

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221657

基于广义纳什议价价的 V2V 能量交易研究

余岳, 文怀超, 刘郁, 唐继孟

(湖南工业大学轨道交通学院, 湖南 株洲 412000)

摘要: 为解决大量电动汽车(electric vehicle, EV)接入电网或微电网产生额外负荷冲击的问题, 提出了一种基于广义纳什议价(generalized Nash Bargaining, GNB)理论的电动汽车交易模型。在市场中选择将配电网络(distribution network, DN)运营商作为代理, 并在配电网络中安装变压器和并联电容器。DN 运营商可通过变压器和电容器上的有载分接开关来管理网络上的电压和无功功率(voltage and reactive power, Volt-Var)。同时, 市场中允许两种交易方式, 一种是 EV 直接与 DN 进行交易, 另一种是电动汽车之间以点对点(peer to peer, P2P)的方式进行能源交易。最后, 将 GNB 问题分为两个子问题, 即社会福利最大化问题(P1)和能源交易问题(P2), 通过调用遗传算法对 P1 和 P2 进行求解。结果表明, 加入 Volt-Var 后, 社会福利得到了增加, 参与市场的各个代理也获得更公平的利润分配。所提出的模型促进了电动汽车之间的能量交易, 降低了电动汽车无序充电对电网的冲击。

关键词: 广义纳什议价; 能量交易; 网络约束; 电动汽车; V2V

V2V energy trading based on generalized Nash bargaining

YU Yue, WEN Huaichao, LIU Yu, TANG Jimeng

(School of Rail Transit, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: As a large number of electric vehicles generate additional load impact because of their access to the power grid or micro grid, an electric vehicle transaction model based on generalized Nash bargaining (GNB) theory is proposed. In the market, the distribution network (DN) operator is chosen to be the agent. Transformers along with shunt capacitors are also installed in the distribution network. Through the on-load tap changer on the transformers and capacitors, DN operators can manage the voltage and reactive power (Volt VAR) on the network. Moreover, two trading methods are allowed in the market. One is that the electric vehicles trade with the distribution network directly, and the other is the energy trading in a peer-to-peer (P2P) way between electric vehicles. Finally, the GNB problem is divided into two sub problems: a social welfare maximization problem (P1) and an energy trading problem (P2). They can be solved by calling genetic algorithms. As shown in the results, social welfare has increased by joining Volt VAR, and the various agents involved in the market have gained a more equitable distribution of profits. The proposed model promotes energy trading between electric vehicles and reduces the impact of disordered charging of electric vehicles on the power grid.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2022JJ50082).

Key words: generalized Nash bargaining; energy trading; network constraints; electric vehicle; V2V

0 引言

随着电动汽车(electric vehicle, EV)的普及, 未来会有更多的 EV 接入配电网络(distribution network, DN)或微电网, 对 DN 或微电网产生巨大的冲击。EV 之间直接进行能量交易可以缓解 EV 充电对电

网的冲击, 因此成为研究热点。同时 DN 也正经历从无源网络到有源网络的过渡。有源 DN^[1]配备了先进的监测、控制和决策系统, 从而提高了能源交易效率和可靠性。在主动 DN 技术的支持下, 能源消费者能够有效地管理电能存储, 并以点对点(peer to peer, P2P)的方式相互交易能源^[2-3]。在 DN 中, P2P 方式的能源交易可以鼓励生产者分享电能储存, 有利于能源的有效利用和 DN^[4]的供需平衡。

但对于 DN 下消费者之间进行能量交易存在如

基金项目: 湖南省自然科学基金项目资助(2022JJ50082);
湖南省教育厅科学研究项目资助(21C0441)

下问题:

1) 参与交易的买卖双方将如何进行交易,以何种方式进行交易。同时保证提出的交易方式能促进用户间进行能量交易。

2) 交易用户是 EV 时,如何去分析以及解决 EV 接入 DN 时的不确定性、V2V 交易的信息安全、交易公平性。

3) 在 DN 中进行能量交易时,功率传输会带来网络损耗,当大量用户接入 DN 后功率传输会导致网络拥堵。

针对这些问题,学者进行了相关的研究。针对第一个问题,在 P2P 能源交易市场中,一般采用博弈模型(例如 Stackelberg 博弈^[5]、合作博弈^[6]以及拍卖博弈^[7])。纳什议价^[8]也是一种合作博弈,其描述了可能存在目标冲突的多个参与者/代理之间的谈判,以确保比非合作博弈情况下拥有更高的利润,从而建立代理之间的合作。

