

计及配电公司特许经营权的产消者点对点交易模型

詹博淳^{1,2}, 冯昌森³, 林哲敏⁴, 邵筱宇⁵, 文福拴^{1,2}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 海南研究院, 海南 三亚 572024;
3. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 4. 安徽电力交易中心有限公司, 安徽 合肥 230009;
5. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230071)

摘要:在针对配电系统层面设计点对点电力交易机制时,需要考虑配电公司所拥有的特许经营权,通过设计适当的网络收费模式有效补偿配电系统基础设施所有者的投资和运行成本。提出一种计及配电公司特许经营权的产消者点对点交易模型。基于配电公司和产消者之间的主从互动关系,建立基于电气距离的过网费定价双层博弈模型,上层为以配电公司收益最大为目标的过网费价格决策模型,下层为考虑过网费的产消者最优调度模型;基于卡罗需-库恩-塔克(KKT)条件将双层博弈模型转化为单层混合整数规划问题,进而得到过网费价格;利用交替方向乘子法分布式求解产消者点对点实时交易电量和交易电价。IEEE 33节点配电系统的仿真结果验证了所提模型能在保证配电系统安全运行的基础上保障所有产消者利益,且能合理补偿配电公司因放弃部分特许经营权而产生的收益损失。

关键词:特许经营权;点对点交易;主从博弈;过网费;KKT条件;交替方向乘子法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202305004

0 引言

国家发展改革委和国家能源局发布的《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》(发改体改〔2022〕118号)^[1],要求健全分布式发电市场化交易机制,鼓励含有分布式光伏、分散式风电等产消主体之间的直接交易,增强就近消纳新能源和安全运行的能力。因此,在遵循市场规律和保障电力系统安全稳定运行的前提下,有必要研究如何针对产消者点对点(peer-to-peer, P2P)交易的特点设计一种安全、透明、公平的市场运行模式和交易机制,这也是现代电力工业市场化改革的重点问题之一^[2-3]。

近年来,为协调电力市场中新兴的产消者,学术界已对其P2P交易开展广泛研究。文献[4-6]提出多产消者P2P交易市场架构。文献[7-8]考虑分布式可再生能源的出力不确定性,建立产消者P2P交易的鲁棒优化模型,P2P交易模型的主要优点是可以使社会效益最大化,但集中式优化方法无法保护产消者隐私。文献[9]建立基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用P2P交易模型,通过自适应步长交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)进行分布式出清。文献[10]建立基于区块链的微电网电能交易机制。文献[9-10]通过分布式算法或区块链平台实现P2P交易出清,

以保护产消者隐私,但并未在P2P交易中考虑网络运行约束。进一步地,文献[11]提出一种能够有效考虑配电系统运行约束的P2P交易机制及其出清方法,但并未在P2P交易中考虑过网费。

现有的过网费定价模型主要有基于邮票法和合同路径法的定价模型^[12-13]、基于配电网节点电价(distribution locational marginal price, DLMP)的定价模型^[14-15]和基于电气距离的过网费定价模型^[16-17]。文献[12]建立基于邮票法并考虑传输电量的过网费价格模型。文献[13]建立基于合同路径法的过网费价格模型。但过网费价格模型难以反映分布式产消者对配电线路的使用程度。文献[14]提出基于最优潮流模型的DLMP模型,但产消者间的P2P交易可能导致最优潮流无可行解。文献[15]建立基于二阶锥松弛的DLMP模型,在过网费中引入惩罚项,通过迭代求解产消者交易计划获得DLMP和相应的过网费价格。基于DLMP模型的过网费价格模型将网络约束以乘子价格信号的形式传递给产消者,激励产消者进行缓解线路阻塞的P2P交易,但计算复杂度较高且有一定程度的计算误差。文献[16-17]建立基于电气距离的过网费定价模型,并对过网费在发电机和负荷之间的分摊等问题进行深入分析。上述研究均未将配电公司和分布式产消者作为独立的利益相关主体,未考虑配电公司运营成本和网络损耗成本的充分回收,难以实现多主体间利益的合理分配。

在上述背景下,本文将配电公司和分布式产消者作为独立的利益主体,将二者的关系建模为主从博弈关系。在考虑监管约束的前提下,将基于电气

收稿日期:2022-12-26;修回日期:2023-05-06

在线出版日期:2023-05-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2403100)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2022YFB2403100)

距离的过网费定价模型引入配电公司的优化决策,从而有效降低配电公司特许经营权的受损量。同时,考虑到配电公司过网费价格决策和产消者P2P交易决策在时间尺度上的差异,利用ADMM实现在给定的过网费价格下产消者间P2P交易的分布式出清。最后,通过算例验证本文所提模型的合理性和有效性。

1 考虑特许经营权损失的过网费定价模型

1.1 配电公司的特许经营

配电公司具有政府赋予的特许经营权^[18],同时,配电公司所管辖地区的所有用户可以建设自备电厂,但自备电厂发的电只能供用户自身使用或卖给电网公司,而不能直接销售给其他用户^[19]。只要辖区内用户需要用电,配电公司就有责任向其供电。

特许经营权损失是由发电方和用户之间的电力交易不通过配电公司所引起的。在P2P交易中,产消者间可直接进行P2P电力交易,配电公司通过收取过网费以及提供电力兜底的售电服务获得收益。特许经营权损失为:

$$f_{\text{loss}} = R_s - R_d \quad (1)$$

$$R_s = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[P_{i,b}^t (\varepsilon_c^t - \varepsilon_{bd}^t) \Delta t - C_{\text{loss}}^t \right] \quad (2)$$

$$R_d = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[P_{i,m}^t (\varepsilon_c^t - \varepsilon_{bd}^t) \Delta t + \sum_{j \in A_p} |P_{ij}^t| \delta_{ij,\text{net}} \Delta t - C_{\text{loss}}^t \right] \quad (3)$$

式中: f_{loss} 为配电公司的特许经营权损失; R_s 为配电公司特许经营权未受损时的售电收入; R_d 为产消者可进行P2P交易时配电公司的总收益,包括售电收入和过网费收入; A_p 为产消者集合; T 为过网费价格优化周期的时段数; $P_{i,b}^t$ 为 t 时段产消者 i 不参与P2P交易时从配电公司的购电功率; ε_c^t 为 t 时段配电公司的售电价格; ε_{bd}^t 为 t 时段配电公司从发电公司的购电价格; Δt 为优化时段的时长; C_{loss}^t 为 t 时段的网损成本; $P_{i,m}^t$ 为 t 时段产消者 i 参与P2P交易时从配电公司的购电功率; P_{ij}^t 为 t 时段产消者 i 与产消者 j 间的交易功率,其值大于0时表示产消者 i 的售电功率,其值小于0时表示产消者 i 的购电功率; $\delta_{ij,\text{net}}$ 为产消者 i 与产消者 j 交易的过网费价格。

1.2 过网费定价模型

假设产消者 i 和产消者 j 进行P2P交易,相应的过网费价格为:

$$\delta_{ij,\text{net}} = \gamma_{\text{net}} C_{ij,\text{MWkm}} \quad (4)$$

式中: γ_{net} 为配电公司决策的过网费价格系数,用于补偿配电公司的特许经营权损失; $C_{ij,\text{MWkm}}$ 为产消者 i 和产消者 j 进行P2P交易的边际兆瓦千米^[11],反映了产消者间的P2P交易对配电线路的使用程度。

$C_{ij,\text{MWkm}}$ 与产消者 i 和产消者 j 所在节点的基本兆

瓦千米^[11]有关,产消者 i 和产消者 j 所在节点的基本兆瓦千米分别为:

$$C_{i,\text{MWkm}} = \sum_{\alpha\beta \in L_d} f_{i,\alpha\beta} l_{\alpha\beta} \quad (5)$$

$$C_{j,\text{MWkm}} = \sum_{\alpha\beta \in L_d} f_{j,\alpha\beta} l_{\alpha\beta} \quad (6)$$

