\right) \tag{11}$$

式中：$\Delta t$ 为时间间隔，本文取为 1 h；$\alpha$、$\beta$、$\gamma$ 为智能楼宇内 CACS 的特征参数；$Q_{i,t}$ 为 $t$ 时刻产消者 $i$ 聚合的 CACS 总制冷量。CACS 总制冷量包括制冷机组的制冷量 $Q_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、蓄冷槽的蓄冷量 $Q_{i,t}^{\mathrm{st}}$ 以及蓄冷槽的释冷量 $Q_{i,t}^{\mathrm{re}}$。蓄冷槽以及释冷槽的运行约束见文献[16]。CACS 总耗电量 $P_{i,t}^{\mathrm{cold}}$ 可表示为：

$$P_{i,t}^{\mathrm{cold}} = Q_{i,t}^{\mathrm{ch}} / \mu_{\mathrm{ch}} + Q_{i,t}^{\mathrm{st}} \mu_{\mathrm{st}} + Q_{i,t}^{\mathrm{re}} \mu_{\mathrm{re}} \tag{12}$$

式中：$\mu_{\mathrm{ch}}$、$\mu_{\mathrm{st}}$、$\mu_{\mathrm{re}}$ 分别为制冷机组的能量转换效率、蓄冷槽蓄冷过程中的能量转换效率、蓄冷槽释冷过程中的能量转换效率。

1.1.3　PV 模型

产消者内部聚合的 PV 主要为 PV 面板或屋顶 PV，其基本运行维护费用 $C_{\mathrm{pv}}$ 为：

$$C_{\mathrm{pv}} = \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}} \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{pv}} C_i^{\mathrm{pv}} \tag{13}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{pv}}$ 为 $t$ 时刻产消者 $i$ 内 PV 的发电功率；$C_i^{\mathrm{pv}}$ 为产消者 $i$ 内 PV 单位发电功率的维护成本。

### 1.2　多产消者集中-分散交易建模

1）交易状态约束，即：

$$u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}} + u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}} \leqslant 1 \tag{14}$$

$$u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} + u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} \leqslant 1 \tag{15}$$

式中：$u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}}$、$u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}}$ 为布尔变量，分别表示 $t$ 时刻产消者 $i$ 是否向产消者 $j$ 购买、出售电量，若是则取值 1，否则取值 0；$u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}}$、$u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}}$ 为布尔变量，分别表示 $t$ 时刻产消者 $i$ 是否向 MO 购买、出售电量，若是则取值 1，否则取值 0。

2）交易电量约束，即：

$$0 \leqslant P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}} \leqslant u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}} P^{\mathrm{vpa,max}} \tag{16}$$

$$0 \leqslant P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}} \leqslant u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}} P^{\mathrm{vpa,max}} \tag{17}$$

$$0 \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} \leqslant u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} P_{\max}^{\mathrm{mo,b}} \tag{18}$$

$$0 \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} \leqslant u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} P_{\max}^{\mathrm{mo,s}} \tag{19}$$

$$P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}} = P_{j,i,t}^{\mathrm{vpa,s}} \tag{20}$$

式中：$P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}}$、$P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}}$ 分别为 $t$ 时刻产消者 $i$ 向产消者 $j$ 购买、出售的电量；$P^{\mathrm{vpa,max}}$ 为产消者间的交易电量上限；$P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}}$ 分别为 $t$ 时刻产消者 $i$ 向 MO 购买、出售的电量；$P_{\max}^{\mathrm{mo,b}}$、$P_{\max}^{\mathrm{mo,s}}$ 分别为产消者向 MO 购买、出售电量上限。

3）功率平衡约束。多产消者集中-分散交易机制下的功率平衡约束主要包括多产消者整体的功率平衡约束以及每个产消者内部的供需平衡约束，分别为：

$$\sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{load}} + \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{vc}} + \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} + \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{cold}} = \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{pv}} + \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{vd}} + \sum_{i=1}^{N} P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} \tag{21}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{load}} + P_{i,t}^{\mathrm{vc}} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N} P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}} + P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} + P_{i,t}^{\mathrm{cold}} = P_{i,t}^{\mathrm{pv}} + P_{i,t}^{\mathrm{vd}} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N} P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}} + P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} \tag{22}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{load}}$ 为 $t$ 时刻产消者 $i$ 的固定负荷。

4）交易费用计算。多产消者集中-分散交易过程中产生的费用主要包括产消者间的电能交易费用以及产消者与 MO 的电能交易费用，具体如下。

（1）产消者间的电能交易费用包括买卖双方缴纳给 MO 的固定服务费用以及与电量相关的直接购电或售电费用。需要注意的是，由于产消者间的交易电价、总售电量以及总购电量均相同，因此产消者内部所产生的与电量相关的交易费用为 0，产消者间的交易费用仅涉及服务费用 $C^{\mathrm{vpa}}$，如式（23）所示。

$$C^{\mathrm{vpa}} = \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=i+1}^{N} a_{\mathrm{ser}} \left(u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}} + u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}}\right) \tag{23}$$

式中：$a_{\mathrm{ser}}$ 为产消者间每笔交易支付给 MO 的固定服务费用。

（2）产消者与 MO 的电能交易费用 $C^{\mathrm{mo}}$。该部分费用同样包括服务费用以及与电量相关的购售电收入，如式（24）所示。

$$C^{\mathrm{mo}} = \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}} \sum_{i=1}^{N} \left(b_{\mathrm{ser}} u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} + b_{\mathrm{ser}} u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} + P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} \lambda_t^{\mathrm{b}} - P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} \lambda_t^{\mathrm{s}}\right) \tag{24}$$

式中：$b_{\mathrm{ser}}$ 为产消者与 MO 间每笔交易支付给 MO 的固定服务费用；$\lambda_t^{\mathrm{b}}$、$\lambda_t^{\mathrm{s}}$ 分别为产消者向 MO 购电的电价和售电的电价。

### 1.3　计及不确定性的多产消者两阶段鲁棒交易模型

由于 PV 出力具有较强的随机性，因此产消者在日前交易决策的过程中需要考虑 PV 出力波动性的影响，本文以两阶段鲁棒优化方法处理 PV 出力的不确定性，构建基于两阶段鲁棒优化的多产消者市场交易模型，并利用 C&CG 算法将模型转换为交易状态组合主问题以及经济调度子问题进行交替求解。

