

面向经济-环境-安全的输电网-配电网-聚合商-prosumers 协调管理： 共享-共担视角，电碳耦合

目标期刊：European Journal of Operational Research

主题：多层级的协调管理、电力市场-碳市场融合、能源共享-碳责任共担思想

挖掘“源-网-荷”之间的协同管控潜力

实现多层级之间的协调

涉及：批发市场、P2P 市场

研究背景：以电力行业为代表的能源行业是中国碳减排的重要来源。分布式能源的大规模发展为电力系统深度脱碳带来了机遇，但也带来了复杂挑战。在这一背景下，电力市场需要做出相应转变，以适应当前的新型电力系统。

（1）市场交易主体多元、剧增：如用电侧接入可调节负荷、分布式电源、储能、充换电站等各类资源，市场主体数量显著增加、类型丰富。如何协调管理复杂多元主体？

（2）市场形态将需要改变，即需要形成多层级电力市场体系：未来将形成全国-省区-配网侧的多层市场架构。其中，高层级的市场将扩大资源配置的规模，低层级的市场将提高网络和资源建模的精细度。

（3）输配电价需要革新：分布式电源、产消者与纯消费者之间的交易，将改变各主体对输电网的利用方式，原有的输配电价不适用于未来的配电网交易（DER 和用户在配电网内直接交易，供需就地平衡）。如：配电网内存在隔墙售电，无需经过上级输电网，因此不应承担输电网的全部运输费用；分布式配电网的交易社区，上层电网的角色是备用与电能支撑作用，输配电费中的容量费的比例应该更高。

同时，需要推进电碳耦合研究，以电力为纽带协同推进碳排放总量和强度的双控，助力双碳目标的实现。通过明确各主体互动行为下的碳排放责任，以协调实现碳减排与公平的目标。

解决的问题：

为了适应新型电力系统，需要构建一种能够有效耦合电力流和碳排放流的（跨区域）分布式能源网络多主体管理模式。通过合理划分碳责任，建立实时引导供输配需环节减碳的调节信号，形成多主体间的互动与协调管理机制，以激发多参与方联合减排潜力，并兼顾经济、环境和安全多维目标。

前期:

文献阅读（阅读高质量期刊）+汇报心得与想法

每个人都需要了解本研究的思想、互动模式、看懂模型

后期分工:

引言+框架设计（绘图）

方法论（模型）+代码

结果分析与讨论（绘图）

TSO-DSO-Aggregators-prosumers 协调管理模型(输网-配网-微电网):

阶段 1: TSO-DSO-Aggregators 优化

1. 输电网层级调度模型

1.1 目标函数

在输电网层面，考虑输配两级电网的售、购电量交互，以及输电网应该承担的碳责任，输电网调度层即 TSO，旨在实现成本最小化为目标，即最大限度降低输电网的运营成本，并将批发市场的出清节点电价 LMP 及输电网的碳排放流传递到下级配电网层级。一般而言，LMP 可以通过**直流最优潮流模型**得到。

输电网结构，本文考虑常规集中式机组，包括大型的火电机组、风力发电机组、光伏发电机组。总成本 C^{trans} 包括：输电网机组发电成本 C^{gen} 、碳成本 C^{carbon} 、向配电网层级的售电收益 C^{sell} 、向配电网层级的购电损失 C^{buy} 、网络损失成本 C^{loss} 。

$$\begin{aligned}\min C^{trans} &= C^{gen} + C^{buy} - C^{sell} + C^{carbon} + C^{loss} \\ C^{gen} &= \sum_i \sum_t [a(P_{i,t}^{gen})^2 + bP_{i,t}^{gen} + c], \forall i, t \\ C^{buy} &= \sum_i \sum_t \chi_{i,t}^{feed-in} P_{i,t}^{grid-s} \\ C^{sell} &= \sum_i \sum_t \chi_{i,t}^{lmp} P_{i,t}^{grid-b} \\ C^{carbon} &= \chi^{carbon} CR^{trans} \\ C^{loss} &= \sum_l \sum_t \chi^{loss} P_{l,t}^{loss}\end{aligned}$$

其中，a,b,c 分别为火力发电机组的发电量相关的成本系数，本文认为风力、光伏发电机组的单位发电成本为 0； $\chi_{i,t}^{feed-in}$ 为上网电价， $P_{i,t}^{grid-s}$ 为节点 i 处的配电网运营商 DSO i 向输电网出售的有功功率； $\chi_{i,t}^{lmp}$ 为批发市场的出清电价，即节点电价， $P_{i,t}^{grid-b}$ 为节点 i 处的配电网运营商 DSO 向输电网购买的有功功率； χ^{carbon} 为碳配额的价格； CR^{trans} 为输电网层级

应该承担的碳责任； χ^{loss} 为单位网损成本； $P_{l,t}^{loss}$ 为线路 l 的功率损失。

1.2 约束条件

(1) **输电网潮流约束**（直流潮流模型，节点电压幅值恒定、忽略电阻仅考虑电抗、无功功率忽略， $\sin x = x, \cos x = 1$ ） l 为输电线路（为了促进输配网络的交互，进一步修改为**计及电压幅值的拓展直流潮流模型**¹）

$$P_{l,t} = B_{i_1,i_2} (\theta_{i_1,t} - \theta_{i_2,t}) \quad (1)$$

$P_{l,t}$ 为输电线路 l 的有功功率， B_{i_1,i_2} 为线路 i_1 - i_2 的导纳（线路电抗的倒数）； $\theta_{i_1,t}$ 和 $\theta_{i_2,t}$ 分别为线路始端和末端的节点相角。

(2) **输电网线路容量约束**（确保线路 l 的功率流不超过其容量限制）

$$-c_l^{\max} \leq P_{l,t} \leq c_l^{\max} \quad (1)$$

c_l^{\max} 表示线路 l 的有功功率传输上限。

(3) **输电网节点功率平衡约束**

$$P_{i,t}^{cgen} + P_{i,t}^{pvgen} + P_{i,t}^{wtgen} - \sum_{l \in \Omega_i^1} P_{l,t} + \sum_{l \in \Omega_i^2} P_{l,t} = P_{i,t}^{load} \quad (1)$$

$P_{i,t}^{load}$ 表示节点 i 的配电网的负荷，前三项表示节点 i 上的火电机组、光伏机组、风电机组的出力值， Ω_i^1 为以节点 i 为始端的线路集合， Ω_i^2 为以节点 i 为末端的线路集合。

(4) **火电机组出力约束与爬坡约束**

$$\begin{aligned} P_{i,t}^{cgen,\min} &\leq P_{i,t}^{cgen} \leq P_{i,t}^{cgen,\max} \\ R_{cgen}^{down} &\leq P_{i,t}^{cgen} - P_{i,t-1}^{cgen} \leq R_{cgen}^{up} \end{aligned} \quad (1)$$