式中: $C_{i,\text{MWkm}}$ 、 $C_{j,\text{MWkm}}$ 分别为产消者 i 和产消者 j 所在节点的基本兆瓦千米; L_d 为区域线路集合; $f_{i,\alpha\beta}$ 、 $f_{j,\alpha\beta}$ 为潮流传递因子,分别表示在产消者 i 所在节点和产消者 j 所在节点增加单位发电功率并在任意选取的参考节点增加单位负荷功率时线路 $\alpha\beta$ 的潮流,其值通过交流潮流模型进行计算; $l_{\alpha\beta}$ 为线路 $\alpha\beta$ 的基准长度,其值通过将线路电压等级和线路类型按照成本比例折算到基准线路进行计算^[19]。

为使各节点的基本兆瓦千米与选取的参考节点位置无关,同时使进行P2P交易的产消者 i 和产消者 j 各分摊过网费的一半,本文采用修正系数 C_{ij} 修正各节点的基本兆瓦千米。在已知 $C_{i,\text{MWkm}}$ 和 $C_{j,\text{MWkm}}$ 的前提下,可通过式(7)计算得到修正系数 C_{ij} ,进而可得到产消者 i 和产消者 j 进行P2P交易的边际兆瓦千米 $C_{ij,\text{MWkm}}$ 。

$$C_{ij,\text{MWkm}} = \frac{C_{i,\text{MWkm}} \pm C_{ij}}{2} = \frac{C_{j,\text{MWkm}} \mp C_{ij}}{2} \quad (7)$$

2 配电公司与分布式产消者双层博弈框架

2.1 配电公司优化决策模型

配电公司在产消者间进行P2P交易时的收入来源包括售电收入和过网费收入。在满足监管约束的前提下,配电公司通过优化决策过网费价格补偿其特许经营权损失,决策目标为过网费价格优化周期内的总收益最大,即:

$$\max R_d = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[P_{i,m}^t (\varepsilon_c^t - \varepsilon_{bd}^t) \Delta t + \sum_{j \in A_p} |P_{ij}^t| \delta_{ij,\text{net}} \Delta t - C_{\text{loss}}^t \right] - \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[P_{i,m}^t (\varepsilon_c^t - \varepsilon_{bd}^t) + \sum_{j \in A_p} |P_{ij}^t| \delta_{ij,\text{net}} \right] \Delta t - \varphi_{\text{loss}} \sum_{\alpha\beta \in L_d} \sum_{t=1}^T (I_{\alpha\beta}^t)^2 r_{\alpha\beta} \Delta t \quad (8)$$

$$\delta_{\text{net}}^{\min} \leq \delta_{ij,\text{net}} \leq \delta_{\text{net}}^{\max} \quad (9)$$

$$R_d \leq R_s = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[P_{i,b}^t (\varepsilon_c^t - \varepsilon_{bd}^t) \Delta t \right] - \varphi_{\text{loss}} \sum_{\alpha\beta \in L_d} \sum_{t=1}^T (I_{\alpha\beta}^t)^2 r_{\alpha\beta} \Delta t \quad (10)$$

$$\text{s.t. 式(4)—(7)} \quad (11)$$

式中: φ_{loss} 为网络损耗成本系数^[20]; $I_{\alpha\beta}^t$ 为 t 时段线路 $\alpha\beta$ 的电流; $r_{\alpha\beta}$ 为线路 $\alpha\beta$ 的电阻; $\delta_{\text{net}}^{\max}$ 、 $\delta_{\text{net}}^{\min}$ 分别为监管部门制定的过网费价格上限和下限。式(10)用于确保配电公司在特许经营权受损时获得的收益不超过其特许经营权未受损时的收益,以保护分布式产消

者的利益,防止供电公司获取超额补偿。

此外,供电公司应负责产消者间P2P交易的安全约束校核,确保P2P交易结果满足网络约束,即:

$$P'_{\alpha\beta,F} = P'_{\beta,z} + \sum_{\beta\gamma \in L_{\alpha}, \gamma \neq \alpha} P'_{\beta\gamma,F} + (I'_{\alpha\beta})^2 r_{\alpha\beta} \quad (12)$$

$$Q'_{\alpha\beta,F} = Q'_{\beta,z} + \sum_{\beta\gamma \in L_{\alpha}, \gamma \neq \alpha} Q'_{\beta\gamma,F} + (I'_{\alpha\beta})^2 \chi_{\alpha\beta} \quad (13)$$

$$(V'_{\beta})^2 = (V'_{\alpha})^2 - 2(r_{\alpha\beta} P'_{\alpha\beta,F} + \chi_{\alpha\beta} Q'_{\alpha\beta,F}) + (r_{\alpha\beta}^2 + \chi_{\alpha\beta}^2) (I'_{\alpha\beta})^2 \quad (14)$$

$$(I'_{\alpha\beta})^2 (V'_{\alpha})^2 = (P'_{\alpha\beta,F})^2 + (Q'_{\alpha\beta,F})^2 \quad (15)$$

$$V_{\alpha,down}^2 \leq (V'_{\alpha})^2 \leq V_{\alpha,up}^2 \quad (16)$$

$$0 \leq (I'_{\alpha\beta})^2 \leq I_{\alpha\beta,up}^2 \quad (17)$$

式中: $P'_{\alpha\beta,F}$ 、 $Q'_{\alpha\beta,F}$ 分别为 t 时段线路 $\alpha\beta$ 的有功潮流和无功潮流; $P'_{\beta,z}$ 、 $Q'_{\beta,z}$ 分别为 t 时段注入节点 β 的有功功率和无功功率; $\chi_{\alpha\beta}$ 为线路 $\alpha\beta$ 的电抗; V'_{α} 、 V'_{β} 分别为 t 时段节点 α 和节点 β 的电压模值; $V_{\alpha,up}$ 、 $V_{\alpha,down}$ 分别为节点 α 电压模值的上限和下限; $I_{\alpha\beta,up}$ 为 t 时段线路 $\alpha\beta$ 的电流上限。

2.2 计及过网费的产消者优化决策模型

分布式产消者以 T 个优化时段的总成本最小为优化目标,即:

$$\min C_{total} = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T (C'_{i,dg} + C'_{i,bess} + C'_{i,re} + C'_{i,net} + C'_{i,com}) \quad (18)$$

式中: C_{total} 为分布式产消者的总成本; $C'_{i,dg}$ 、 $C'_{i,bess}$ 、 $C'_{i,re}$ 、 $C'_{i,net}$ 、 $C'_{i,com}$ 分别为 t 时段产消者 i 的分布式化石能源发电机成本、电池储能装置成本、可再生能源发电成本、P2P交易的过网费成本和从配电公司的购电费用。

1)分布式化石能源发电机成本 $C'_{i,dg}$ 包括发电成本 $C'_{i,ope}$ 和设备维护成本 $C'_{i,eqi}$,即:

$$C'_{i,dg} = C'_{i,ope} + C'_{i,eqi} = (\varphi_{i,dg}^{ope} P'_{i,dg} + \varphi_{i,dg}^{eqi} P'_{i,dg}) \Delta t = \varphi_{i,dg} P'_{i,dg} \Delta t \quad (19)$$

式中: $\varphi_{i,dg}^{ope}$ 、 $\varphi_{i,dg}^{eqi}$ 、 $\varphi_{i,dg}$ 分别为产消者 i 的发电成本系数、老化损耗系数和总成本系数; $P'_{i,dg}$ 为 t 时段产消者 i 的分布式化石能源发电机有功功率。

2)电池储能装置成本为:

$$C'_{i,bess} = \varphi_{i,bess} (P'_{i,c} + P'_{i,dc}) \Delta t \quad (20)$$

式中: $\varphi_{i,bess}$ 为产消者 i 电池储能装置的运行成本系数; $P'_{i,c}$ 、 $P'_{i,dc}$ 分别为 t 时段产消者 i 电池储能装置的充电功率和放电功率。

3)可再生能源发电成本为:

$$C'_{i,re} = (\varphi_{i,w} P'_{i,w} + \varphi_{i,s} P'_{i,s}) \Delta t \quad (21)$$