1.3.1　不确定变量集合的构建

本文将 PV 出力以不确定集合的形式进行描述。

首先，基于历史数据信息预测一定时间内PV出力的标称值；然后，预测随机场景下PV出力的最大波动范围；最后，将PV出力的不确定性表示为不确定集合$\boldsymbol{D}$。具体如下：

$$\boldsymbol{D}=\left\{\boldsymbol{P}_{\mathrm{pv}}\in\mathbf{R}^{N\times N_{\mathrm{T}}}:\sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}}\left|P_{i,t}^{\mathrm{pv}}-P_{i,t}^{\mathrm{pv,f}}\right|/\Delta_{\mathrm{pv}}(i,t)\leqslant\Gamma_i,\right.$$
$$\left.P_{i,t}^{\mathrm{pv,f}}-\Delta_{\mathrm{pv}}(i,t)\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{pv}}\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{pv,f}}+\Delta_{\mathrm{pv}}(i,t)\right\}\tag{25}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\mathrm{PV}}$为变量$P_{i,t}^{\mathrm{pv}}$的向量形式；$P_{i,t}^{\mathrm{pv,f}}$为$t$时刻产消者$i$内PV出力的预测值；$\Delta_{\mathrm{pv}}(i,t)$为$t$时刻产消者$i$内PV出力的最大波动量；$\Gamma_i$为产消者$i$内PV出力的不确定裕度，用以调节不确定集合的保守度。

1.3.2 基于C&CG算法的两阶段鲁棒交易模型求解

至此，计及集中-分散交易机制的多产消者两阶段鲁棒交易模型的目标函数$C_{\mathrm{mul}}^{\mathrm{vpa}}$为：

$$\begin{cases}C_{\mathrm{mul}}^{\mathrm{vpa}}=\\ \min\limits_{\psi}\sum\limits_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}}\sum\limits_{i=1}^{N}\left[\sum\limits_{j=i+1}^{N}a_{\mathrm{ser}}\left(u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}}+u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}}\right)+b_{\mathrm{ser}}\left(u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}}+u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}}\right)\right]+\\ \max\limits_{\boldsymbol{D}}\min\limits_{\Omega}\sum\limits_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}}\sum\limits_{i=1}^{N}\left[P_{i,t}^{\mathrm{pv}}C_i^{\mathrm{pv}}+\left(P_{i,t}^{\mathrm{vc}}+P_{i,t}^{\mathrm{vd}}\right)C_i^{\mathrm{EV}}+\right.\\ \left.P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}}\lambda_t^{\mathrm{b}}-P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}}\lambda_t^{\mathrm{s}}\right]\\ \text{s.t.}\quad\text{式(1)—(25)}\end{cases}\tag{26}$$

式中：$\psi=\{u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}},u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}},u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}},u_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}},\mu_{i,t}^{\mathrm{vc}},\mu_{i,t}^{\mathrm{vd}}\}$，为第一阶段决策变量集合，包括各离散变量；$\Omega=\{P_{i,t}^{\mathrm{vc}},P_{i,t}^{\mathrm{vd}},S_{i,t}^{\mathrm{ev}},P_{i,t}^{\mathrm{cold}},P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,b}},P_{i,j,t}^{\mathrm{vpa,s}},P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}},P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}}\}$，为第二阶段决策变量集合，包括交易电量等连续变量。

针对式(26)所示的两阶段鲁棒交易模型，本文采用C&CG算法实现该模型的高效求解[17]。模型的详细分解方法以及转换过程见附录A式(A1)—(A20)所示。基于C&CG算法的多产消者两阶段鲁棒集中-分散交易模型的求解流程图见附录A图A1。

## 2 基于Nash谈判的多产消者收益分配

实际上，由于各产消者自身市场力水平存在差异，若产消者间的交易电价过低，则市场力较强的产消者可能会选择退出合作联盟以谋求新的合作对象，因此，为保证联盟的长久稳定，还需要考虑多产消者联盟的合作剩余分配问题。本文以Nash谈判法作为多产消者合作剩余的分配方法，结合各产消者的风险偏好、边际贡献度以及平均供需比3个因素，对各产消者的综合谈判力进行量化，并根据各产消者的综合谈判力确定最终的谈判策略，从而实现多产消者合作剩余的公平分配。此外，Nash谈判法是一种事后分配机制，需要根据产消者两阶段鲁棒交易模型决策结果进行相关谈判指标的计算。

### 2.1 Nash谈判理论

对于一般的Nash谈判问题，使得广义Nash积最大的解$x_i^*$就是该问题的Nash均衡解[18]，如式(27)所示。

$$x_i^*=\underset{x_i}{\operatorname{argmax}}\prod_{i\in S}\left(U_i\left(x_i\right)-U_i\left(x_{i,\min}\right)\right)^{a_i}\tag{27}$$

式中：$x_i\in(0,1)$，为谈判参与者$i$的收益分配系数，是决策变量；argmax表示使目标函数取最大值时的变量值；$S$为各谈判参与者组成的合作联盟；$U_i(\cdot)$为谈判的效用函数；$a_i$为谈判参与者$i$的谈判力，且需要满足$a_i>0$以及$\sum\limits_{i\in S}a_i=1$；$x_{i,\min}$为谈判参与者$i$的谈判初始点。

### 2.2 Nash均衡点的计算

2.2.1 效用函数的构建

效用函数反映了谈判者对收益的偏好，具有主观和客观双重特性。本文以谈判者对风险的偏好程度来具体刻画效用函数。经标准化处理后，效用函数是定义域和值域均在[0,1]区间上的单调递增函数。在该条件下，按决策者对风险的偏好程度，效用函数可分为以下3种。

1)风险偏好型。风险偏好型谈判者的效用函数表现为随着谈判力的增加，效用值的增长速度也加快，即效用函数的一阶导数应单调递增。本文采用底数为自然对数的指数函数描述该效用函数[19]：

$$U_i\left(x_i\right)=m\mathrm{e}^{x_i}+n\tag{28}$$

2)风险厌恶型。风险厌恶型谈判者的效用函数表现为随着谈判力的增加，效用值的增长速度减慢，即效用函数的一阶导数应单调递减。本文采用底数为自然对数的对数函数描述该效用函数：

$$U_i\left(x_i\right)=m+n\ln\left(x_i+0.25\right)\tag{29}$$

3)风险中立型。风险中立型谈判者的效用函数表现为随着谈判力的增加，效用值的增长速度保持不变，即效用函数的一阶导数应为0。本文采用一次函数描述该效用函数：

$$U_i\left(x_i\right)=m+nx_i\tag{30}$$

式中：$m$、$n$为常系数，由于效益函数总是经过(0,0)和(1,1)这2个特殊点的，因此，依次将这2个特殊点代入效益函数，可分别求解式(28)—(30)各效用函数中$m$、$n$具体数值。