$P_{i,t}^{cgen,\min}$ 和 $P_{i,t}^{cgen,\max}$ 分别为输电网火电机组的最小、最大出力值； R_{cgen}^{down} 和 R_{cgen}^{up} 分别为火电机组的最小下坡率和最大上坡率。

火电机组开停机约束²：

1.3 输电网的出清电价计算（LMP）：

结合目标函数，反映出相关成本和收益的边际成本。感觉是对总成本进行节点 i 的发电量的求偏导。

1.4 输电网的碳排放流模型

输电网络中的节点 i 的碳排放强度（**节点碳势**） $NCI_{i,t}$ 包括节点 i 上的传统火电机组 CEF 和流入该节点 i 的所有分支 l 上的 CEF。

¹ 基于广义主从分裂理论与配电网相协同的输电网规划方法

² 考虑输配电网协同的源荷储资源统筹规划

$$NCI_{i,t} = \frac{\sum_{l \in \Omega_i^{in}} P_{l,t} \rho_{l,t} + P_{i,t}^{cgen} \rho_{i,t}^{cgen}}{\sum_{l \in \Omega_i^{in}} P_{l,t} + P_{i,t}^{cgen} + P_{i,t}^{pvgen} + P_{i,t}^{wtgen}} \quad (1)$$

$P_{l,t}$ 是支路 l 上的电功率； $\rho_{l,t}$ 表示支路 l 的碳流密度（碳排放强度，即传输网络中支路传输单位能量到需求侧造成的供给侧的碳排放）， $\rho_{i,t}^{cgen}$ 是传统火电机组的碳排放强度（参数，光伏风力机组碳强度为 0，微型涡轮机组的碳排放强度可以计算，公式在下面）。 Ω_i^{in} 为流入节点 i 的支路集合。

支路是碳流密度等于流入该之路的首节点碳势。

对于传统火电机组的碳排放强度 $\rho_{i,t}^{cgen}$ ，应进一步考虑到该机组的碳排放强度不是一成不变。实际上，传统火电机组的实际能源生产与碳排放包括三个阶段³：启动、运行、关闭

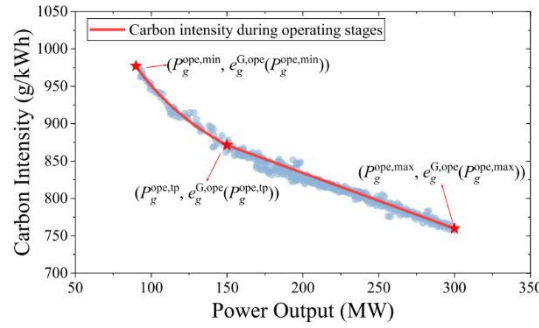


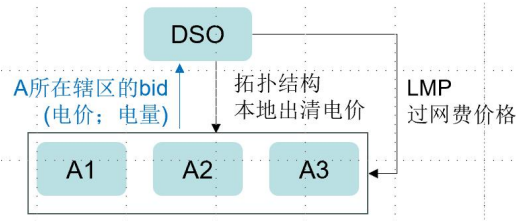
Fig. 3. The curve of carbon intensity and its power output.

阶段。实际上，火电机组的输出功率越接近设计容量，其效率越高。

那么，传统火电机组的碳排放强度定义⁴如下：

$$\rho_{i,t}^{cgen} = \begin{cases} \frac{e^{g,up} + e^{g,down}}{\sum_t P_{i,t}^{cgen} \Delta t} + \frac{c}{P_{i,t}^{cgen}} + d, P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t}^{cgen} \leq P_{i,t}^{ope} \\ \frac{e^{g,up} + e^{g,down}}{\sum_t P_{i,t}^{cgen} \Delta t} + a P_{i,t}^{cgen} + d, P_{i,t}^{ope} \leq P_{i,t}^{cgen} \leq P_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

2. 配电网-聚合商层级模型



³ Arroyo JM, Conejo AJ. Modeling of start-up and shut-down power trajectories of thermal units. IEEE Trans Power Syst 2004;19(3):1562–8.

⁴ Modeling and evaluation of probabilistic carbon emission flow for power systems considering load and renewable energy uncertainties

上层输电网将 LMP 价格和 NCI 传递到配电网层面。DSO 依据上层传递的 LMP，向下级聚合商 A 进行购售电交易。在此过程中，配电网运营商通过向聚合商 A 收取过网费进行盈利。配电网运营商在此过程中，通过切换开关，实现配电网的最佳拓扑规划，并协调多个聚合商之间的拍卖交易，促进本地能源市场出清，实现聚合商之间的能源共享。由此，构成了 DSO-Aggregators 之间的双层优化模型。

过网费：本文的过网输电费用按照文献 [21] 中的标准制定⁵，依据电力用户接入电压等级对应的省级电网共用网络输配电价（含政策性交叉补贴）扣除分布式发电市场化交易所涉及最高电压等级的输配电价执行。

上下层求解，通过一致性约束。配电网的网络净输入/净输出功率等于产消者的外部总交易量。

连续双边拍卖 CDA 机制：

- （1） 结算规则：clearing house, 当买卖双方全部报价后市场执行匹配；
- （2） 匹配规则：均衡匹配，买家报价从大到小排序，卖家报价从小到大排序，并进行匹配，可以最大化买卖双方的收益⁶。（即遵循价格优先、时间优先原则）
- （3） 定价规则：均衡 k 定价规则；

收费规则：对交易者不收费。（考虑到 DSO 收取了过网费，这里不再设置服务费了）

本文以每小时作为时间间隔，即第 0-1 小时是投标时间，第 1-2 小时是实施期，也是下一个交易周期的投标期。

DSO 作为拍卖商，协调并促进聚合商之间进行**分布式 P2P 电力交易**。聚合商 A1 对其所在辖区产消者能源资源集中管理，统一调度，以总成本最小化为目标，确定其购、售电需求和电价，向 DSO 提交其 bid（购/售电价；购/售电量）。DSO 根据匹配规则，进行订单匹配，直至聚合商购电价格低于卖出价格，或者不再存在匹配的出售或购买订单。

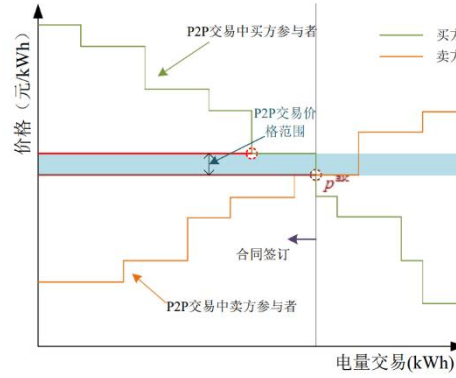
当购买、出售两个订单得到匹配时，出清过程依据 K 定价方法确定，交易电量等于匹配订单之间的最小数量。剩余的电量、不匹配的订单仍保留，在交易期间添加到新订单中，参与新一轮的匹配。这个过程持续 1 小时，直到本周期的投标时间结束。在实施期，未匹配的订单和未执行的订单向 DSO 购电（以节点电价为基础），或者向 DSO 售电（以上网电价为基础）。

⁵ 徐嘉辉，马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40 (8): 17-22, 30.