式中: $\varphi_{i,w}$ 、 $\varphi_{i,s}$ 分别为产消者 i 风电机组和光伏机组的度电成本; $P'_{i,w}$ 、 $P'_{i,s}$ 分别为 t 时段产消者 i 风电机组和光伏机组的出力。

4)P2P交易的过网费成本为:

$$C'_{i,net} = \sum_{j \in A_p} |P'_{ij}| \delta_{j,net} \Delta t \quad (22)$$

5)从配电公司的购电费用为:

$$C'_{i,com} = P'_{i,m} \varepsilon'_c \Delta t \quad (23)$$

约束条件如下。

1)功率平衡约束,即:

$$\sum_{j \in A_p} P'_{ij} + P'_{i,m} = P'_{i,dg} + P'_{i,dc} - P'_{i,c} + P'_{i,w} + P'_{i,s} - P'_{i,L}; \lambda'_{i,e} \in \mathbf{R} \quad (24)$$

$$P'_{ij} = -P'_{ji}; \lambda'_{ij} \in \mathbf{R} \quad (25)$$

式中: $P'_{i,L}$ 为 t 时段产消者 i 的负荷; $\lambda'_{i,e}$ 、 λ'_{ij} 为约束条件对应的乘子变量。

2)分布式化石能源发电机出力约束,即:

$$P_{i,dg}^{\min} \leq P'_{i,dg} \leq P_{i,dg}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,dg}, \underline{\mu}'_{i,dg} \geq 0 \quad (26)$$

式中: $P_{i,dg}^{\max}$ 、 $P_{i,dg}^{\min}$ 分别为产消者 i 的分布式化石能源发电机出力上限和下限; $\bar{\mu}'_{i,dg}$ 、 $\underline{\mu}'_{i,dg}$ 为约束条件对应的乘子变量。

3)电池储能装置功率约束,即:

$$S'_{i,bess} = S_{i,bess}^{t-1} + \left(\eta_{i,c} P'_{i,c} - \frac{1}{\eta_{i,dc}} P'_{i,dc} \right) \frac{\Delta t}{Q_{i,bess}}; \lambda'_{i,bess} \in \mathbf{R} \quad (27)$$

$$S_{i,bess}^{\min} \leq S'_{i,bess} \leq S_{i,bess}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,bess}, \underline{\mu}'_{i,bess} \geq 0 \quad (28)$$

$$0 \leq P'_{i,c} \leq P_{i,c}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,c}, \underline{\mu}'_{i,c} \geq 0 \quad (29)$$

$$0 \leq P'_{i,dc} \leq P_{i,dc}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,dc}, \underline{\mu}'_{i,dc} \geq 0 \quad (30)$$

式中: $S'_{i,bess}$ 为 t 时段产消者 i 的电池储能装置荷电状态; $\eta_{i,c}$ 、 $\eta_{i,dc}$ 分别为产消者 i 的电池储能装置的充电效率和放电效率; $Q_{i,bess}$ 为产消者 i 的电池储能装置额定容量; $S_{i,bess}^{\max}$ 、 $S_{i,bess}^{\min}$ 分别为产消者 i 的电池储能装置荷电状态的上限和下限; $P_{i,c}^{\max}$ 、 $P_{i,dc}^{\max}$ 分别为产消者 i 的电池储能装置的最大充电功率和最大放电功率; $\lambda'_{i,bess}$ 、 $\bar{\mu}'_{i,bess}$ 、 $\underline{\mu}'_{i,bess}$ 、 $\bar{\mu}'_{i,c}$ 、 $\underline{\mu}'_{i,c}$ 、 $\bar{\mu}'_{i,dc}$ 、 $\underline{\mu}'_{i,dc}$ 为约束条件对应的乘子变量。

4)可再生能源发电机组出力约束,即:

$$(1-h_w) P_{i,w}^{\max} \leq P'_{i,w} \leq P_{i,w}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,w}, \underline{\mu}'_{i,w} \geq 0 \quad (31)$$

$$(1-h_s) P_{i,s}^{\max} \leq P'_{i,s} \leq P_{i,s}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,s}, \underline{\mu}'_{i,s} \geq 0 \quad (32)$$

式中: h_w 、 h_s 分别为风电机组的最大弃风率和光伏机组的最大弃光率; $P_{i,w}^{\max}$ 、 $P_{i,s}^{\max}$ 分别为产消者 i 的风电机组和光伏机组出力上限; $\bar{\mu}'_{i,w}$ 、 $\underline{\mu}'_{i,w}$ 、 $\bar{\mu}'_{i,s}$ 、 $\underline{\mu}'_{i,s}$ 为约束条件对应的乘子变量。

5)交易功率约束,即:

$$-P_{ij}^{\max} \leq P'_{ij} \leq P_{ij}^{\max}; \bar{\mu}'_{ij}, \underline{\mu}'_{ij} \geq 0 \quad (33)$$

$$0 \leq P'_{i,m} \leq P_{i,m}^{\max}; \bar{\mu}'_{i,m}, \underline{\mu}'_{i,m} \geq 0 \quad (34)$$

式中: P_{ij}^{\max} 、 $P_{i,m}^{\max}$ 分别为产消者 i 与产消者 j 间P2P交易功率的上限和产消者 i 从配电公司的购电功率上

限; $\bar{\mu}_{ij}^t$ 、 μ_{ij}^t 、 $\bar{\mu}_{i,m}^t$ 、 $\mu_{i,m}^t$ 为约束条件对应的乘子变量。

2.3 配电公司与分布式产消者的博弈互动机制

在本文建立的配电公司与分布式产消者的双层博弈模型中,上层为配电公司决策模型,下层为分布式产消者优化交易模型,配电公司和分布式产消者的决策行为是两阶段的动态博弈,二者的关系可以用主从博弈模型进行描述,博弈互动架构如图 1 所示。

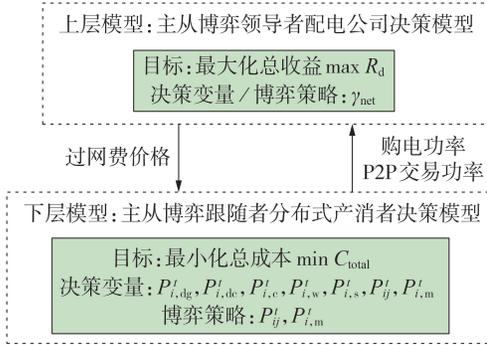


图 1 主从博弈互动架构示意图

Fig.1 Schematic diagram of interaction framework for Stackelberg game

配电公司作为主从博弈的领导者,根据分布式产消者的 P2P 交易需求以及从配电公司的购电需求,将过网费价格系数作为博弈空间。配电公司的博弈策略集 $\nu_d = \{\gamma_{net}\}$ 。分布式产消者作为主从博弈的跟随者,接受过网费价格,其博弈方向为在满足负荷需求的基础上使总成本最小,博弈策略为通过调整各设备出力改变分布式产消者参与 P2P 交易的需求以及从配电公司的购电需求,分布式产消者的博弈策略集 $\nu_i = \{P_{ij}^t, P_{i,m}^t\}$ 。

主从博弈存在唯一均衡解的条件为:博弈参与者的策略集均为非空凸集;在给定领导者/跟随者策略的条件下,跟随者/领导者存在唯一的最优策略。

根据建立的配电公司和分布式产消者的决策模型,配电公司的策略集满足式(8)—(17),过网费价格系数集合为非空凸集,因此各参与者的策略集均为非空凸集,产消者优化交易模型满足式(18)—(34),P2P 交易功率和购电功率集合均为非空凸集。配电公司的效用函数是关于 γ_{net} 的线性函数,分布式产消者效用函数是关于 P_{ij}^t 和 $P_{i,m}^t$ 的线性函数。博弈参与者的效用函数均是关于策略集的非空、连续凸函数。因此,在给定领导者策略的条件下,跟随者存在唯一的最优策略,同时,在给定跟随者策略的条件下,领导者也存在唯一的最优策略。综上,本文建立的主从博弈模型存在唯一的博弈均衡解。

2.4 配电公司与分布式产消者双层博弈模型的求解

利用卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件将下层分布式产消者交易优化模型转化为约束条件,将其纳入上层配电公司决策模型中,并对决策模型进行求解。具体的转化与求解过程如附录 A 所示。