2.2.2 初始谈判点

初始谈判点定义为产消者$i$参与合作联盟期望获得的最小分配系数，表明了参与者的谈判底线。若实际收益分配系数小于该分配系数，则谈判破裂，产消者$i$退出联盟。初始谈判点的计算如下：

$$x_{i,\min}=v\left(\{i\}\right)/v(N)\tag{31}$$

式中：$v(\cdot)$为特征函数，$v\left(\{i\}\right)$为产消者$i$单独参与交易的特征函数，$v(N)$为全联盟时的特征函数，具体计算公式见附录B式(B1)、(B2)。

2.2.3　综合谈判力

从Nash均衡解的形式上可见，谈判力是决定各参与者收益分配系数的重要因素，本文从边际贡献度以及平均供需比2个角度对该指标进行量化。

1）边际贡献度。边际贡献度 $S_i^{\mathrm{mc}}$ 是收入分配公平性的直接体现，定义如下：

$$S_i^{\mathrm{mc}}=\left(v(N)-v\left(N-\{i\}\right)\right)/v(N) \tag{32}$$

式中：$v\left(N-\{i\}\right)$ 为产消者 $i$ 不参与交易时联盟的整体收益。

2）平均供需比。平均供需比 $S_i^{\mathrm{pvl}}$ 定义为在整个交易周期内，各产消者PV出力预测值与固定负荷的比值[10]：

$$S_i^{\mathrm{pvl}}=\frac{1}{N_{\mathrm{t}}}\sum_{t=1}^{N_{\mathrm{t}}}\frac{P_{i,t}^{\mathrm{pv}}}{P_{i,t}^{\mathrm{load}}} \tag{33}$$

在上述2个谈判指标下，产消者 $i$ 的综合谈判评分 $S_i$ 为：

$$S_i=\lambda_1 S_i^{\mathrm{mc}}+\lambda_2 S_i^{\mathrm{pvl}} \tag{34}$$

式中：$\lambda_1$、$\lambda_2$ 分别为边际贡献度、平均供需比在谈判中所占比重，满足 $\lambda_1+\lambda_2=1$。对谈判评分进行范化处理，可得到产消者 $i$ 的谈判力为：

$$a_i=S_i/\sum_{j\in S}S_j \tag{35}$$

结合目标函数式（27）以及相关约束式（28）—（35），可计算出各产消者的收益分配系数。

## 3　算例测试与结果分析

### 3.1　算例描述

本文以包含1个MO与3个产消者的算例验证所建模型以及所提算法的有效性。采用高斯过程预测产消者的PV出力标称值以及波动区间[20]，具体预测结果如附录C图C1—C3所示，各产消者的负荷功率曲线如附录C图C4所示。结合图C1—C4可知，各产消者间存在一定的电能互补特性，因此可通过各产消者间以及产消者与MO的协调进一步提高产消者的用电经济性与供电可靠性，实现多种能源的优势互补与梯级利用。产消者间、产消者与MO间的单次交易电量上限设为50 MW。各产消者内均含有一定数量的EV，其聚合后的等效参数见文献[15]。各产消者内聚合的CACS型号一致，其基本参数见附录C表C1。智能楼宇相关热参数取自文献[16]。PV运行维护费用[11]取为0.03元/（kW·h），EV充放电费用为0.08元/（kW·h），多产消者间内部交易的服务费用固定为每笔0.2元，产消者与MO间的固定交易服务费用固定为每笔0.3元。产消者间、产消者与MO间的交易电价[15]见附录C表C2。根据不同产消者的PV出力波动区间，可将产消者1—3依次划归为风险偏好、风险中立以及风险规避型。

本文采用GAMS 24.4软件对上述模型进行编程求解。其中：对于多产消者两阶段鲁棒交易模型，采用GAMS软件调用CPLEX求解器对主问题及子问题进行迭代求解；而Nash谈判过程为非线性模型，采用GAMS软件调用IPOPT求解器对其直接求解。

### 3.2　算例结果分析

3.2.1　不同交易策略结果分析

为对比不同交易机制下多产消者整体的运行方式以及运行成本，设置以下对比算例：Case 1，产消者间可进行P2P交易，按本文所提出的集中-分散交易机制进行交易策略优化；Case 2，产消者间不进行分散式电量交易，各产消者仅参与集中交易。

以产消者1为例，2种算例下其基本调度策略如附录D图D1所示。整体而言，2种交易模式下产消者1内部各聚合单元的调度计划基本一致，而EV的充放电策略有所不同。在Case 1下，由于产消者可参与分散交易，市场交易策略更灵活，因此其EV的充放电行为更频繁，充放电策略更灵活。此外，产消者间的分散交易多发生在各产消者负荷相对较低且PV功率相对较高的07:00—13:00时段，而在20:00至次日06:00时段，所有产消者均只参与集中交易。

2种算例下产消者与MO的市场交易电量如图2所示。由图可以看出，在Case 1下，除了部分时刻产消者购电量略高于Case 2外，在其余大多数时间内Case 1下的购电量和售电量均低于Case 2，尤其是在07:00—16:00时段，Case 1下的产消者无需向MO购电，仅通过产消者间的分散交易即可满足自身负荷的用电需求，而在Case 2下少电产消者仍需购电以满足负荷需求。可见，集中-分散交易机制下产消者的市场交易策略更加灵活且更具经济性。

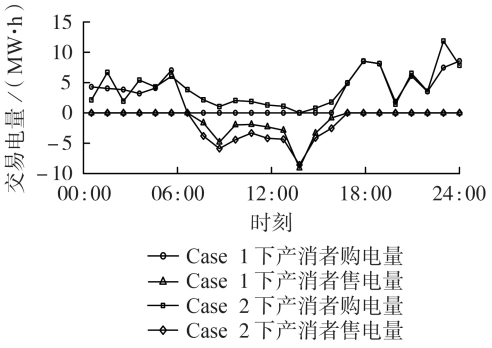



**图2　2种算例下产消者与MO的交易电量**

Fig.2　Energy trading between prosumers and MO under two cases

2种算例下07:00、09:00以及19:00这3个时刻产消者的市场交易策略如附录D图D2所示。在07:00，Case 1下3个产消者仅通过彼此间的分散交易即可满足自身的电能交易需求；在09:00，Case 1下存在多种交易模式，产消者1以分散交易的形式向产消者3购入1.05 MW·h的电能，产消者2以集中

交易的形式向MO出售3.05 MW·h电能，而产消者3同时参与集中与分散交易，分别将1.78 MW·h和1.05 MW·h的电能出售给MO和产消者1；在19:00，产消者均处于供不应求状态，2种算例下产消者的交易策略完全一致，即仅通过集中式交易向MO购电。