⁶ McAfee R P. A dominant strategy double auction[J]. Journal of Economic Theory, 1992, 56(2): 434-450.

Require: OBB, OBS

- 1: **Initialize** $i = j = 1$;
- 2: **while** $OBS.sell_price(i) \leq OBB.buy_price(j)$ **do**
- 3: $(transaction_price, transaction_quantity) \leftarrow clearing(i, j)$
- 4: $OBS.sell_quantity(i) \leftarrow OBS.sell_quantity(i) - transaction_quantity$
- 5: **if** $OBS.sell_quantity(i) = 0$
 $i \leftarrow i + 1$
- 6: $OBB.buy_quantity(j) \leftarrow OBB.buy_quantity(j) - transaction_quantity$
- 7: **if** $OBB.buy_quantity(j) = 0$
 $j \leftarrow j + 1$
- 8: **break if**
 $i > \text{length of } OBS \text{ or } j > \text{length of } OBB$
- 9: **end**



2.1 上层 DSO 模型（混合整数二阶锥规划模型）

2.1.1 目标函数

DSO 可以通过改变候选交换机的状态来改变配电网的拓扑结构。网络重新配置能够改善流量和节点电压，并保障配电网的高效运行与交易结果的可行性。配电网运营商以系统运行成本最小化为目标，决策变量为切换开关。总成本包括：与聚合商们的交易成本 C^A ，与输电网的交易成本 C^{tso} ，配电网网络损耗成本 C^{loss} ，切换开关成本 C^{switch} 、过网费收取收益 C^{net} 、碳成本 C^{carbon} 。

$$\begin{aligned}
\min C^{dso} &= C^A + C^{tso} + C^{loss} + C^{switch} - C^{net} + C^{carbon} \\
C^A &= \sum_m \sum_t \chi_{i,t}^{lmp} P_{m,t}^{A,s} - \chi_{i,t}^{lmp} P_{m,t}^{A,b} \\
C^{tso} &= \sum_i \sum_t \chi_{i,t}^{lmp} P_{i,t}^{grid-b} - \chi_{i,t}^{feed-in} P_{i,t}^{grid-s} \\
&\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{grid-s} \leq (1 - \varpi_t^{dso})M \\ 0 \leq P_{i,t}^{grid-b} \leq \varpi_t^{dso}M \end{cases} \\
C^{loss} &= \sum_f \sum_t \chi^{loss} P_{f,t}^{loss}, P_{f,t}^{loss} = I_j \left(\frac{P_{f,t}^2}{V_{j,t}^2} \right) \\
C^{switch} &= \sum_f \sum_t \chi^{switch} \Delta y_{f,t} \\
C^{net} &= \chi^{net} \sum_m \sum_t (P_{m,t}^{A,s} + P_{m,t}^{A,b} + |P_{m \rightarrow n,t}^{A-share}| + |P_{j \rightarrow j',t}^{share}|) \\
C^{carbon} &= \chi^{carbon} CR^{dso}
\end{aligned} \tag{1}$$

其中，下级聚合商均以 LMP 的价格与配电网进行购售电交易。 ϖ_t^{dso} 为 0-1 变量，M 表示极大值，约束限制在 t 时刻 DSO 向 TSO 的购电、售电行为不同时发生。 χ^{loss} 为单位网损成本； $P_{f,t}^{loss}$ 为配电网的线路 f 的功率损失⁷； I_j 表示配电网节点 j 的电阻， $P_{f,t}$ 表示线路 f 的传输功率； $V_{j,t}$ 配电网节点 j 的电压幅值。 χ^{switch} 表示开关行为的成本系数。 χ^{net} 表示配电网运营商收取的单位电量过网费用⁸。 $\Delta y_{f,t}$ 表示开关操作次数。

2.1.2 约束条件

(1) 开关状态/网络结构相关约束⁹（辐射状拓扑约束）

$$\sum_{f \in F} y_{f,t} = J - J_r \tag{1}$$

$$\Delta y_{f,t} = |y_{f,t} - y_{f,t-1}| \tag{2}$$

$$\sum_{f \in F} \sum_t \Delta y_{f,t} \leq opt_{switch} \tag{3}$$

其中， $y_{f,t}$ 为 0-1 变量，F 表示配电网网络中的支路总数，表示线路 f （或者节点 j_1 与节点 j_2 ）的开关连接状态，取值为 0，表示节点 j_1 与节点 j_2 不连接；取值为 1，表示节点 j_1 与节点 j_2 连接。 J 表示配电网网络的节点总数， J_r 表示配电网网络的根节点数量，公式（1）保证了配电网网络保持一个树状结构。公式（2）则核算了相邻时间段的开关状态变化的次数；公式（3）限制了开关状态变化的总量，从而自动消除利润较低的开关操作， opt_{switch} 表示

⁷ A network-secure peer-to-peer trading framework for electricity-carbon integrated market among local prosumers (电阻损失核算公式)

⁸ Security constrained decentralized peer-to-peer transactive energy trading in distribution systems (过网费收取公式)

⁹ Peer-to-peer energy trading among multiple microgrids considering risks over uncertainty and distribution network reconfiguration: A fully distributed optimization method

Maximum action number of branch switches in a single trading period.

(2) 配电网潮流约束

Distflow 支路潮流模型¹⁰无需考虑电压与电流的相位差，主要应用于配电网，适用于辐射状（树状）结构的低压或中压配电网，有利于提高计算效率。基于配电网的 Kirchhoff 定律，考虑了线路的有功功率、无功功率、节点电压、线路损耗。但模型因其非凸性导致求解困难，可将其中电压和电流的非线性项二阶锥松弛，可以无损近似其非线性潮流方差，便于快速求解。

$$\sum_{j'' \in \text{head}(j')} P_{j' \rightarrow j'',t} = \sum_{j \in \text{end}(j')} (P_{j \rightarrow j',t} - I_{j \rightarrow j'}^2 A_{j \rightarrow j',t}^2) - P_{j',t}^{\text{load}} \quad (1)$$

$$\sum_{j'' \in \text{head}(j')} Q_{j' \rightarrow j'',t} = \sum_{j \in \text{end}(j')} (Q_{j \rightarrow j',t} - r_{j \rightarrow j'} A_{j \rightarrow j',t}^2) - Q_{j',t}^{\text{load}} \quad (2)$$

$$V_{j',t}^2 = V_{j,t}^2 - 2(I_{j \rightarrow j'} P_{j \rightarrow j',t} + r_{j \rightarrow j'} Q_{j \rightarrow j',t}) + (I_{j \rightarrow j'}^2 + r_{j \rightarrow j'}^2) A_{j \rightarrow j',t}^2 \quad (3)$$

$$(P_{j \rightarrow j',t})^2 + (Q_{j \rightarrow j',t})^2 = (A_{j \rightarrow j',t} V_{j,t})^2 \quad (4)$$