3 产消者 P2P 交易分布式出清

在利用 KKT 条件将双层博弈模型转化为单层模型后,即可确定配电公司在过网费价格优化周期内的最优过网费价格。在每个交易优化周期内,作为跟随者的产消者根据已确定的过网费价格、相关负荷和可再生能源设备发电出力的超短期预测值,优化调度辖区内的各发电设备出力,在满足网络约束的前提下确定给定时段内的 P2P 交易出清电量和价格。不同决策主体的优化周期如附录 B 图 B1 所示。

利用 ADMM 求解计及过网费的产消者 P2P 交易模型,以获得交易周期内的实际 P2P 交易量和交易价格。可以通过引入全局辅助变量 $\bar{P}_{i,z}^t$ 将原问题重构为:

$$\min C_{total} = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^{T_{opt}} C_i(P_{i,opt}^t, P_{i,P2P}^t, P_{i,z}^t, X_i) \quad (35)$$

$$h_i(P_{i,opt}^t, P_{i,P2P}^t, P_{i,z}^t, X_i) \leq 0 \quad (36)$$

$$P_{i,opt}^t = [P_{i,dg}^t, P_{i,dc}^t, P_{i,c}^t, P_{i,w}^t, P_{i,s}^t, P_{i,m}^t]^T \quad (37)$$

$$P_{i,P2P}^t = (P_{ij}^t)_{j \in A_p} \quad (38)$$

$$P_{i,z}^t = P_{i,dg}^t + P_{i,dc}^t - P_{i,c}^t + P_{i,w}^t + P_{i,s}^t - P_{i,L}^t \quad (39)$$

$$g(P_{i,z}^t, Y) \leq 0 \quad (40)$$

$$(P_{ij}^t - P_{ji}^t) / 2 = P_{ij}^t \quad (41)$$

$$\bar{P}_{i,z}^t = P_{i,z}^t \quad (42)$$

式中: T_{opt} 为 P2P 交易优化周期的时段数; C_i 为产消者 i 的用能成本; $P_{i,opt}^t$ 为 t 时段产消者 i 的设备出力和从配电公司的购电功率决策变量矩阵; $P_{i,P2P}^t$ 为 t 时段产消者 i 的 P2P 交易量决策变量矩阵; $P_{i,z}^t$ 为 t 时段产消者 i 注入配电网节点的功率; X_i 为产消者 i 的相关参数; $h_i(P_{i,opt}^t, P_{i,P2P}^t, P_{i,z}^t, X_i)$ 为产消者 i 决策变量相关约束,包括式(24)、(26)—(34); $g(P_{i,z}^t, Y)$ 为网络安全约束,包括式(12)—(17), Y 为配电网的相关参数。式(41)由式(25)改写得到。

将约束式(41)、(42)进行松弛,利用 ADMM 将产消者 P2P 电能模型分解为网络约束问题和产消者优化问题^[20-21],并进行分布式优化求解。基于第 $k-1$ 轮迭代的网络约束问题优化结果 $\bar{P}_{i,z}^{t,k-1}$ 、产消者 j 的优化结果 $P_{jj}^{t,k-1}$ 、乘子变量 $\lambda_{ij}^{t,k-1}$ 和 $\pi_i^{t,k-1}$,在第 k 轮迭代中产消者 i 的优化问题为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{i,\text{opt}}^{t,k} \\ P_{i,\text{P2P}}^{t,k} \\ P_{i,z}^{t,k} \end{bmatrix} = \operatorname{argmin}_{P_{i,\text{opt}}^t, P_{i,\text{P2P}}^t, P_{i,z}^t} \sum_{t=1}^T \left\{ C_i(P_{i,\text{opt}}^t) + \pi_i^{t,k-1} (P_{i,z}^t - \bar{P}_{i,z}^{t,k-1}) + \right. \\ \left. \frac{\rho}{2} (P_{i,z}^t - \bar{P}_{i,z}^{t,k-1})^2 + \sum_{j \in A_p} \left[|P_{ij}^t| \delta_{ij,\text{net}} \Delta t + \right. \right. \\ \left. \left. \lambda_{ij}^{t,k-1} \left(\frac{P_{ij}^{t,k-1} - P_{ji}^{t,k-1}}{2} - P_{ij}^t \right) + \frac{\rho}{2} \left(\frac{P_{ij}^{t,k-1} - P_{ji}^{t,k-1}}{2} - P_{ij}^t \right)^2 \right] \right\} = \\ \operatorname{argmin}_{P_{i,\text{opt}}^t, P_{i,\text{P2P}}^t, P_{i,z}^t} \sum_{t=1}^T \left\{ C_i(P_{i,\text{opt}}^t) + \frac{\rho}{2} (P_{i,z}^t - \bar{P}_{i,z}^{t,k-1} + \frac{\pi_i^{t,k-1}}{\rho})^2 + \right. \\ \left. \sum_{j \in A_p} \left[|P_{ij}^t| \delta_{ij,\text{net}} \Delta t + \frac{\rho}{2} \left(\frac{P_{ij}^{t,k-1} - P_{ji}^{t,k-1}}{2} - P_{ij}^t + \frac{\lambda_{ij}^{t,k-1}}{\rho} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (43)$$

$$C_i(P_{i,\text{opt}}^t) = C_{i,\text{dg}}^t + C_{i,\text{bess}}^t + C_{i,\text{re}}^t + C_{i,\text{com}}^t \quad (44)$$

$$\text{s.t. 式(19)—(24)、(26)—(34)} \quad (45)$$

式中： $P_{i,\text{opt}}^{t,k}$ 、 $P_{i,\text{P2P}}^{t,k}$ 、 $P_{i,z}^{t,k}$ 分别为第 k 轮迭代的 $P_{i,\text{opt}}^t$ 、 $P_{i,\text{P2P}}^t$ 、 $P_{i,z}^t$ ； argmin 表示取最小值时对应的变量值； ρ 为惩罚系数。

基于第 k 轮迭代的所有产消者优化结果 $P_{i,z}^{t,k}$ 和第 $k-1$ 轮迭代的乘子变量 $\pi_i^{t,k-1}$ ，在第 k 轮迭代中网络约束问题为：

$$\bar{P}_{i,z}^{t,k} = \operatorname{argmin}_{\bar{P}_{i,z}^t} \sum_{t=1}^T \frac{\rho}{2} \left(P_{i,z}^{t,k} - \bar{P}_{i,z}^t + \frac{\pi_i^{t,k-1}}{\rho} \right)^2 \quad (46)$$

$$\text{s.t. 式(12)—(17)} \quad (47)$$

基于第 k 轮迭代的产消者优化问题和网络约束问题结果，乘子变量更新规则为：

$$\pi_i^{t,k} = \pi_i^{t,k-1} + \rho (P_{i,z}^{t,k} - \bar{P}_{i,z}^{t,k}) \quad (48)$$

$$\lambda_{ij}^{t,k} = \lambda_{ij}^{t,k-1} + \rho \left(\frac{P_{ij}^{t,k} - P_{ji}^{t,k}}{2} - P_{ij}^t \right) = \lambda_{ij}^{t,k-1} - \frac{\rho (P_{ij}^{t,k} + P_{ji}^{t,k})}{2} \quad (49)$$

由式(49)可知，若迭代开始时设置的初始交易价格 $\lambda_{ij}^{t,0} = \lambda_{ji}^{t,0}$ ，则在迭代收敛时，交易价格 $\lambda_{ij}^t = \lambda_{ji}^t$ 。基于ADMM的P2P交易模型迭代求解全局收敛条件为：

$$r^k = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[\left(P_{i,z}^{t,k} - \bar{P}_{i,z}^{t,k} \right)^2 + \sum_{j \in A_p} \left(P_{ij}^{t,k} + P_{ji}^{t,k} \right)^2 \right] \leq \varepsilon_{\text{pri}} \quad (50)$$

$$s^k = \sum_{i \in A_p} \sum_{t=1}^T \left[\left(P_{i,z}^{t,k} - P_{i,z}^{t,k-1} \right)^2 + \sum_{j \in A_p} \left(P_{ij}^{t,k} - P_{ij}^{t,k-1} \right)^2 \right] \leq \varepsilon_{\text{dual}} \quad (51)$$