2种算例下联盟运行成本见表1。与Case 2相比，Case 1下产消者与MO的交易成本降低10472元。然而，由于产消者间交易需要额外支付服务费用，因此，分散交易的成本增加4840元。整体来看，相较于集中交易机制，集中-分散协同交易机制可降低约8.67%的运行成本。

**表1 2种算例下联盟运行成本**

Table 1 Operation cost of alliance under two cases

单位：元

| 成本 | Case 1 | Case 2 | Case 1相较于Case 2的差值 |
|---|---|---|---|
| 产消者间交易成本 | 4840 | 0 | -4840 |
| 产消者与MO交易成本 | 44748 | 55220 | 10472 |
| EV充放电成本 | 2922 | 2716 | -206 |
| PV维护成本 | 4671 | 4671 | 0 |
| 总计 | 57181 | 62608 | 5427 |

若由于线路传输容量限制，产消者与MO的单笔交易电量最高为2.5 MW·h，则超过该交易值会产生一定的弃光量。以多电产消者2为例，在不同算例下，其向MO的售电量曲线如图3所示。由图可以看出，Case 2下产消者2向MO的售电量整体高于Case 1，且在Case 1下的弃光现象仅发生在15:00，弃光量较少，而Case 2下，在10:00、14:00、15:00均有不同程度的弃光量产生。可见，当产消者之间可以进行P2P交易时，多电产消者可以灵活选择其交易对象，并使得清洁能源以及剩余电能尽可能地在联盟内部消纳。

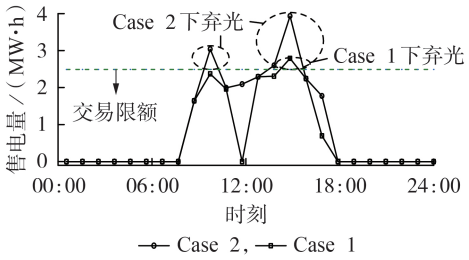



**图3 产消者2向MO售电量曲线**

Fig.3 Electricity sales curve of Prosumer 2 to MO

### 3.2.2 Nash谈判有效性分析

为验证所提基于Nash谈判法的收益分配策略的有效性，在各产消者整体参与市场交易的情况下，设置以下不同利润分配方法：方法1，按Shapley值法进行收益分配；方法2，按Nash谈判法进行收益分配，不考虑各产消者的风险偏好程度；方法3，按Nash谈判法进行收益分配，考虑各产消者的风险偏好程度。3种方法下各产消者的运行成本如表2所示，表中初始谈判值表示各产消者单独参与市场交易的运行成本。

**表2 3种方法下各产消者的运行成本**

Table 2 Operation cost of each prosumer under three methods

| 方法 | 运行成本/元 | | |
|---|---|---|---|
| | 产消者1 | 产消者2 | 产消者3 |
| 1 | 48240 | 6096 | 2846 |
| 2 | 48869 | 5807 | 2506 |
| 3 | 47699 | 6268 | 3215 |
| 初始谈判值 | 51075 | 6775 | 4758 |

由表2可知，无论采用哪种分配方法，各产消者的运行成本均低于初始谈判值，这说明了Nash谈判法能够保证产消者间的收益分配结果位于核中。对比方法1和方法2可知，相较于Shapley值法，由于Nash谈判法进一步考虑了平均供需比对分配策略的影响，因此平均供需比较高的产消者2和产消者3能够在该谈判中获得更高的收益。对比方法2和方法3可知，在考虑各方的风险偏好后，对风险抵御能力更强的产消者1收益有了较大提高，而风险抵御能力较差的产消者2和产消者3的收益则有所降低。由此可见，本文采用的Nash谈判分配方法能够从多个角度衡量各产消者的市场力水平，避免因按单一指标分配而出现收益分配不均的问题，体现了竞争市场环境下收入分配的公平性。

### 3.2.3 鲁棒保守度参数对产消者交易结果的影响

为探究PV出力波动影响下产消者交易策略的变化，分别设置鲁棒模型的保守度为0、1、3、6，以产消者2为例，其与MO的交易策略如图4所示。

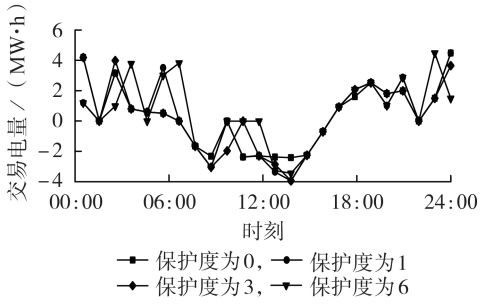



**图4 不同保守度下产消者2的市场交易策略**

Fig.4 Market trading strategy of Prosumer 2 under different conservatisms

由图4可见，PV出力的不确定性对产消者的市场交易策略有一定的影响，主要体现在当PV波动性较大时，产消者需要出售/购买更多的电量以保证电能供需的平衡，而PV波动性较小时，产消者与MO的交易电量则相对较低。因此，在产消者市场交易模型中，有必要采用鲁棒优化方法对交易过程中的不确定因素进行处理。

此外，鲁棒交易模型的保守度参数对联盟整体

的运行成本也有一定的影响，如图5所示。由图可知，随着保守度参数的不断增大，模型的不确定性逐渐增加，多产消者的整体运行成本也逐步提高，即多产消者联盟在制定日前调度计划时越多考虑PV出力的不确定性，得到的方案就越保守，相应的运行成本也越高。

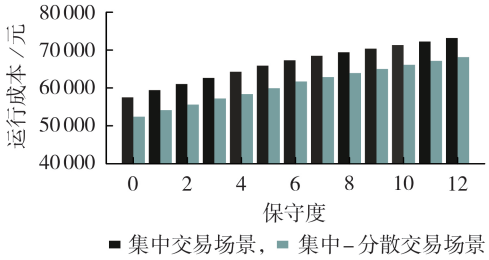



**图5　不同保守度下多产消者运行成本**

Fig.5　Operation cost of multiple prosumers under different conservatisms

附录D表D1给出了不同预测误差下多产消者整体运行成本。在同一保守度参数下，随着预测误差的增大，无论是在集中交易还是集中-分散交易场景下，多产消者整体的运行成本都有较大幅度的增加，且随着 $\Gamma_i$ 的提高，预测误差对运行成本的影响更为明显。