其中， $P_{j \rightarrow j',t}$ 和 $Q_{j \rightarrow j',t}$ 分别表示配电网分支 jj' 的有功功率、无功功率，方向为从节点 j 流向节点 j' ； $P_{j',t}^{\text{load}}$ 和 $Q_{j',t}^{\text{load}}$ 分别表示在配电网节点 j' 处积及分布式电源出力的净流出有功负荷、无功负荷； $I_{j \rightarrow j'}$ 、 $A_{j \rightarrow j'}$ 、 $r_{j \rightarrow j'}$ 分别表示线路电阻、电流、电抗。 $V_{j,t}$ 表示节点 j 的电压。公式（1）表示在任意节点 j 和时间 t ，流出的有功功率（包括电阻损耗）等于流入的有功功率加上该节点的交易电量。公式（2）表示在任意节点 j 和时间 t ，流出的无功功率（包括电抗损耗）等于流入的无功功率加上该节点的交易电量。欧姆定律在任意支路 jj 上的应用，描述了电压降与有功功率、无功功率以及电流的关系（公式 3-4）。

模型松弛与重构：

公式（1）和（2）换成公式（5）-（6）

为了防止零注入孤立节点的存在，将公式（1）和（2）进行改进，如下：

$$\sum_{j'' \in \text{head}(j')} P_{j' \rightarrow j'',t} = \sum_{j \in \text{end}(j')} (P_{j \rightarrow j',t} - I_{j \rightarrow j'}^2 A_{j \rightarrow j',t}^2) - P_{j',t}^{\text{load}}, |P_{j',t}^{\text{load}}| \geq \delta \quad (5)$$

$$\sum_{j'' \in \text{head}(j')} Q_{j' \rightarrow j'',t} = \sum_{j \in \text{end}(j')} (Q_{j \rightarrow j',t} - r_{j \rightarrow j'} A_{j \rightarrow j',t}^2) - Q_{j',t}^{\text{load}}, |Q_{j',t}^{\text{load}}| \geq \delta \quad (6)$$

其中， δ 表示一个很小的正数，用于认为设定所有节点的注入量必须大于等于 δ 。由于 δ 很小，对实际求解影响可以忽略不计，便可避免孤立节点的存在，从而保障系统可靠性和安全性。

¹⁰ Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J] IEEE Transactions on power delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

公式（3）换成公式（7）

公式（3）只适用于封闭的分支结构。原因是即使线路 jj' 断开， $V_{j,t}$ 与 $V_{j',t}$ 被迫相等，这在配电网网络的最优潮流问题求解时是不切实际的。因此，采用大 M 方法松弛公式（3）。

$$\begin{aligned} (y_{j \rightarrow j',t} - 1)M_3 &\leq V_{j,t}^2 - V_{j',t}^2 - 2(I_{j \rightarrow j'}P_{j \rightarrow j',t} + r_{j \rightarrow j'}Q_{j \rightarrow j',t}) + (I_{j \rightarrow j'}^2 + r_{j \rightarrow j'}^2)A_{j \rightarrow j',t}^2 \\ (1 - y_{j \rightarrow j',t})M_4 &\geq V_{j,t}^2 - V_{j',t}^2 - 2(I_{j \rightarrow j'}P_{j \rightarrow j',t} + r_{j \rightarrow j'}Q_{j \rightarrow j',t}) + (I_{j \rightarrow j'}^2 + r_{j \rightarrow j'}^2)A_{j \rightarrow j',t}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

公式（4）导致模型非凸非线性，因此，基于基尔霍夫电压定律的一个松弛形式，将有功功率和无功功率的关系转换为一个二次锥问题。这是一个二阶锥不等式，用于将上一个公式转换为一个更易于求解的形式（cvx 工具箱）。即公式（4）换成（8）

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{j \rightarrow j',t} \\ 2Q_{j \rightarrow j',t} \\ A_{j \rightarrow j',t}^2 - V_{j,t}^2 \end{bmatrix} \right\|_2 \leq A_{j \rightarrow j',t}^2 + V_{j,t}^2 \quad (8)$$

(3) 配电网网络安全约束

$$V_{j,\min} \leq V_{j,t} \leq V_{j,\max} \quad (1)$$

$$A_f^{\min} y_{f,t} \leq A_{f,t} \leq A_f^{\max} y_{f,t} \quad (2)$$

$$P_{f,t}^2 + Q_{f,t}^2 \leq y_{f,t} c_f^2 \quad (3)$$

公式（1）表示配电网节点 j 的电压幅值受上下限约束（电压幅值的上限、下限）；公式（2）表示线路 f 的支路电流约束；公式（3）表示线路 f 的支路容量约束。 c_f 表示线路 f 的线路容量（每条线路都有一定传输容量，若实际传输容量过大，将使得电线严重发热导致线路损耗增加且容易损伤输电线）。

进一步将支路容量约束公式（3）修改成电流幅值约束公式（4）替代。

$$A_{f,t}^2 \leq y_{f,t} \bar{i}_f^2$$

\bar{i}_f 是支路 f 的电流幅值限值。

(4) 分支条件约束（确保线路断开时功率为 0）：

$$\begin{aligned} -y_{j \rightarrow j',t} M_1 &\leq P_{j \rightarrow j',t} \leq y_{j \rightarrow j',t} M_1 \\ -y_{j \rightarrow j',t} M_2 &\leq Q_{j \rightarrow j',t} \leq y_{j \rightarrow j',t} M_2 \end{aligned}$$

(5) DSO 与上下级的购售电平衡约束

$$\begin{aligned} \sum_m P_{m,t}^{A,s} &= P_{i,t}^{grid-s} \\ \sum_m P_{m,t}^{A,b} &= P_{i,t}^{grid-b} \end{aligned}$$

表示在 t 时刻，DSO 向聚合商的购电总量等于 DSO 向 TSO 的售电量；聚合商向 DSO 的购电总量等于 DSO 向 TSO 的购电量。从而，DSO 保持中间商的角色，促成聚合商与输电网络层级的能量传递。

2.2 下层聚合商

产消者内部用户资源、发用电特性不同。在不同时段，未达到市场交易准入的资源可以通过集体联盟参与组建，共同达到准入量。

2.2.1 目标函数

每个 DSO 下由 m 个聚合商管辖相应区域，（1）聚合商-产消者：在**集中式的能源共享**框架中，聚合商将所在辖区范围的分布式能源、需求响应等进行集中管理、统一调度，进而实现不同能源资源的协同，是实现分布式能源供需平衡的重要途径。（2）聚合商-聚合商：聚合商之间在 DSO 的协调下进行**分布式 P2P 能源共享**。