式中： r^k 、 s^k 分别为第 k 轮迭代的主残差和对偶残差； ε_{pri} 、 $\varepsilon_{\text{dual}}$ 分别为主残差和对偶残差最大允许值。

综上所述，基于ADMM的计及过网费的产消者P2P交易优化模型的具体求解流程如下。

1) 设置迭代参数初值 $P_{ij}^{t,0}$ 、 $\bar{P}_{i,z}^{t,0}$ 、 $\lambda_{ij}^{t,0}$ 、 $\pi_i^{t,0}$ 和残差最大允许值 ε_{pri} 、 $\varepsilon_{\text{dual}}$ ，并令 $k=1$ 。

2) 在第 k 轮迭代中，产消者 i 基于第 $k-1$ 轮迭代

的网络约束问题优化结果 $\bar{P}_{i,z}^{t,k-1}$ 、产消者 j 的优化结果 $P_{ji}^{t,k-1}$ 、乘子变量 $\lambda_{ij}^{t,k-1}$ 和 $\pi_i^{t,k-1}$ ，按式(43)—(45)优化求解 $P_{i,\text{opt}}^{t,k}$ 、 $P_{i,\text{P2P}}^{t,k}$ 和 $P_{i,z}^{t,k}$ ，并将第 k 轮P2P交易值 $P_{ij}^{t,k}$ 发送给所有与之交易的产消者 j ，同时接受产消者 j 发送的 $P_{ji}^{t,k}$ 。

3) 基于第 k 轮迭代的所有产消者的优化结果 $P_{i,z}^{t,k}$ 和第 $k-1$ 轮迭代的乘子变量 $\pi_i^{t,k-1}$ ，按式(46)、(47)求解网络约束问题，得到 $\bar{P}_{i,z}^{t,k}$ 。

4) 基于第 k 轮迭代的产消者优化问题和网络约束问题结果，按式(48)、(49)更新乘子变量。

5) 分别按式(50)、(51)计算第 k 轮迭代的主残差和对偶残差，判断是否全局收敛。若收敛，则转至步骤6)；否则，令 $k=k+1$ ，并转至步骤2)。

6) 输出计及过网费的产消者P2P交易方案，交易方案包括产消者间的P2P交易电量和交易价格以及从配电公司的购电功率。

4 算例分析

4.1 参数设置

采用改进的IEEE 33节点配电系统进行算例分析。该系统的拓扑结构如附录C图C1所示。假设参与P2P交易的产消者有12个，即产消者A—L，这些产消者分别位于节点2—4、6、9、13、17、20、21、23、28、32。假设每个产消者均配备分布式化石能源发电机、电池储能装置和可再生能源发电设备，各产消者的设备基本参数如附录C表C1所示，其中负荷数据和可再生能源发电设备出力取自文献[11]。为了简化分析过程，本文设置过网费价格优化周期和P2P交易优化周期均为00:00—24:00，P2P交易间隔 $\Delta t=1$ h。线路传输容量数据如附录C表C2所示。电价参数取自文献[15]。其他参数如附录C表C3所示。

4.2 配电网博弈策略分析

图2为不同过网费价格系数下的配电网收益和产消者的P2P交易电量，图中 γ_{opt} 、 γ_{max} 为曲线上2个特殊点的过网费价格系数。由图可知：当过网费价格系数为0时，产消者的P2P交易电量最大，当过网费价格系数增至 γ_{max} 时，产消者的P2P交易电量为0，在这2种情形下的配电网收益来源为售电收入；在过网费价格系数从0增至均衡点的过程中，配电网利润逐渐增加，产消者的P2P交易电量逐渐减少，这反映了配电网在博弈中的领导者地位；当过网费价格系数增至最优过网费价格系数 $\gamma_{\text{opt}}=0.163$ 元/(MW·h·km)时，配电网收益达到最大值，在00:00—24:00交易周期中，从12个产消者获取的过网费和售电收入总共为115.07元，网络损耗成本为6.33元，产消者的总成本为134.86元，继续增

加过网费价格系数会导致配电公司收益下降,这是由于过高的过网费价格抑制了产消者参与P2P交易的需求;在最优策略下,配电公司很好地兼顾了过网费和售电收入,从而使得收益最大化。

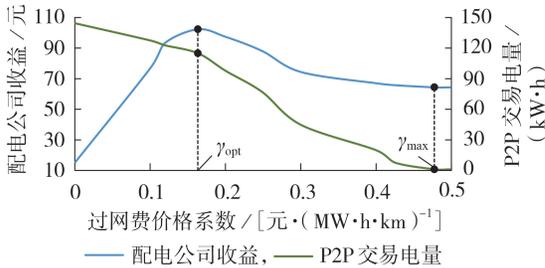


图2 不同过网费价格系数下的配电公司收益和产消者的P2P交易电量

Fig.2 Income of distribution company and P2P transaction power quantity of prosumers under different network fee price coefficients

4.3 分布式产消者的P2P交易分析

12个产消者在00:00—24:00交易周期中的电能消费结构如图3所示,由P2P交易电量、从配电公司的购电量和自产自消电量组成。由图可知:在00:00—08:00,由于可再生能源发电设备的发电量处于低谷期,P2P交易电量在产消者电能消费结构中的占比较低,产消者主要通过调度分布式化石能源发电机和储能装置满足电能需求;在10:00—20:00,可再生能源发电设备的发电量增加,P2P交易电量在产消者电能消费结构中的占比明显提升,这说明通过P2P交易促进了分布式可再生能源的消纳。

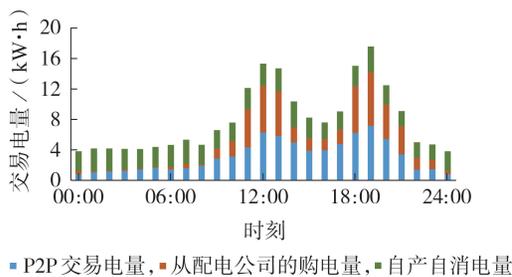


图3 产消者的电能消费结构

Fig.3 Power energy consumption structure of prosumers

图4为产消者的P2P交易平均价格。由图可知:计及过网费的P2P交易平均价格低于配电公司售电价格,通过P2P交易有效减少了产消者购电成本;在00:00—08:00的用电低谷期,P2P交易平均价格更接近平均过网费价格,而在11:00—14:00以及18:00—21:00的用电高峰期,P2P交易平均价格更接近配电公司售电价格,这是由于在用电低谷期产消者的分布式化石能源发电机、储能装置等设备的经济性可调度出力远大于电能需求,产消者从配

公司的购电量很少,而在用电高峰期产消者的电能供需关系紧张,除了通过自调度自产自消以及P2P交易之外,产消者还需要从配电公司购电以满足需求。

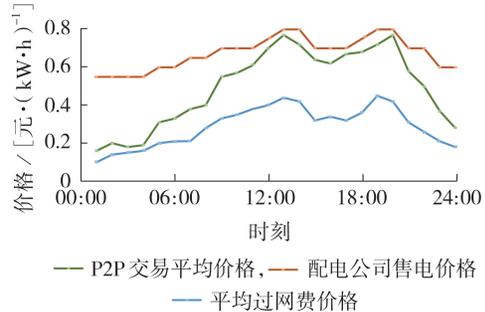


图4 产消者的P2P交易平均价格

Fig.4 Average P2P transaction price of prosumers

图5为12个产消者在24个时段的P2P交易总量,图中“A-B”表示产消者A从产消者B购电,其他以此类推。由图可知,与免收过网费相比,收取过网费后电气距离较近的产消者间的P2P交易电量增加,如P2P交易产消者对A-B、B-J、H-I,同时电气距离较远的产消者间的P2P交易电量明显减少,如P2P交易产消者对B-G、B-L、C-K,这说明所建立的计及过网费的P2P交易模型有利于促进分布式可再生能源的就近消纳,从而也有助于减少远距离电能交易所导致的网络损耗。