### 3.2.4　C&CG算法性能测试

为探究产消者数量对本文所提算法的影响，对比产消者数量分别为1、3、5、10这4种情况下的算法计算结果，如表3所示。由表可见，在不同产消者数量下，C&CG算法均能够通过少量的迭代次数使得模型收敛到最优解。值得注意的是，随着产消者数量的增多，主问题和子问题的规模也随之扩大，对应的离散变量、连续变量及约束数量也成倍增加，这导致每次迭代的计算时间增加，但对于包含10个产消者的算例系统，其最终的计算时间也仅为963.48 s，这对于日前交易/调度而言是满足要求的。附录D表D2给出了不同类型产消者对算法的影响，由表可见，改变产消者的类型对算法的迭代过程几乎无影响，但是在包含互补类型产消者的算例系统中，产消者的整体运行成本更低。

**表3　不同产消者数量下C&CG算法计算结果对比**

Table 3　Comparison of calculation results of C&CG algorithm under different numbers of prosumers

| 产消者数量 | 整体运行成本/元 | P2P交易成本/元 | 集中交易成本/元 | 算法迭代次数 | 算法计算时间/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6775 | — | 5476 | 2 | 8.52 |
| 3 | 57181 | 4840 | 44748 | 3 | 48.59 |
| 5 | 74243 | 8659 | 53352 | 3 | 364.58 |
| 10 | 199268 | 38566 | 122594 | 5 | 963.48 |

## 4　结论

本文针对多产消者集中-分散交易过程中的不确定性问题，提出一种多产消者两阶段鲁棒集中-分散交易模型，基于算例测试结果得出以下结论。

1）通过将多产消者两阶段鲁棒交易模型分解为交易状态组合主问题以及不确定因素影响下的经济调度子问题，并利用C&CG算法交替迭代主问题以及子问题，可实现模型的高效求解。经测试可知，即使是包含10个产消者的算例系统，最终的求解时间也仅为963.48 s，满足日前交易/调度的要求。

2）集中-分散交易模式能够通过产消者之间的P2P交易减少产消者整体与MO的交互功率，保证了交易策略的灵活性，促使多电产消者的电能尽可能地在系统内部消纳，显著提高了整体经济效益，相较于集中交易模式，能够降低约8.67%的运行成本。

3）相较于仅考虑贡献度的Shapley值法，Nash谈判法考虑了多个产消者的风险偏好、边际贡献以及供需比等因素，且设置谈判破裂点以保证分配结果一定位于核中，评价指标更为全面，分配策略更加科学，且模型的求解较为简单。

4）不确定因素对产消者的交易策略有一定的影响。通过改变鲁棒模型的保守度，能灵活调整多产消者交易策略的保守性，且各产消者可通过提高PV预测精度进一步提高自身参与市场交易的竞争力。

本文仅关注多产消者日前交易策略的制定，并未涉及实时交易策略，后续笔者将在日前交易策略的基础上，进一步深入研究多产消者的实时交易策略，从而构建更加完整的产消者市场交易体系。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

**参考文献：**

[1] 朱西平，付迁，文红，等. 区块链视角下多能源主体储能优化配置模型[J]. 电力自动化设备，2020，40(8)：47-56.
ZHU Xiping，FU Qian，WEN Hong，et al. Optimal allocation model of multi-energy entity energy storage from perspective of blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(8)：47-56.

[2] RATHNAYAKA A J D，POTDAR V M，DILLON T S，et al. A methodology to find influential prosumers in prosumer community groups[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2014，10(1)：706-713.

[3] TEOTIA F，MATHURIA P，BHAKAR R. Peer-to-peer local electricity market platform pricing strategies for prosumers[J]. IET Generation，Transmission & Distribution，2020，14(20)：4388-4397.

[4] 杨昭，艾欣. 考虑电能共享的综合能源楼宇群分布式优化调度[J]. 电网技术，2020，44(10)：3769-3778.
YANG Zhao，AI Xin. Distributed optimal scheduling for integrated energy building clusters considering energy sharing[J]. Power System Technology，2020，44(10)：3769-3778.

[5] JIANG T，LI Z N，JIN X L，et al. Flexible operation of active distribution network using integrated smart buildings with heating，ventilation and air-conditioning systems[J]. Applied Energy，2018，226：181-196.

[6] WANG F，ZHOU L D，REN H，et al. Multi-objective opti-

mization model of source-load-storage synergetic dispatch for a building energy management system based on TOU price demand response[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2018,54(2):1017-1028.

[7] 冯昌森,沈佳静,赵崇娟,等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):85-93.
FENG Changsen,SHEN Jiajing,ZHAO Chongjuan,et al. Cooperative game-based coordinated operation strategy of smart energy community[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(4):85-93.

[8] PAUDEL A,CHAUDHARI K,LONG C,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.

[9] CHEN K X,LIN J,SONG Y H. Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market:a prediction-integration model[J]. Applied Energy,2019,242:1121-1133.

[10] 陈修鹏,李庚银,周明,等. 考虑新能源不确定性和点对点交易的配网产消者分布式优化调度[J]. 电网技术,2020,44(9):3331-3340.
CHEN Xiupeng,LI Gengyin,ZHOU Ming,et al. Distributed optimal scheduling for prosumers in distribution network considering uncertainty of renewable sources and P2P trading[J]. Power System Technology,2020,44(9):3331-3340.

[11] 任文诗,高红均,刘友波,等. 智能建筑群电能日前优化共享[J]. 电网技术,2019,43(7):2568-2577.
REN Wenshi,GAO Hongjun,LIU Youbo,et al. Optimal day-ahead electricity scheduling and sharing for smart building cluster[J]. Power System Technology,2019,43(7):2568-2577.

[12] PAUDEL A,CHAUDHARI K,LONG C,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] 吴界辰,艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):1-18.
WU Jiechen,AI Xin. Optimal operation of prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(19):1-18.

[14] 赵春璋,尚敬福,杨胜春. 新型售电模式:基于微网的P2P电能交易平台设计[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2018(4):30-36.
ZHAO Chunzhang,SHANG Jingfu,YANG Shengchun. A new retailing model:design of P2P electricity trade platform based on micro-grid[J]. Journal of North China Electric Power University(Social Sciences),2018(4):30-36.

[15] ZHANG B Y,LI Q Q,WANG L H,et al. Robust optimization for energy transactions in multi-microgrids under uncertainty[J]. Applied Energy,2018,217:346-360.

[16] SUN G Q,QIAN W H,HUANG W J,et al. Stochastic adaptive robust dispatch for virtual power plants using the binding scenario identification approach[J]. Energies,2019,12(10):1918.

[17] ZENG B,ZHAO L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. Operations Research Letters,2013,41(5):457-461.