文献[9]提出了一种基于 M 领导者和 N 追随者的方法,利用 Stackelberg 博弈进行 P2P 能量交易。文献[10]为能源交易模拟了一个 Stackelberg 博弈,生产者和消费者之间的互动由生产者和消费者共同主导,并考虑到不可预测和不确定性的可再生能源(renewable energy, RE)。文献[11]和文献[12]利用博弈均衡来求解 DN 的最优调度,考虑 DN 的动态定价和随机特征,但没有考虑到 EV 且能量交易方式都为非合作博弈。

文献[13]提出了一种 EV 智能有序充放电策略,以 EV 代理商与 EV 用户的合作联盟收益最大为目标,所提策略能够很好地促进 EV 与电网的良性互动。文献[14]建立了具有智能家居和负载消费实体的企业与 EV 之间的交易场景,建立了一个 GNB 模型,以获得普通或摇摆期权合约形式的最优交易策略。但是没有考虑到 EV 参与交易时的不确定性(接入时间和电荷状态),只是将 EV 视为一个可移动的储蓄电池。

针对第二个问题,为解决大量 EV 接入 DN 后无序充电会影响功率平衡导致网络堵塞,文献[15]提出了一种离线和在线调度算法,对单个充电站(charging station, CS)迭代调用,应对 EV 插入时间和电荷状态(state of charge, SOC)的未知中断,并准确预测 RE 生产。为处理 EV 接入 DN 和微电网后的经济运行,文献[16]提出了一种针对 EV 接入微电网(microgrid, MG)后的经济运行模型,建立了计及 EV 有序充放电行为和车主综合满意度的 MG 多目标分层调度数学模型并提出求解计算方法,以促进配电系统中的 V2V 电力交换。分层网络中 EV

的空间关系是 V2V 中需要考虑的因素之一,因此,分层控制在 V2V 的能源交易中得到了广泛的应用。但在电力系统交易当中网络约束十分重要。以上文献都没有考虑。

针对第三个问题,考虑到在网络交易中加入约束以达到控制功率潮流的目的,文献[17]提出了一种基于灵敏度分析的方法,以评估 P2P 交易对网络的影响,通过评定电压灵敏度系数、功率转移分布因子和损失敏感性因子,保证用户不违反网络约束的能量交换,同时用户仍然可以捕捉到 P2P 体系结构的经济效益。文献[18]考虑在 DN 中引入 Volt-VRA 控制设备, DN 运营商通过控制 Volt-VRA 控制设备有载分接开关,积极管理 P2P 交易中电压和无功功率,但并未应用到 V2V 的场景之中。

上述研究围绕 EV 接入 DN 或者微电网的问题,从 DN、EV、非合作博弈、合作博弈、层次控制和元素的随机特征以及网络约束等方面获得了有益研究成果。但是,针对采用 GNB 模型进行能量交易的方法,只考虑到 DN 这一层面并没有考虑单个的 EV 在交易当中也可以成为代理,且在交易当中没有考虑到网络约束。针对这一系列尚未解决的问题,本文进行了补充研究,主要的贡献具体如下:

1) 针对如何促进 V2V 方式的能量交易,提出了一种基于 GNB 的 V2V 能源交易模型,将 EV 作为代理加入到市场交易。同时,考虑 EV 接入 DN 的不确定因素(接入时间和 SOC)以及充放电成本。

2) 针对能量交易所带来的功率潮流堵塞以及损耗等问题,本文在模型中加入了主动配电网络。在交易中, DN 运营商也会作为代理,并且在配电网络各节点安装了 Volt-VRA 控制设备,通过管理电压以及无功功率使社会福利得到增加,使得 DN 运营商会积极管理网络潮流。

3) 将 GNB 问题分成两个子问题,即社会福利最大化问题(P1)和能源交易问题(P2)。通过调用 Python 中 Geapy 工具包来对其求解,进一步提高了解的近似性。

1 拟议的 GNB 市场模型

拟议的能源交易模型中包括 3 种类型代理: DN 运营商、买家和卖家。DN 运营商可通过控制安装在 DN 内的变压器和并联电容器的开关,积极协调买卖双方之间的电力流动。图 1 为模型的两种能源交易方式, EV 再分为买家和卖家,按照传统的方式,买家可以按 C^b 的价格从 DN 购买能源,卖家以价格 C^s 将电能卖给 DN; 另外,按照 V2V 方式,买卖双方按 C_{ij} 交易能源,双方需要支付 r_{ij} 网络使用费。