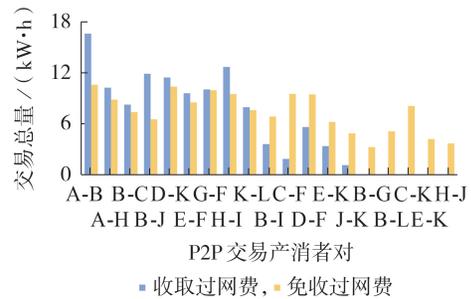


图5 产消者在24个时段的P2P交易总量

Fig.5 Total P2P transaction amount of prosumers in 24 periods

以在18:00—19:00期间产消者的P2P交易结果为例,进一步分析产消者间的供能用能互补特性。结果如附录B图B2所示。产消者生产的电能为其各设备的总发电量,产消者在P2P交易中购、售电时,对应的P2P交易电量分别取正、负。由图可知:与无P2P交易相比,有P2P交易时,有电能需求的产消者生产的电能和从配电公司购买的电能均减少,如产消者C通过从产消者K购电满足了用电需求;有电能盈余的产消者生产的电能反而增加,这是由于在无P2P交易时盈余的可再生能源发电量只能通过储能装置进行存储,产消者的净生产电能仅满足

其自身用电需求,如产消者H通过P2P交易将盈余的电能出售给产消者A和产消者I,产消者H的净生产电能增加了54.8%。由此可见,产消者间的P2P交易实现了产消者间的电能互补,提升了产消者的综合用电效益。

4.4 对比分析

通过对比以下3种交易模式分析所提模型对分布式产消者和配电公司的影响,进而验证所提模型的合理性和可行性:模式1,本文所提P2P交易模型下的模式;模式2,考虑配电公司的特许经营权,分布式产消者间无法直接进行电能交易,而只能自用电或从配电公司购电以满足需求;模式3,产消者间可进行P2P交易,过网费仅按平衡网络损耗成本收取,配电公司提供电力兜底服务。

表1为3种交易模式下的产消者总成本和配电公司收益。图6为3种交易模式下的各产消者成本,图中电力交易成本包括过网费和购电成本。在模式2下,在00:00—24:00的交易周期中,优化后12个产消者从配电公司的总购电需求为203.8 kW·h,电力交易成本为132.53元,调度设备出力成本为60.52元,总成本为193.05元,配电公司收益为121.28元。在模式3下,产消者只需缴纳与网络损耗成本对应的过网费,因而总成本降低,而配电公司收益大幅下降。在模式1下,在00:00—24:00的交易周期中,12个产消者通过分布式成功交易的电能共计114.89 kW·h,产消者成本为134.86元,比模式2下的产消者成本减少30.1%,配电公司的过网费收入为

表1 3种交易模式下的产消者总成本和配电公司收益

Table 1 Total cost of prosumers and income of distribution company under three transaction modes

交易模式	产消者成本/元	配电公司收益/元			特许经营权损失/元
		售电收入	过网费收入	网损成本	
1	134.86	48.76	66.31	6.33	12.54
2	193.05	132.53	0	11.25	0
3	80.77	37.62	9.84	9.84	85.66

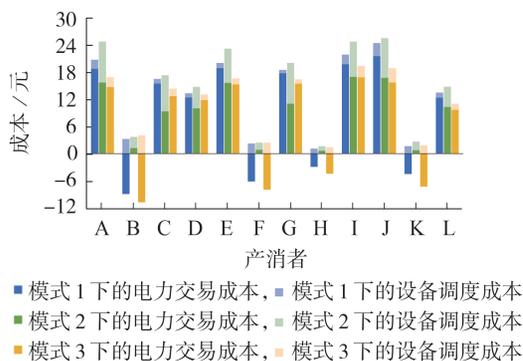


图6 3种交易模式下的各产消者成本

Fig.6 Cost of each prosumer under three transaction modes

66.31元,售电收入为48.76元,网损成本为6.33元,配电公司收益为108.74元,相较于模式3,模式1下的配电公司收益增大1.89倍,特许经营权损失减少85.4%。

上述结果表明,配电公司通过博弈决策优化制定过网费价格,能够最大限度地减少P2P交易导致的特许经营权损失,与配电公司完全专营时相比,产消者可通过分布式P2P交易减少用电成本,从而在最优过网费价格下兼顾了配电公司和产消者的利益。

社会总成本为分布式产消者成本与配电公司成本之和,如式(52)所示。

$$C_{\text{social}}^t = \sum_{i \in A_p} C_i - R_d = C_{i, dg}^t + C_{i, bess}^t + C_{i, re}^t + C_{\text{loss}}^t \quad (52)$$

式中: C_{social}^t 为 t 时段的社会总成本。

以最优过网费价格和社会总成本最低为目标函数的2种模式下的社会总成本如图7所示。由图可知,19:00为2种模式下社会总成本偏差最大的时刻,偏差达到4.26%,在2种模式下24个时段的社会总成本平均偏差为2.37%,即最优过网费价格模式下的社会效益非常接近最优解。

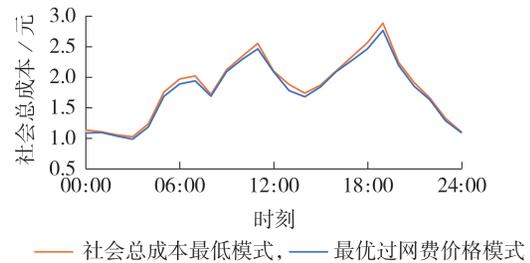


图7 2种模式下的社会总成本

Fig.7 Total social cost under two modes

5 结论

本文建立计及配电公司特许经营权和网络约束的产消者P2P交易模型。通过算例对比分析得到以下结论:

1)本文提出配电公司特许经营权损失的量化评估方法,将配电公司和产消者建模为主从博弈关系,在过网费定价模型中引入配电公司的优化决策,有效减少了配电公司的特许经营权损失;

2)在分析博弈均衡解的存在性与唯一性的基础上,利用KKT条件对双层博弈模型进行转化求解,分析最优过网费价格对产消者的用能成本和社会总成本的影响;

3)利用ADMM对计及过网费的P2P交易模型进行分布式求解,有效保护了产消者隐私,计及过网费的P2P交易有助于促进可再生能源的就近消纳,减少远距离电能交易所导致的网络损耗。

后续笔者拟将所提模型部署在区块链平台中进行仿真分析,同时考虑分布式市场主体提供辅助服务的补偿与收费方式。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见(发改体改[2022]118号)[EB/OL]. (2022-01-18)[2023-04-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/tz/202201/t20220128_1313653.html.
- [2] 国家能源局. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. (2015-03-19)[2023-04-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03-09/content_2831322.htm.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局,国家工信部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. [2016-02-24]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082989.htm.
- [4] 吴毓峰,杨胜春,潘振宇,等. 无协调主体的多产消者完全端到端交易机制[J]. 电力系统自动化,2023,47(3):96-103.
WU Yufeng, YANG Shengchun, PAN Zhenning, et al. Complete peer-to-peer transaction mechanism for multiple prosumers without coordination entity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 96-103.
- [5] SORIN E, BOBO L, PINSON P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 994-1004.
- [6] 张凡,高红均,吴子豪,等. 局域能源市场多产消者P2P交易框架设计[J]. 电力自动化设备,2022,42(12):17-25.
ZHANG Fan, GAO Hongjun, WU Zihao, et al. Design of P2P trading framework for multiple prosumers in local energy market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 17-25.
- [7] MOHAN V, BU S, JISMA M, et al. Realistic energy commitments in peer-to-peer transactive market with risk adjusted prosumer welfare maximization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106377.
- [8] 王善磊,孙国强,吴晨,等. 基于集中-分散交易机制的多产消者两阶段鲁棒优化模型[J]. 电力自动化设备,2022,42(5):175-182.
WANG Shanlei, SUN Guoqiang, WU Chen, et al. Two-stage robust optimization model of multiple prosumers based on centralized-decentralized trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 175-182.
- [9] 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.
- [10] 邓明辉,唐郑熠,黄达,等. 基于区块链的微电网电力交易匹配机制[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):95-101.
DENG Minghui, TANG Zhengyi, HUANG Da, et al. Power transaction matching mechanism of microgrid based on block

chain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 95-101.