聚合商 m 的目标是通过所在辖区内部优化和与其他聚合商的共享交易，以利润 R^A 的**期望值**最大化为目标，同时满足内部产消者供需平衡约束。成本包括：与 DSO 的交易收益/成本 R^{dso} 、与其他聚合商之间的共享交易收益/成本 $C^{A-share}$ 、因与 DSO 和其他聚合商能源交易交付的过网费 C^{net} 、辖区内部资源调度的相关成本 $\sum C_i^{pro}$ 。

$$\begin{aligned} \max \sum_{\omega} R_{\omega}^A P_{\omega} \\ R_{\omega}^A &= R^{dso} - C^{A-share} - C^{net} - \sum_j C_j^{pro} \\ R^{dso}(\omega) &= \sum_m \sum_t \chi_{i,t}^{imp}(\omega) P_{m,t}^{A,s}(\omega) - \chi_{i,t}^{imp}(\omega) P_{m,t}^{A,b}(\omega) \\ \begin{cases} 0 \leq P_{m,t}^{A,s} \leq (1 - \varpi_t^{Am}) M \\ 0 \leq P_{m,t}^{A,b} \leq \varpi_t^{Am} M \end{cases} \\ C^{A-share} &= \sum_m \sum_t \chi_{i,t}^{cp} P_{m \rightarrow n,t}^{A-share} \\ C^{net} &= \chi^{net} \sum_m \sum_t (P_{m,t}^{A,s} + P_{m,t}^{A,b} + \frac{1}{2} |P_{m \rightarrow n,t}^{A-share}|) \end{aligned}$$

聚合商与配电网之间的电力买 $P_{m,t}^{A,b}$ 、卖 $P_{m,t}^{A,s}$ 交易均以 LMP 的价格支付，且需要支付相应

电力的过网费。M 为极大值， ϖ_t^{Am} 为 0-1 变量，表示聚合商与配电网之间的电力交易的状态，即控制聚合商不同时间向配电网进行买、卖电交易。 $\chi_{i,t}^{cp}$ 表示聚合商之间电力共享的价格，即本地能源市场的电力出清价格。 $P_{m \rightarrow n,t}^{A-share}$ 表示聚合商 m 与聚合商 n 之间的共享电力，小于 0，表示聚合商 m 向聚合商 n 出售电力；大于 0，表示聚合商 m 向聚合商 n 购电。值得说明的是，聚合商 m 与聚合商 n 之间共享电力，产生的过网费，则需要由聚合商 m 与聚合商 n 共同承担，一人一半。

聚合商 m 所管辖区的产消者 j 的总成本：本文考虑了产消者配备燃气轮机、光伏发电、风力发电、云储能、需求响应。产消者 j 的总成本包含向聚合商 m 支付的管理费、其设备调度成本、需求响应带来的不舒适成本、储能的租赁成本、集群内部产消者之间的能源共享成本、因产消者之间进行能源共享需要支付给 DSO 的过网费、与配电网的交易成本、碳成本组成。

$$\begin{aligned}
C_j^{pro} &= C_j^{mana} + C_j^{om} + C_j^{dr} + C_j^{ces} + C_j^{share} + C_j^{net} + C_j^{grid} + C_j^{carbon} \\
C_j^{om} &= \sum_t \chi^{gas} y_{j,t}^{gas} + \sum_k \sum_t [a_j^{mt} (P_{j,t}^k)^2 + b_j^{mt} P_{j,t}^k + c_j^{mt}] \\
C_j^{dr} &= \sum_t \kappa^{dr} |P_{j,t}^{load} - P_{j,t}^{load*}| \Delta t \\
C_j^{ces} &= \frac{\chi_{sto}^{ces} P_j^{sto,max} + \chi_{sts}^{ces} P_j^{sts,max}}{365} + \sum_t \chi_{sts}^{ces*} (P_{j,\omega,t}^{stsc} + P_{j,\omega,t}^{std}) \\
C_j^{share} &= \sum_t \sum_{j \neq j'}^J \chi_{j \rightarrow j',t}^{share} P_{j \rightarrow j',t}^{share} \\
C_j^{net} &= \sum_t \sum_{j \neq j'}^J \frac{1}{2} \chi_{j \rightarrow j',t}^{net} |P_{j \rightarrow j',t}^{share}| \\
C_j^{grid} &= \sum_t \chi_{i,t}^{dso-b} P_{j,\omega,t}^{grid-b} - \chi_{i,t}^{dso-s} P_{j,\omega,t}^{grid-s} \\
C_j^{carbon} &= \chi^{carbon} (E_j^{self} + \alpha_j E_l - E_j^{cea})
\end{aligned} \tag{1}$$

其中， χ^{gas} 表示天然气购买价格（\$/m³）； χ_{sto}^{ces} 和 χ_{sts}^{ces} 分别表示云储电单位容量租赁价格（元/kWh*年）、单位功率租赁价格（元/kW*年）； $P_j^{sto,max}$ 和 $P_j^{sts,max}$ 分别表示租赁的云储电容量（kWh）和功率（kW）。 χ_{sts}^{ces*} 表示电池充放电成本（元/kW）。 $\chi_{j \rightarrow j',t}^{share}$ 表示产消者 j 与产消者 j' 之间的共享电力的价格（不重要，求和就没这一项了）； $P_{j \rightarrow j',t}^{share}$ 表示产消者 j 与产消者 j' 之间的共享电力，大于 0，表示产消者 j 向产消者 j' 购能；小于 0，表示产消者 j 向产消者 j' 售能。

2.2.2 约束条件

(1) 聚合商内部供需平衡约束：

$$\begin{aligned}
\sum_j (P_{j,t}^{mt} + P_{j,t}^{pv} + P_{j,t}^{wt} + P_{j,t}^{std}) + P_m^{A,b} + \sum_{m,n \neq n} P_{m \rightarrow n,t}^{A-share} &= \sum_j (P_{j,t}^{load} + P_{j,t}^{stsc}) + P_m^{A,s} \\
P_m^{A,b} &= \sum_j P_{j,t}^{grid-b} \\
P_m^{A,s} &= \sum_j P_{j,t}^{grid-s} \\
P_{m \rightarrow n,t}^{A-share} &= \sum_j P_{j \in m \rightarrow z \in n}^{A-share}
\end{aligned}$$

左侧表示聚合商 m 内部产消者发电、放电的加和，从 DSO 的购电量、以及向其他聚合商的购买的共享电力。右侧表示聚合商 m 内部的需求响应后的电负荷、发电量的加和，向 DSO 的售电量。公式（2）和公式（3）分别表示辖区 m 中，聚合商向 DSO 的购电量、售电量等于产消者们向配电网购电量、售电量之和。公式（4）表示聚合商 m 向聚合商 n 的共享电量等于辖区 m 中所有产消者向辖区 n 内部的产消者的共享电力之和，同样， $P_{j \in m \rightarrow z \in n,t}^{A-share}$ 大于 0，表示产消者 j 向产消者 z 购电；小于 0，表示产消者 j 向产消者 z 售电。