[18] 秦婷,刘怀东,王锦桥,等. 基于讨价还价博弈理论的分布式能源合作收益分配模型[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):134-140.
QIN Ting,LIU Huaidong,WANG Jinqiao,et al. Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):134-140.

[19] 麻秀范,余思雨,朱思嘉,等. 基于多因素改进Shapley的虚拟电厂利润分配[J]. 电工技术学报,2020,35(增刊2):585-595.
MA Xiufan,YU Siyu,ZHU Sijia,et al. Profit allocation to virtual power plant members based on improved multifactor Shapley value method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(Supplement 2):585-595.

[20] ZHOU Y Z,WEI Z N,SUN G Q,et al. A robust optimization approach for integrated community energy system in energy and ancillary service markets[J]. Energy,2018,148:1-15.

**作者简介:**

王善磊

王善磊(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为产消者市场化交易(**E-mail**:shanlei666@126.com);

孙国强(1978—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制(**E-mail**:hhusunguoqiang@163.com);

吴 晨(1988—),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划、电力市场(**E-mail**:cwusgcc@gmail.com)。

(编辑 王锦秀)

# Two-stage robust optimization model of multiple prosumers based on centralized-decentralized trading mechanism

WANG Shanlei[1],SUN Guoqiang[1],WU Chen[1,2],HU Guowei[2],ZHOU Yizhou[1],CHEN Sheng[1],WEI Zhinong[1]

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;
2. Economic and Technology Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nanjing 210008,China)

**Abstract**:Aiming at the uncertainty in the process of prosumers participating in electricity market trading,a two-stage robust centralized-decentralized trading model of multiple prosumers is proposed. Considering that P2P(Peer to Peer) decentralized trading can be carried out between prosumers,a centralized-decentralized market trading model of multiple prosumers is built. Considering the impact of uncertainty of photovoltaic output on trading strategy,a two-stage robust market trading model of multiple prosumers is built. Nash negotiation method is adopted to realize fair distribution of cooperative surplus among multiple prosumers. Simulation examples verify the effectiveness of the proposed model.

**Key words**:prosumer;centralized-decentralized trading;Nash negotiation;two-stage robust optimization;P2P trading

## 附录 A：

为方便说明，将多产消者两阶段鲁棒交易模型简化为其矩阵形式，记为模型 $M_0$，表示如下：

$$\min_{\boldsymbol{x}} \boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} + \max_{\boldsymbol{d}\in\boldsymbol{D}} \min_{\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d})} \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{A1}$$

$$\boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{g} \tag{A2}$$

$$\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d}) = \{\boldsymbol{y} : \boldsymbol{E}\boldsymbol{y} \le \boldsymbol{e},\ \boldsymbol{A}\boldsymbol{y} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{d} = \boldsymbol{c}, \boldsymbol{E}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{y} \le \boldsymbol{h}\} \tag{A3}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 为第一阶段离散决策变量集合，其元素均为 0-1 变量，表示各产消者的集中-分散交易状态决策；$\boldsymbol{y}$ 为第二阶段连续决策变量集合，表示产消者各聚合单元的发用电运行决策以及集中-分散交易电量的大小；PV 的不确定功率输出 $\boldsymbol{d}$ 由不确定集合 $\boldsymbol{D}$ 表示；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{F}$ 为相关参数对应的矩阵形式；$\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$ 为目标函数中的参数列向量；$\boldsymbol{c}$、$\boldsymbol{e}$、$\boldsymbol{g}$、$\boldsymbol{h}$ 为约束条件中相关参数的列向量。

采用 C&CG 算法实现多产消者两阶段鲁棒交易模型的求解，将模型 $M_0$ 分解为主问题和子问题。

主问题用于求解第一阶段决策，由主问题求解出可应对 PV 发电所有不确定场景的电量交易决策。具体求解方法为：在每次迭代时，在子问题求得的最差 PV 发电场景下，向主问题添加对应约束，具体表示如下：

$$\min_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}} \boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\gamma} \tag{A4}$$

$$\boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{g} \tag{A5}$$

$$\boldsymbol{\gamma} \ge \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^{l} \quad \forall l \le k \tag{A6}$$

$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{y}^{l} \le \boldsymbol{e} \quad \forall l \le k \tag{A7}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{y}^{l} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{d}_{l}^{*} = \boldsymbol{c} \quad \forall l \le k \tag{A8}$$

$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{y}^{l} \le \boldsymbol{h} \quad \forall l \le k \tag{A9}$$

式中：$k$ 为迭代序号；$\boldsymbol{\gamma}$ 为引入的辅助变量；$\boldsymbol{y}^{l}$ 为第 $l$ 次迭代求得的子问题最优策略；$\boldsymbol{d}_{l}^{*}$ 为第 $l$ 次迭代由子问题求解出的 PV 出力最恶劣场景。

在主问题作出第一阶段决策后，子问题将作出第二阶段决策，求解在 PV 出力出恶劣条件下使系统运行成本最小的运行方案。具体方法为：每次迭代时，给定主问题下求得的产消者交易决策 $\boldsymbol{x}^{*}$，求解子问题，得到最差 PV 出力场景 $\boldsymbol{d}$ 以及对应的最优运行策略 $\boldsymbol{y}$，具体为：

$$\max_{\boldsymbol{d}\in\boldsymbol{D}} \min_{\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{x}^{*},\boldsymbol{d})} \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{A10}$$

$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{y} \le \boldsymbol{e} \tag{A11}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{y} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{d} = \boldsymbol{c} \tag{A12}$$

$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{y} \le \boldsymbol{h} \tag{A13}$$

子问题为 max-min 形式的双层优化问题，其中内层问题为线性优化问题，因此可通过 KKT 条件将子问题转化为单层优化问题，表示如下：

$$\max_{\boldsymbol{d}\in\boldsymbol{D},\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{x}^{*},\boldsymbol{d})} \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{A14}$$

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega} \le \boldsymbol{b} \tag{A15}$$

$$\left(\boldsymbol{Ey}-\boldsymbol{e}\right)_m \boldsymbol{\lambda}_m = 0 \tag{A16}$$

$$\left(\boldsymbol{Ex}+\boldsymbol{Fy}-\boldsymbol{h}\right)_n \boldsymbol{\omega}_n = 0 \tag{A17}$$

$$\left(\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}-\boldsymbol{b}\right)_q \boldsymbol{y}_q = 0 \tag{A18}$$