- [11] FENG C S, LI Z Y, SHAHIDEHPUR M, et al. Decentralized short-term voltage control in active power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4566-4576.
- [12] ILIĆ M D, YOON Y T, ZOBAN A, et al. Toward regional transmission provision and its pricing in New England[J]. Utilities Policy, 1997, 6(3): 245-256.
- [13] PAN J, TEKLU Y, RAHMAN S, et al. Review of usage-based transmission cost allocation methods under open access[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1218-1224.
- [14] NEMATSHAHI S, MASHHADI H. Distribution locational marginal price analysis considering technical constraints[C]//2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Tehran, Iran: IEEE, 2017: 1021-1025.
- [15] KIM J, DVORKIN Y. A P2P-dominant distribution system architecture[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2716-2725.
- [16] 文安,黄维芳,张皓,等. 英国输电过网费定价机制分析[J]. 南方电网技术,2015,9(8):3-8.
WEN An, HUANG Weifang, ZHANG Hao, et al. Analysis on transmission use of system charging methodology in UK[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8): 3-8.
- [17] 肖江,刘瑞丰,荆朝霞,等. 英国改进的输电过网费定价机制分析[J]. 中国电力,2019,52(2):53-60.
XIAO Jiang, LIU Ruifeng, JING Zhaoxia, et al. Analysis on improved transmission use of system charging methodology in UK[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 53-60.
- [18] 国家发展改革委,国家财政部,国家住房和城乡建设部,等. 基础设施和公用事业特许经营管理办法(发改体改[2015]25号)[EB/OL]. (2015-04-25)[2023-04-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/fzggwl/201504/t20150427_960800.html.
- [19] 全国人大常委会. 中华人民共和国电力法[EB/OL]. (2018-12-29)[2023-04-16]. <http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/201901/t7508bc71261404680b8255a2bbcf839.shtml>.
- [20] BAROCHE T, MORET F, PINSON P. Prosumer markets: a unified formulation[C]//2019 IEEE Milan PowerTech. Milan, Italy: IEEE, 2019: 1-6.
- [21] IRIA J, SCOTT P, ATTARHA A. Network-constrained bidding optimization strategy for aggregators of prosumers[J]. Energy, 2020, 207: 118266.

作者简介:



詹博淳

詹博淳(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场、区块链技术在电力系统中的应用(**E-mail**: zhanbc@zju.edu.cn);

冯昌森(1990—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、人工智能、区块链技术等(**E-mail**: fcs@zjut.edu.cn);

文福拴(1965—),男,教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复、电力市场与电力经济、智能电网与电动汽车等(**E-mail**: fushuan.wen@gmail.com)。

(编辑 王锦秀)

Peer-to-peer transaction model for prosumers considering franchise of distribution company

ZHAN Bochun^{1,2}, FENG Changsen³, LIN Zhemin⁴, SHAO Xiaoyu⁵, WEN Fushuan^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572024, China;

3. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

4. Anhui Power Exchange Center Co., Ltd., Hefei 230009, China;

5. Economic & Technical Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230071, China)

Abstract: When designing peer-to-peer power transaction mechanism for the distribution system level, it is needed to consider the franchise owned by the distribution company, and effectively compensate the investment and operation costs of infrastructure owners of the distribution system by designing appropriate network charging mode. A peer-to-peer transaction model for prosumers considering the franchise of distribution company is proposed. Based on the Stackelberg interaction relationship between distribution company and prosumer, a bi-level game model of network fee pricing based on electrical distance is established, the upper level is a decision-making model of network fee price with the maximum income of distribution company as the object, while the lower level is an optimal dispatch model of prosumers considering network fee. The bi-level game model is transformed into a single level mixed-integer programming problem based on Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition, and then the network fee price is obtained. The alternating direction method of multipliers is used to solve the peer-to-peer real-time transaction power quantity and transaction price of prosumers. The simulative results of IEEE 33-bus distribution system verify that the proposed model can guarantee the benefits of all prosumers on the basis of ensuring the secure operation of distribution system, and can reasonably compensate the income loss caused by giving up a part of franchise of distribution company.

Key words: franchise; peer-to-peer transaction; Stackelberg game; network fee; KKT condition; alternating direction method of multipliers

(上接第157页 continued from page 157)

Adjustable potential analysis model for large industrial users based on FCN-TCN-LSTM fusion

LI Bin¹, MING Yu¹, HAO Yihao¹, CHEN Songsong^{2,3}, WANG Weidong^{2,3}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-energy Carriers Optimization and Interaction Technique,

Beijing 100192, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: It is critical to promote the load management ability of new style power system to carry out time-phased analysis of bi-directional adjustable potential for large industrial users comprehensively considering the influence of regulation cost and price incentive. A model based on the fusion of fully convolutional network (FCN), temporal convolutional network (TCN) and long short-term memory network (LSTM) is established to analyze the adjustable potential of large industrial users. A dataset reconstruction model of fully convolutional network is established, and the selection of large industrial users with high adjustable potential load data is realized based on typical load characteristic indicators. Based on high adjustable potential data set, an improved temporal convolutional network is established, the adjustable potential of large industrial users is analyzed and measured under the influence of regulation cost. The proposed model is verified based on real data, and case results show that the proposed model can analyze the adjustable potential of typical equipments of large industrial users, and the model has high stability and accuracy.

Key words: demand response; adjustable potential; industrial equipment regulation; FCN; TCN; LSTM

附录 A:

基于 KKT 条件求解过网费定价双层博弈模型。式(18)–(34)为下层分布式产消者交易优化模型，通过构造拉格朗日函数得到下层模型的一阶最优性条件如式(A1)–(A8)所示。

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{i,dg}} = \varphi_{i,dg} + \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{i,dg} + \bar{\mu}'_{i,dg} = 0 \quad (A1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{i,c}} = \varphi_{i,bess} - \lambda'_{i,bess} \frac{\eta_{i,c} \Delta t}{Q_{i,bess}} - \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{i,c} + \bar{\mu}'_{i,c} = 0 \quad (A2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{i,dc}} = \varphi_{i,bess} + \lambda'_{i,bess} \frac{\Delta t}{\eta_{i,dc} Q_{i,bess}} + \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{i,dc} + \bar{\mu}'_{i,dc} = 0 \quad (A3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial S'_{i,bess}} = -\lambda'_{i,bess} + \lambda'^{-1}_{i,bess} - \underline{\mu}'_{i,bess} + \bar{\mu}'_{i,bess} = 0 \quad (A4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{i,w}} = \varphi_{i,w} + \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{i,w} + \bar{\mu}'_{i,w} = 0 \quad (A5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{i,s}} = \varphi_{i,s} + \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{i,s} + \bar{\mu}'_{i,s} = 0 \quad (A6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{ij}} = \delta'_{ij,net} + \lambda'_{ij} - \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{ij} + \bar{\mu}'_{ij} = 0 \quad (A7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P'_{i,m}} = \varepsilon'_c - \lambda'_{i,e} - \underline{\mu}'_{i,m} + \bar{\mu}'_{i,m} = 0 \quad (A8)$$