(2) 聚合商竞价约束

$$\begin{aligned}
\chi_t^{feed-in} &\leq \chi_t^{m,b} \leq \chi_t^{lmp} \\
\chi_t^{feed-in} &\leq \chi_t^{m,s} \leq \chi_t^{lmp}
\end{aligned}$$

聚合商 m 投标的电价介于 LMP 和上网电价之间。

(2) 聚合商之间共享电量约束（容量限制 or 功率限制？--都有）

$$0 \leq P_{j \rightarrow j',t}^{share}, P_{j \in m \rightarrow z \in n,t}^{A-share} \leq C_f$$

产消者之间（即节点之间的）的共享电量受 DSO 提供的网络容量约束。 C_f 表示配电网线路 f 的容量。

reinforcement learning-driven local transactive energy market for distributed energy resources

(3) 产消者 j 的设备出力约束

3a-燃气轮机发电约束（发电约束、爬坡约束）：

$$\begin{aligned}
P_{j,\omega,t}^{mt} &= y_{j,\omega,t}^{gas} \eta^{mt} Q^{gas}, \forall j, \omega, t \\
P_j^{down} &\leq P_{j,\omega,t}^{mt} - P_{j,\omega,t-1}^{mt} \leq P_j^{up}, \forall j, \omega, t
\end{aligned} \tag{1}$$

$P_{j,\omega,t}^{mt}$ 代表在典型日 ω 下产消者 j 在 t 时刻的燃气轮机发电的输出功率（kW）； $y_{j,\omega,t}^{gas}$ 表示天然气的购买量（ m^3 ）； η^{mt} 表示发电效率； Q^{gas} 表示天然气的燃烧热值； P_j^{up} 和 P_j^{down} 分别表示向上和向下的爬坡功率。

3b-光伏发电约束（有功功率）：

$$P_{j,\omega,t}^{pv} = P_j^{pv} SI_{\omega,t} [1 - 0.0037(0.03125 SI_{\omega,t} + T_{\omega,t} - 25)] / 1000, \forall j, \omega, t \quad (1)$$

$P_{j,\omega,t}^{pv}$ 代表在典型日 ω 下产消者 j 在 t 时刻的光伏发电的输出功率 (kW); P_j^{pv} 表示产消者 j 配置的光伏容量; $SI_{\omega,t}$ 表示太阳辐照度 (W/m^2); $T_{\omega,t}$ 表示环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

光伏发电无功功率：与风力发电类似。

3c-风力发电约束（有功功率）：

$$P_{j,\omega,t}^{wt} = \begin{cases} 0, 0 \leq s_{\omega,t} \leq s_{ci} \text{ \& } s_{\omega,t} \geq s_{co} \\ P_j^{wt} \frac{s_{\omega,t} - s_{ci}}{s_r - s_{ci}}, s_{ci} \leq s_{\omega,t} \leq s_r, \forall j, \omega, t \\ P_j^{wt}, s_r \leq s_{\omega,t} \leq s_{co} \end{cases} \quad (1)$$

$P_{j,\omega,t}^{wt}$ 代表在典型日 ω 下产消者 j 在 t 时刻的风力发电的输出功率 (kW); P_j^{wt} 表示产消者 j 配置的风机容量; $s_{\omega,t}$ 表示风速 (m/s); s_{ci} , s_{co} , s_r 分别表示风机的切入风速、切出风速和额定风速 (m/s)。

风力发电无功功率：

风力发电机可简化处理为 PQ 节点，假定通过风电机组中电容器的自动投切，可使功率因数恒定不变，无功功率如下：

$$Q_{j,\omega,t}^{wt} = \frac{P_{j,\omega,t}^{wt}}{\tan \varphi} \quad (1)$$

φ 为功率因数角，一般位于第四象限， $\tan \varphi$ 为负值。

3d-设备出力约束（有功+无功）：

$$0 \leq P_{j,\omega,t}^k \leq P_{j,\omega,t}^{k,\max}, \forall j, \omega, t, k = \{mt, pv, wt\} \quad (1)$$

$$(P_{j,\omega,t}^k)^2 + (Q_{j,\omega,t}^k)^2 \leq (S_{j,\omega,t}^k)^2, \forall j, \omega, t, k = \{mt, pv, wt\} \quad (1)$$

S^k 是发电设备的装机容量， Q 表示无功功率。

(4) 产消者 j 云储能相关约束¹¹

随着共享经济理念的流行，云储能这一商业模式受到关注。相比于用户分散的投资自建储能，云储能运营商可以集中投建储能，使用户共享储能，实现储能规模化管理，通过规模效应、信息优势和用户需求时空互补，实现整体成本的降低。云储能用户可以向云储能运营商购买云储能服务，根据服务类型的不同，可以分为买断制与按量收费制。其中，买断制一次性购买一定功率容量和一定能量容量的云端虚拟储能，而按量收费制则是根据

¹¹ Optimal operation of distribution networks and multiple community energy prosumers based on mixed game theory

实际的使用量来收费，本文主要研究后者。云储能服务提供商与用户之间通过通信和金融系统进行信息和费用交换，并与电网和热网络下的能源进行交互。

4a-租赁容量与租赁功率约束：

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_j^{sts,\max} \leq P_i^{sts,\max}, \forall j \\ 0 &\leq P_j^{sto,\max} \leq P_i^{sto,\max}, \forall j \end{aligned} \quad (1)$$

$P_i^{sts,\max}$ 和 $P_i^{sto,\max}$ 为配电网 i（区域 i）下的租赁云储能电功率限额（kW）和容量租赁限额（kWh）。

4b-各时段的储能电池能量动态变化：

$$\begin{aligned} P_{j,\omega,t}^{sto} &= P_{j,\omega,t-1}^{sto} + P_{j,\omega,t}^{stsc} \eta^{ch} - P_{j,\omega,t}^{stsd} / \eta^{dis}, \forall j, \omega, t \\ 0 &\leq P_{j,\omega,t}^{sto} \leq P_j^{sto,\max} \end{aligned} \quad (1)$$

$P_{j,\omega,t}^{sto}$ 表示产消者 j 在 t 时刻的储能电池电量（kWh）； $P_{j,\omega,t}^{stsc}$ 和 $P_{j,\omega,t}^{stsd}$ 分别为储能的充电和放电功率（kW）。 η^{ch} 和 η^{dis} 分别为充电和放电效率。

4c-考虑到储能电池的运行寿命，需要对 SOC 进行约束，避免电池过充或过放。

$$\begin{aligned} SOC^{\min} P_j^{sto,\max} &\leq P_{j,\omega,t}^{sto} \leq SOC^{\max} P_j^{sto,\max}, \forall j, \omega, t \\ SOC_{j,\omega,t} &= P_{j,\omega,t}^{sto} / P_j^{sto,\max}, \forall j, \omega, t \\ P_{j,\omega,0}^{sto} &= P_{j,\omega,T}^{sto}, \forall j, \omega, t \\ P_{j,\omega,0}^{sto} &= SOC^0 P_j^{sto,\max}, \forall j, \omega, t \end{aligned} \quad (1)$$