式中：$\boldsymbol{\lambda}$、$\boldsymbol{\mu}$、$\boldsymbol{\omega}$为对偶变量，且$\boldsymbol{\lambda}$、$\boldsymbol{\omega}$均大于 0；$m$、$n$、$q$分别为约束和变量对应的序号。

对于式(A16)—(A18)的互补松弛条件，进一步采用 Big-M 法对其进行线性化，以式(A16)为例：

$$\boldsymbol{\lambda}_m \geq -\varepsilon_m M \quad \varepsilon_m \in \{0,1\} \tag{A19}$$

$$\left(\boldsymbol{Ey}-\boldsymbol{e}\right)_m \geq -\left(1-\varepsilon_m\right)M \quad \varepsilon_m \in \{0,1\} \tag{A20}$$

式中：$M$为一个足够大的常数；$\varepsilon_m$为引入的辅助变量。通过 KKT 条件及 Big-M 法，可最终将子问题化简为线性规划问题。当子问题为线性规划问题时，通过有限次的引入割平面计算主问题 MP，可以得到两阶段鲁棒优化模型的最优解。

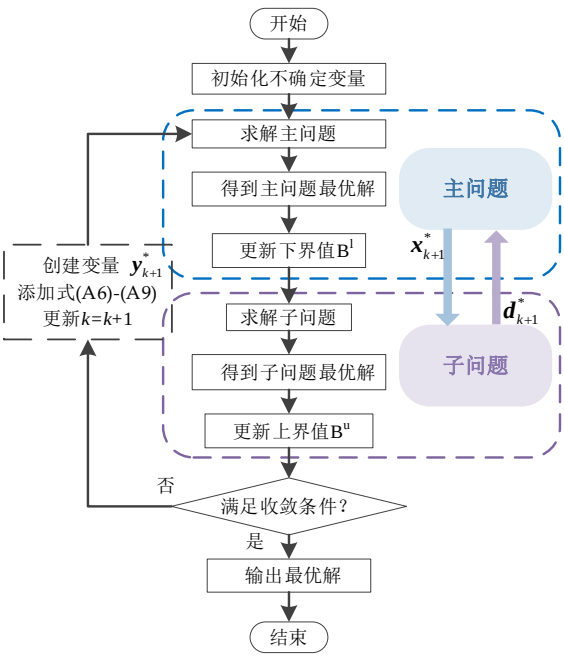



图 A1 算法流程图

Fig.A1 Flowchart of algorithm

## 附录 B：

当产消者单独参与交易时，特征函数计算为：

$$\begin{cases} v\left(\{i\}\right) = C_i^{\mathrm{vpa}} = \min\limits_{\psi} \sum\limits_{t=1}^{N_T} b_{\mathrm{ser}}\left(u_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} + u_{i,t}^{\mathrm{mo,s}}\right) + \\ \qquad \max\limits_{\boldsymbol{D}} \min\limits_{\Omega} \sum\limits_{t=1}^{N_T}\left[P_{i,t}^{\mathrm{pv}} C_i^{\mathrm{pv}} + \left(P_{i,t}^{\mathrm{vc}} + P_{i,t}^{\mathrm{vd}}\right) C_i^{\mathrm{EV}} + P_{i,t}^{\mathrm{mo,b}} \lambda_t^{\mathrm{b}} - P_{i,t}^{\mathrm{mo,s}} \lambda_t^{\mathrm{s}}\right] \\ \text{s.t.} \quad \text{式}(1)-(13)、(15)、(18)、(19)、(21)-(25) \end{cases} \tag{B1}$$

全联盟时的特征函数$v(N)$计算公式为：

$$
\begin{cases}
v(N)=\min\limits_{\psi}\sum\limits_{t=1}^{N_T}\sum\limits_{i=1}^{N}\left[\sum\limits_{j=i+1}^{N}a_{\text{ser}}\left(u_{i,j,t}^{\text{vpa,b}}+u_{i,j,t}^{\text{vpa,s}}\right)+b_{\text{ser}}\left(u_{i,t}^{\text{mo,b}}+u_{i,t}^{\text{mo,s}}\right)\right]+ \\
\qquad \max\limits_{\boldsymbol{D}}\min\limits_{\Omega}\sum\limits_{t=1}^{N_T}\sum\limits_{i=1}^{N}\left(P_{i,t}^{\text{pv}}C_i^{\text{pv}}+\left(P_{i,t}^{\text{vc}}+P_{i,t}^{\text{vd}}\right)C_i^{\text{EV}}+P_{i,t}^{\text{mo,b}}\lambda_t^{\text{b}}-P_{i,t}^{\text{mo,s}}\lambda_t^{\text{s}}\right) \\
\text{s.t. 式(1)}-\text{(25)}
\end{cases}
\tag{B2}
$$