此外，对于下层分布式产消者优化交易模型中的不等式约束条件进行处理，可得互补松弛约束如式(A9)–(A24)所示。

$$0 \leq (P'_{i,dg} - P_{i,dg}^{\min}) \perp \underline{\mu}'_{i,dg} \geq 0 \quad (A9)$$

$$0 \leq (P_{i,dg}^{\max} - P'_{i,dg}) \perp \bar{\mu}'_{i,dg} \geq 0 \quad (A10)$$

$$0 \leq (S'_{i,bess} - S_{i,bess}^{\min}) \perp \underline{\mu}'_{i,bess} \geq 0 \quad (A11)$$

$$0 \leq (S_{i,bess}^{\max} - S'_{i,bess}) \perp \bar{\mu}'_{i,bess} \geq 0 \quad (A12)$$

$$0 \leq P'_{i,c} \perp \underline{\mu}'_{i,c} \geq 0 \quad (A13)$$

$$0 \leq (P_{i,c}^{\max} - P'_{i,c}) \perp \bar{\mu}'_{i,c} \geq 0 \quad (A14)$$

$$0 \leq P'_{i,dc} \perp \underline{\mu}'_{i,dc} \geq 0 \quad (A15)$$

$$0 \leq (P_{i,dc}^{\max} - P'_{i,dc}) \perp \bar{\mu}'_{i,dc} \geq 0 \quad (A16)$$

$$0 \leq [P'_{i,w} - (1-h_w)P_{i,w}^{\max}] \perp \underline{\mu}'_{i,w} \geq 0 \quad (A17)$$

$$0 \leq (P_{i,w}^{\max} - P'_{i,w}) \perp \bar{\mu}'_{i,w} \geq 0 \quad (A18)$$

$$0 \leq [P'_{i,s} - (1-h_s)P_{i,s}^{\max}] \perp \underline{\mu}'_{i,s} \geq 0 \quad (A19)$$

$$0 \leq (P_{i,s}^{\max} - P'_{i,s}) \perp \bar{\mu}'_{i,s} \geq 0 \quad (A20)$$

$$0 \leq (P'_{ij} + P_{ij}^{\max}) \perp \underline{\mu}'_{ij} \geq 0 \quad (A21)$$

$$0 \leq (P_{ij}^{\max} - P'_{ij}) \perp \bar{\mu}'_{ij} \geq 0 \quad (A22)$$

$$0 \leq P'_{i,m} \perp \underline{\mu}'_{i,m} \geq 0 \quad (A23)$$

$$0 \leq (P_{i,m}^{\max} - P'_{i,m}) \perp \bar{\mu}'_{i,m} \geq 0 \quad (A24)$$

由于式(A9)–(A24)所描述的对偶互补约束为非线性约束，可基于 Fortuny-Amat-McCarl 法将其转化为线性约束。以式(A9)为例，通过引入布尔变量 $\psi_{i,dg}^{\min}$ 和一充分大的正数 M ，可将其转化为如下形式：

$$0 \leq \underline{\mu}_{i,\text{dg}}^t \leq M \psi_{i,\text{dg}}^{\min} \quad (\text{A25})$$

$$0 \leq P_{i,\text{dg}}^t - P_{i,\text{dg}}^{\min} \leq M (1 - \psi_{i,\text{dg}}^{\min}) \quad (\text{A26})$$

$$\psi_{i,\text{dg}}^{\min} \in \{0,1\} \quad (\text{A27})$$

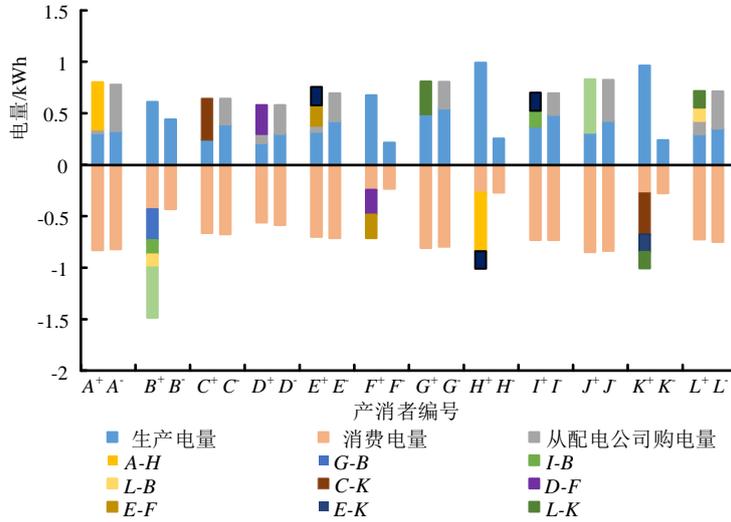
这样，基于上述 KKT 条件，下层分布式产消者交易优化模型已被转化为线性约束，纳入上层供电公司决策模型式(8)-(17)中。过网费定价双层博弈模型被转化为混合整数规划（mixed-integer programming, MIP）模型，可在 MATLAB 环境下调用 CPLEX 求解器求解。

附录 B:



图 B1 不同决策主体的优化周期

Fig.B1 Optimization period of different decision subjects



注：“A⁺”和“A⁻”分别表示 18:00—19:00 期间产消者 a 参与和不参与 P2P 交易的用能结构，其他类似。

图 B2 18:00—19:00 期间产消者 P2P 交易结果

Fig.B2 P2P transaction results during 18:00-19:00

附录 C:

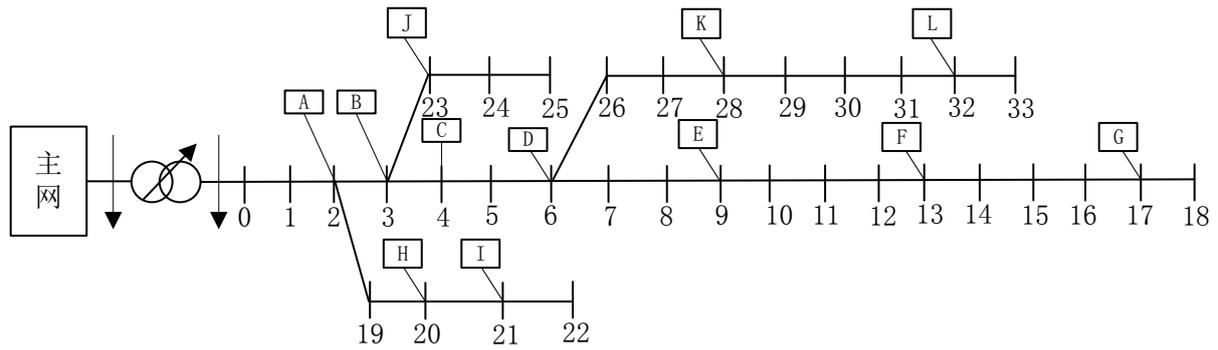


图 C1 IEEE 33 节点配电系统拓扑结构
Fig.C1 Topology of IEEE 33-bus distribution system

表 C1 分布式产消者基本参数
Table C1 Basic parameters of distributed prosumers

参数	参数值	单位
φ_{dg}^{ope}	[1.3,0.8,1.2,1.3,1.0,0.7,1.1,0.5,1.0,1.2,0.6,1.3]	元/ (kW h)
$\varphi_{i,dg}^{eqi}$	0.02	元/ (kW h)
$\gamma_{i,dg}$	5.0	kW/h
φ^{bess}	[1.1,0.6,0.9,1.2,0.7,0.8,0.9,0.4,0.6,0.8,0.3,0.8]	元/ (kW h)
$\eta_{i,c}$	0.95	
$\eta_{i,dc}$	0.90	
$Q_{i,bess}$	6	kW h
$\varphi_{i,w}$	0.01	元/ (kW h)
$\varphi_{i,s}$	0.01	元/ (kW h)
h_s	0.02	
h_w	0.02	
$P_{i,dg}^{max}$	7.50	kW
$P_{i,dg}^{min}$	0.25	kW
$S_{i,bess}^{max}$	0.95	
$S_{i,bess}^{min}$	0.05	

表 C2 线路传输容量
Table C2 Line transmission capacity

线路 $\alpha\beta$	容量/kW	线路 $\alpha\beta$	容量/kW
1 (2,3)	3.6	7 (2,20)	1.8
2 (3,4)	3.6	8 (20,21)	1.8
3 (4,6)	3.6	9 (3,23)	1.8
4 (6,9)	3.0	10 (6,28)	2.7
5 (9,13)	3.0	11 (28,32)	2.7
6 (13,17)	3.0		

表 C3 其他参数
Table C3 Other parameters

ε_{pri}	ε_{dual}	ρ	$\phi_{loss} / [元 \cdot (kW h)^{-1}]$	$\delta_{net}^{max} / [元 \cdot (kW h)^{-1}]$
0.01	0.01	0.02	0.08	0.7