SOCmin, SOCmax 分别为电池最小和最大的荷电状态，分别取值 0.1，0.9。

4d-充放电功率受到储能电池功率容量限制，且不能同时进行充放电。

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{j,\omega,t}^{stsc} \leq \varpi_{j,\omega,t}^{ch} P_j^{sts,\max}, \forall j, \omega, t \\ 0 &\leq P_{j,\omega,t}^{stsd} \leq \varpi_{j,\omega,t}^{dis} P_j^{sts,\max}, \forall j, \omega, t \\ \varpi_{j,\omega,t}^{ch} + \varpi_{j,\omega,t}^{dis} &\leq 1, \forall j, \omega, t \end{aligned} \quad (1)$$

$\chi_{j,\omega,t}^{ch}$ 和 $\chi_{j,\omega,t}^{dis}$ 均为 0-1 变量，用于控制储能装置在某一时刻不能同时充放电； $P_{j,\omega,t}^{sts,\max}$ 表示租赁的储能功率（kW）。

4e-考虑到储能电池的运行寿命，对放电深度进行约束，避免电池的过充或过放。

$$(1 - de_{j,\omega,t}^{sto}) P_j^{sto,\max} \leq P_{j,\omega,t}^{sto} \leq P_j^{sto,\max}, \forall j, \omega, t$$

其中， $de_{j,\omega,t}^{sto}$ 表示放电深度， $P_j^{sto,\max}$ 表示租赁的储能容量（kWh）。

(5) 产消者 j 负荷相关约束：不舒适成本、可中断负荷（空调）、可转移负荷（洗衣机）

5a-实际电负荷与基本负荷、柔性负荷之间的关系：

$$P_{j,\omega,t}^{load} = P_{j,\omega,t}^{load*} + P_{j,\omega,t}^{load-cut} + P_{j,\omega,t}^{load-trans}, \forall j, \omega, t \quad (1)$$

$P_{j,\omega,t}^{load}$ 表示产消者在 t 时刻的电负荷； $P_{j,\omega,t}^{load*}$ 表示最为偏好的电负荷； $P_{j,\omega,t}^{load-cut}$ 和 $P_{j,\omega,t}^{load-trans}$ 分别表示中断的负荷和可转移的负荷。

5b-可中断负荷的约束：

$$-\varepsilon_{j,\omega,t}^{load-cut} P_{j,\omega,t}^{load*} \leq P_{j,\omega,t}^{load-cut} \leq 0, \forall j, \omega, t \quad (1)$$

$\varepsilon_{j,\omega,t}^{load-cut}$ 表示电负荷中断因子。

5c-可转移负荷约束：

$$-\varepsilon_{j,\omega,t}^{load-trans} P_{j,\omega,t}^{load*} \leq P_{j,\omega,t}^{load-trans} \leq \varepsilon_{j,\omega,t}^{load-trans} P_{j,\omega,t}^{load*}, \forall j, \omega, t \quad (1)$$

$$\sum_t P_{j,\omega,t}^{load-trans} = 0, \forall j, \omega, t$$

$\varepsilon_{j,\omega,t}^{load-trans}$ 表示电负荷转移因子。

5d-不舒适成本计算的线性化处理(目标函数那)：

$$\begin{aligned} C_j^{dr} &= \sum_t K^{dr} (P_{j,t}^{load-1} - P_{j,t}^{load-2}) \Delta t \\ P_{j,t}^{load} - P_{j,t}^{load*} + P_{j,t}^{load-1} - P_{j,t}^{load-2} &= 0 \\ P_{j,t}^{load-1} \geq 0, P_{j,t}^{load-2} &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$P_{j,t}^{load-1}$ 和 $P_{j,t}^{load-2}$ 均为辅助变量，以线性化处理绝对值项。

(6) 碳成本相关约束：

6a-碳配额约束（基线法）：

$$E_j^{cea} = P_{j,t}^{mt} B_e F_r \quad (1)$$

B_e 表示电力供应基线值； F_r 为修正因子。

(7) 产消者 j 与 DSO 的电力交易约束（与上级网络不同时购售电）

$$\begin{aligned} 0 \leq P_{j,\omega,t}^{grid-b} &\leq \varpi_{j,\omega,t}^{grid,b} P_{j,\omega,t}^{grid-b,max}, \forall j, \omega, t \\ 0 \leq P_{j,\omega,t}^{grid-s} &\leq \varpi_{j,\omega,t}^{grid,s} P_{j,\omega,t}^{grid-s,max}, \forall j, \omega, t \\ \varpi_{j,\omega,t}^{grid,b} + \varpi_{j,\omega,t}^{grid,s} &\leq 1, \forall j, \omega, t \end{aligned} \quad (1)$$

$P_{j,\omega,t}^{grid-b}$ 和 $P_{j,\omega,t}^{grid-s}$ 分别表示产消者 j 在 t 时刻向配电网运营商的购电量、售电量。 $\varpi_{j,\omega,t}^{grid-b}$ 和 $\varpi_{j,\omega,t}^{grid-s}$ 分别为购电、售电状态的 0-1 变量，共同限制产消者 j 与配电网的购售电交易不同时发生。 $P_{j,\omega,t}^{grid-b,max}$ 和 $P_{j,\omega,t}^{grid-s,max}$ 分别为购售电功率上限（kW）。（要受到上层 DSO 优化出来的拓扑结构的物理限制）

(8) 配电网节点功率平衡（产消者 j 电力平衡约束，有功功率、无功功率平衡）：

$$P_{j,\omega,t}^{mt} + P_{j,\omega,t}^{pv} + P_{j,\omega,t}^{wt} + P_{j \rightarrow j',t}^{share} + P_{j \in m \rightarrow z \in n,t}^{A-share} + P_{j,t}^{grid-b} + P_{j,\omega,t}^{stsd} = P_{j,\omega,t}^{load} + P_{j,\omega,t}^{stsc} + P_{j,\omega,t}^{grid-s}, \forall j, \omega, t$$

$$Q_{j,\omega,t}^{mt} + Q_{j,\omega,t}^{pv} + Q_{j,\omega,t}^{wt} + Q_{j \rightarrow j',t}^{share} + Q_{j \in m \rightarrow z \in n,t}^{A-share} + Q_{j,t}^{grid-b} = Q_{j,\omega,t}^{load} + Q_{j,\omega,t}^{grid-s}, \forall j, \omega, t$$

(9) 碳排放强度模型：

燃气轮机的碳排放强度¹²：

$$\rho_{j,t}^{mt} = C_{ng} C_{co_2} Or \frac{M^{co_2}}{M^c}$$

其中， C_{ng} 是天然气热值(9.7kWh/m³)， C_{co_2} 是单位热值含碳量(0.055)， Or 碳氧化率(0.99)， M^{co_2} 是二氧化碳的摩尔质量（44g/mol）， M^c 是碳的摩尔质量(12g/mol)。