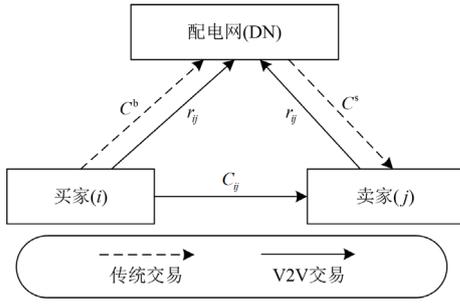


图1 EV交易方式

Fig. 1 Electric vehicle trading mode

价格 C_{ij} 和 r_{ij} 是具有上界和下界的决策变量。在一些相关研究中, 根据分配局部边际价格^[3]、功率损耗^[19]、功率传输距离^[20]等方法计算得到网络使用费。过高的网络使用价格阻碍了买卖双方进行能源交易, 而过低的价格阻碍了 DN 提供 V2V 电力交付服务。

1.1 配电网设置

1) 买方卖方

在本文中 DN 可以作为每一个节点的代理, 其作用是聚合本地可控需求以及供应。DN 各节点装有充电桩, 充电桩安装了智能电表用来收集 EV 的 SOC 以判定 EV 的充放电状态。将一个区域中所有的 EV 归为一个集合 N , 日常出行的 EV 根据自己的 SOC 判断充放电状态, 充电的 EV 为买家, 放电的 EV 为卖家。将所有买家归为一个集合 N_b , 同样地, 将所有的卖家归为集合 N_s , 并且 $N = N_b \cup N_s$, $N_b \cap N_s = \emptyset$, 定义 i 为买家且 $i \in N_b$, j 为卖家且 $j \in N_s$ 。

作为买家的 EV 所购买的能量总量用 P_{ci}^{ch} 表示, 可以得到

$$P_i^b + \sum_{j \in N_s} P_{ij} = P_{ci}^{ch}, \frac{-P_{ci}^{ch}}{t} - P_i^L = p_i \quad (1)$$

$$P_i^b \geq 0, P_{ij} \geq 0, 0 \leq P_{ci}^{ch} \leq \omega_i P_{ci}^{ch, \max} \quad (2)$$

$$\omega_i = \begin{cases} 1, P_{it} \leq t \leq P_{oT} \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_i^b 为在 t 时刻节点 i 从 DN 购买的电量; P_{ij} 为节点 i 从其他 EV 处所购买的电量; P_i^L 为节点 i 处的有功功率负载; p_i 为节点 i 处注入的有功功率; $P_{ci}^{ch, \max}$ 表示 EV 充电的最大容量, EV 的充电情况将在第 2 节详细介绍; ω_i 表示 EV 插入状态参数, EV 完成充电出发时间或开始充电时间分别称为 PoT (Plug-out Time) 或 PiT (Plug-in Time), 分别用 P_{oT} 和 P_{iT} 表示。EV 到达充电桩时的荷电状态称为 PiS

(Plug-in SOC), 若 EV 充电状态位于 P_{iT} 和 P_{oT} 之间, 则 $\omega_i = 1$, 否则 $\omega_i = 0$ 。

对于卖家 j 及 $j \in N_s$, 作为卖家的 EV 售出的总电量为

$$P_j^s + \sum_{i \in N_b} P_{ij} = P_{ci}^{dis}, \frac{P_{ci}^{dis}}{t} - P_j^L = p_j \quad (4)$$

$$P_j^s \geq 0, 0 \leq P_{ci}^{dis} \leq \omega_i P_{ci}^{dis, \max} \quad (5)$$

式中: P_{ci}^{dis} 表示作为卖家的 EV 售电量总和; P_j^s 为 EV 出售给 DN 的电量; P_j^L 为卖家的有功功率负载; p_j 为卖家注入网络的有功功率; 同样 EV 放电量受自身的电池容量限制, $P_{ci}^{dis, \max}$ 为 EV 允许的最大放电量。

2) 配电网约束

本文考虑了一个平衡的径向 DN^[3,19], 并且讨论了 DN 的一个单相位由图 2 给出。市场模型和能源交易结果都是基于单视角。DN 中每一个节点 i 都能被 $i \in N$ 检索。其中节点 i 的父节点被定义为 A_i , 子节点集用 S_i 表示, 父节点与子节点之间加入变压器。节点 i 和节点 A_i 之间的分支也被 $i \in N$ 索引。DN 中的潮流^[21]可以用 DistFlow 方程式(6)~(9)来表示, 通过约束条件(10)使电压和电流在允许的范围之内。