求解该优化模型即可得到全联盟时的特征函数值。此外，通过改变式(B2)中 $N$ 的数值，可求解不同数量产消者联盟下的特征函数值。

## 附录 C：

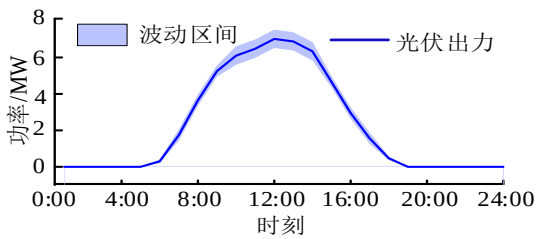



图 C1　产消者 1 内 PV 出力标称值及区间

Fig.C1 PV output standard value and interval of Prosumer 1

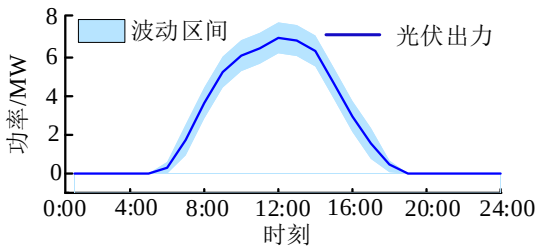



图 C2　产消者 2 内 PV 出力标称值及区间

Fig.C2 PV output standard value and interval of Prosumer 2

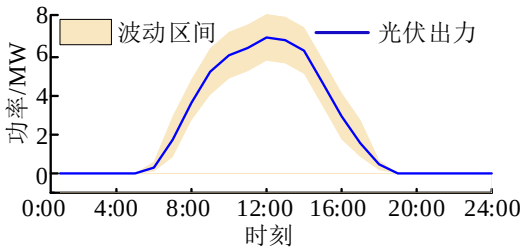



图 C3 产消者 3 内 PV 出力标称值及区间

Fig.C3 PV output standard value and interval of Prosumer 3

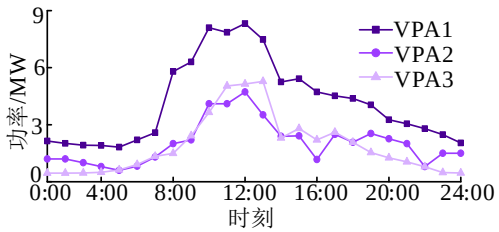



图 C4　产消者负荷曲线图

Fig.C4 Load curve of each prosumer

表 C1 CACS 参数

Table C1 CACS parameters

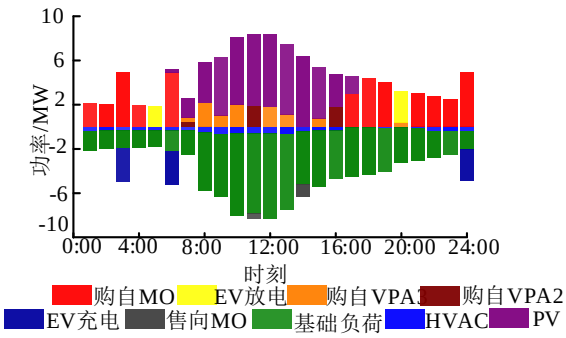
| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|---|---|---|---|
| 制冷机最大制冷量/（MW•h） | 3.33 | 蓄冷/释冷效率 | 0.95 |
| 蓄冷槽最大蓄冷量/（MW•h） | 1.67 | 制冷机能量转换效率 | 5.6 |
| 蓄冷槽最大释冷量/（MW•h） | 1.67 | 蓄冷能量转换效率 | 0.008 |
| 蓄冷槽容量/（MW•h） | 8.8 | 释冷能量转换效率 | 0.007 |

表 C2 交易电价

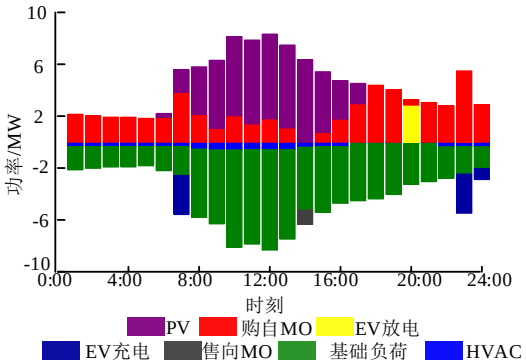
Table C2 Trading price

| 时段 | 电价/[元•（kW•h）$^{-1}$] | | |
|---|---|---|---|
| | 产消者向电网购电 | 产消者向电网售电 | 产消者间交易 |
| 峰期（10:00—15:00，18:00—21:00） | 1.32 | 1.00 | 1.162 |
| 平期（7:00—10:00，15:00—18:00，21:00—23:00） | 0.82 | 0.58 | 0.726 |
| 谷期（23:00 至次日 07:00） | 0.33 | 0.2 | 0.260 |

## 附录 D：



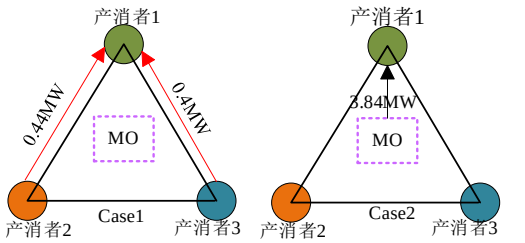

(a) Case 1



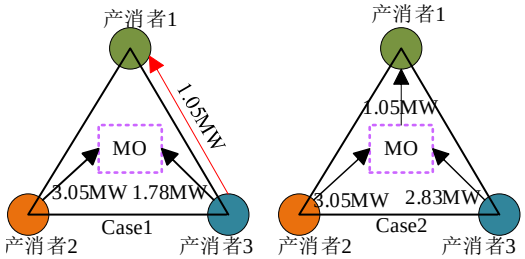

(b) Case 2

图 D1 不同算例下产消者 1 调度策略及交易策略

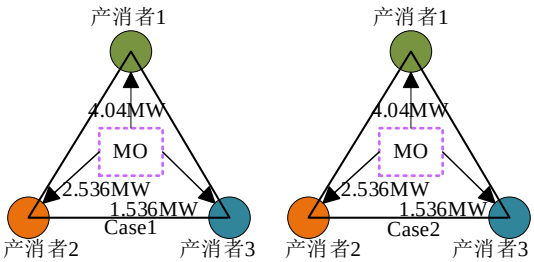
Fig.D1 Scheduling strategy and trading strategy of Prosumer1 for different cases




(a) 07:00




(b) 09:00




(c) 19:00

图 D2 不同时刻各产消者市场交易策略

Fig.D2 Market trading strategy of each prosumer at different times

表 D1 不同保守度及预测误差下多产消者运行成本

Table D1 Operation cost of multiple prosumers under different conservatisms and prediction errors

| $\Gamma_i$ | 预测误差/MW | Case 1 成本/元 | Case 2 成本/元 |
|---|---|---|---|
| 3 | 0.25 | 54 787 | 60 044 |
| | 0.5 | 57 181 | 62 608 |
| | 0.75 | 59 693 | 65 030 |
| 6 | 0.25 | 57 305 | 62 386 |
| | 0.5 | 61 663 | 67 267 |
| | 0.75 | 64 326 | 71 816 |
| 9 | 0.25 | 59 494 | 63 924 |
| | 0.5 | 64 727 | 70 327 |
| | 0.75 | 67 338 | 75 974 |

为探究不同类型产消者对于本文模型以及算法的影响，设置对比算例分别为：1）算例 1，以本文算例系统中 3 种具有互补潜力的产消者作为算例；2）算例 2，以 3 个类似产消者 1 源荷特性的产消者作为算例。2 种情况下的结果对比见表 D2。

表 D2 不同算例 C&CG 算法计算结果对比

Table D2 Comparison of calculation results of C&CG algorithm under different examples

| 算例 | 产消者 1 运行成本/元 | P2P 交易成本/元 | 集中交易成本/元 | 迭代次数 | 计算时间/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 48 240 | 3 620 | 38 658 | 3 | 47.26 |
| 2 | 51 075 | — | 43 216 | 3 | 48.39 |

由表中可以看出，2 种算例下对于 C&CG 算法基本没有任何影响，迭代次数以及整体的计算时间均相差不大，但是对比产消者 1 的整体运行成本可以看出，在互补类型的产消者算例中，产消者 1 的整体运行成本相对更低，可见，在互补算例系统中，各产消者间通过分散交易，能够将多余的电能优先在产消者内部消纳，提高其用电的经济性。