(10) 配电网 CEF 模型：

配电网中的节点 j 的碳排放强度（节点碳势） $NCI_{j,t}$ 包括节点 j 上的燃气轮机 CEF 和流入该节点 j 的所有分支 f 上的 CEF。

$$NCI_{j,t} = \frac{\sum_{f \in \Omega_j^in} P_{f,t} \rho_{f,t} + P_{j,t}^{mt} \rho_{j,t}^{mt}}{\sum_{f \in \Omega_j^in} P_{f,t} + P_{j,t}^{mt} + P_{j,t}^{pvgen} + P_{j,t}^{wtgen}} \quad (1)$$

$P_{f,t}$ 是支路 f 上的电功率； $\rho_{f,t}$ 表示支路 f 的碳流密度（碳排放强度，即配网络中支路传输单位能量到需求侧造成的供给侧的碳排放）， $\rho_{j,t}^{mt}$ 是微型涡轮机的碳排放强度（参数）。 Ω_j^in 为流入节点 j 的支路集合。

CDA 市场中，出清过程是连续，且基于市场参与者之间的信息流和互动。且由于市场机制的灵活性，其竞价行为是随机的，竞价在价格边界内的投标都是可以接受的。CDA 的动态复杂性使得目前难以用传统的分析方法处理海量的信息，聚合商和 DSO 都难以在复杂的市场环境下通过传统方式快速选择出最佳的策略。因此，需要智能算法解决如何高效决策的问题。

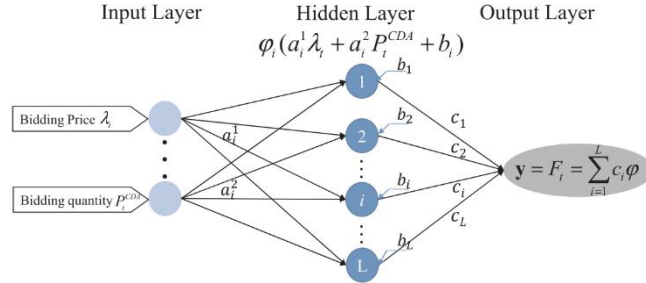
基于数据驱动模型被用于构造输入-输出的映射。极限学习方法是一种有效的机器学习方法，训练速度快、效率高，与其他预测方法（深度学习、支持向量机等）比，ELM 可以线性化数学公式，将非线性优化问题转化为最小二乘问题，并集成到聚合商的优化模型

¹² 基于碳排放流理论的供需联合优化调度策略

中。

因此，构建出基于 ELM 的聚合商最优调度模型。将市场预测约束，整合到聚合商策略优化中，以共同优化产消者、聚合商的调度行为。

(1) 市场预测模型的训练



确定超参数、隐含层、输出层权重等。建立共享交易收益/成本 $C^{A-share}$ 与 bid 之间的映射关系。

$$\psi \mathbf{C} = \mathbf{Y}$$

$$\psi = \begin{pmatrix} \varphi(\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{x}_1 + b_1) & \dots & \varphi(\mathbf{a}_L \cdot \mathbf{x}_1 + b_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi(\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{x}_M + b_1) & \dots & \varphi(\mathbf{a}_L \cdot \mathbf{x}_M + b_L) \end{pmatrix}_{M \times L}$$

(2) 聚合商模型重构：

目标函数中的 $C^{A-share}$ 可以通过映射模型替换为预测值 $\tilde{C}^{A-share}$

将映射模型与聚合商模型的连接：激活函数的选择，把 ELM 作为约束条件加入聚合商模型。

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad \text{激活函数} \quad (34)$$

Thus, the activation function $\varphi(\cdot)$ can be linearized as (35) and (36) by introducing auxiliary 0-1 variables u_{li}^x and u_{li}^b [42]. M is a large constant.

$$\begin{cases} (a_l^{1,x} \lambda_{s,i} + a_l^{2,x} P_i^{CDA,s} + b_l^x)/M < u_{li}^x \\ 1 + (a_l^{1,x} \lambda_{s,i} + a_l^{2,x} P_i^{CDA,s} + b_l^x)/M \geq u_{li}^x \end{cases} \quad l = 1, \dots, L \quad (35)$$

$$\begin{cases} (a_l^{1,b} \lambda_{b,i} + a_l^{2,b} P_i^{CDAB,b} + b_l^b)/M < u_{li}^b \\ 1 + (a_l^{1,b} \lambda_{b,i} + a_l^{2,b} P_i^{CDAB,b} + b_l^b)/M \geq u_{li}^b \end{cases} \quad l = 1, \dots, L \quad (36)$$

$$u_{li}^x, u_{li}^b \in \{0, 1\}, \quad l = 1, \dots, L \quad (37)$$

结果分析：零情报 ZI 情景对比，交易者不能从之前的经验中学习策略，随机选择报价，报价服从均匀分布。

阶段 2: Aggregators-prosumers 聚合商下的利益分配

在集中式能源共享框架下，聚合商根据所有社区参与者所提供的信息，求解辖区成本问题，进而可以确定所有产消者的最佳调度策略，之后利用预定义的支付规则来对能源共享所产生的收益进行分配。

- (1) 夏普利；
- (2) 贡献度；

不确定性集合构建：

光伏、风电出力、电负荷

优化：构建不确定场景→概率潮流下的成本最小优化（成本期望）

随机规划

风速 weibull 分布，太阳辐照 beta 分布，电负荷正态分布¹³。

碳责任分摊：

注入电力系统的碳流包含网损碳排放和终端产消者用电负荷碳排放两部分。

现有的 CEF 论文：依据碳排放流理念，将碳责任从发电侧划分至负荷侧（消费者责任）。

本文将碳责任划分为直接碳责任、间接碳责任、共享碳责任。具体而言：

（1）直接责任：节点承担其自发自用电力引起的直接碳排放。

（2）共享责任：因为产消者之间存在能源共享，电网的潮流分布导致碳排放的转移。承担供给角色的产消者 j 、承担需求角色的产消者 j' 、电网运营商均应承担潮流因起的额外碳排放。（ j 的承担与其售电量相关； j' 的承担与其购电量相关；电网运营商的承担与网损相关）

（3）间接责任：产消者向公用电网（配电网运营商）的购、售电力的相应电量生产造成的碳排放均由产消者承担。

则：

用碳流量进行划分

$$\begin{aligned} NCI_{j,t} &= \frac{\sum_{f \in \Omega_j^{in}} P_{f,t} \rho_{f,t} + P_{j,t}^{mt} \rho_{j,t}^{mt}}{\sum_{f \in \Omega_j^{in}} P_{f,t} + P_{j,t}^{mt} + P_{j,t}^{pvgen} + P_{j,t}^{wtgen}} \\ Cr_j &= \sum_t \rho_{j,t} P_{j,t}^{self-sufficient} + \tau_1 \end{aligned} \quad (1)$$

¹³ Modeling and evaluation of probabilistic carbon emission flow for power systems considering load and renewable energy uncertainties