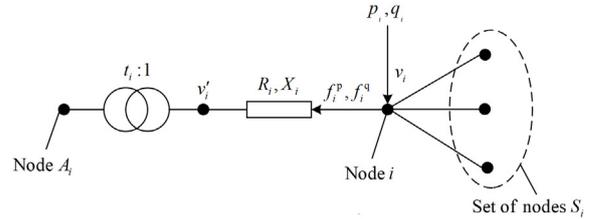


图2 一个带有变压器的分支结构

Fig. 2 A branch structure with a transformer

$$f_i^p = \sum_{j \in S_i} (f_j^p - R_j l_j) + p_i \quad (6)$$

$$f_i^q = \sum_{j \in S_i} (f_j^q - X_j l_j) + q_i \quad (7)$$

$$v' = v_i - 2(R_i f_i^p + X_i f_i^q) + (R_i^2 + X_i^2) l_i \quad (8)$$

$$l_i v_i = (f_i^p)^2 + (f_i^q)^2 \quad (9)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max}, 0 \leq l_i \leq l_i^{\max} \quad (10)$$

式中: f_i^p 和 f_i^q 分别为节点 i 与节点 A_i 之间分支上的有功功率和无功功率; f_j^p 和 f_j^q 分别为节点 i 与各子节点之间的有功功率和无功功率; p_i 和 q_i 为节点 i 注入有功功率和无功功率; R_i 和 X_i 分别为节点 i 与节点 A_i 之间分支处的电阻和电抗; R_j 和 X_j 分别为节点 i 与各子节点之间的电阻和电抗; v' 为节

点 i 与节点 A_i 之间变压器次级侧电压幅值的平方;
 v_i 为节点 i 处电压幅度的平方; l_i 为节点 i 上电流的平方; l_j 为节点 i 的各子节点上电流的平方。

DN 运营商可以通过操纵变压器或者电容器的开关来约束网络潮流维持功率平衡。所有安装变压器的分支用 $N_T \in N$ 表示。对于分支 $i \in N_T$ 有

$$V_{A_i} = t_i^2 v_i', t_i \in \{T_{i,n}\}_{n=1}^{N_{T,i}} \quad (11)$$

式中, V_{A_i} 为父节点上电压幅值的平方; t_i 表示变压器的匝数比(见图 2), $t_i \in \{T_{i,n}\}_{n=1}^{N_{T,i}}$ 是 t_i 的离散选项的集合。如果分支 i 没有变压器, 即 $i \in N/N_T$, 则

$$V_{A_i} = v_i' \quad (12)$$

同样, 带有分流电容器的节点集用 $N_C \subseteq N$ 表示。节点 i 有电容器表示为 $N_{C,i}$, $i \in N_C$, 电容器 $N_{C,i}$ 的磁化率用 $B_{i,n}$ 表示。定义 $B_i := \{B_{i,n}\}_{n=1}^{N_{C,i}}$, 设 b_i 为连接到节点 i 的磁化率, 相应注入的无功功率由 $b_i v_i$ [22] 给出。对于节点 $i \in N_C$, 有

$$q_i = b_i v_i - Q_i^L, b_i = \sum_{n=1}^{N_{C,i}} B_{i,n} X_{i,n}^C, X_{i,n}^C \in \{0,1\} \quad (13)$$

式中: Q_i^L 为节点 i 处的无功功率负载; $X_{i,n}^C$ 为二进制变量, 表示电容器 $N_{C,i}$ 是否与节点 i 相连。如果节点 i 没有电容器, 即 $i \in N \setminus N_C$, 那么对于没有电容器的用户, 有

$$q_i = -Q_i^L \quad (14)$$

1.2 利润设置

买家: 用 u_i 表示买家的效用。根据文献[23]选用二次函数表示作为买家的 EV 使用单位能量的效用参数。买家的效用为

$$u_i = U_i P_{ei}^{\text{ch}}, U(P_{ei}^{\text{ch}}, \omega) = \begin{cases} \omega P_{ei}^{\text{ch}} - \frac{\alpha}{2} (P_{ei}^{\text{ch}})^2 & \text{if } 0 \leq P_{ei}^{\text{ch}} < \frac{\omega}{\alpha} \\ \frac{(P_{ei}^{\text{ch}})^2}{2\alpha} & \text{if } P_{ei}^{\text{ch}} \geq \frac{\omega}{\alpha} \end{cases} \quad (15)$$

式中, ω 和 α 为效用值参数。对于 EV 还需考虑电池退化成本, 其主要受温度、电流和 SOC 等的影响。文献[24-25]尝试通过数据驱动预测以及电池平均损耗的方法来评估 EV 充电所带来的电池退化成本。因此作为买家的 EV 利润可以表示为

$$f_i = u_i - C^b P_i^b - \sum_{j \in N_s} (C_{ij} + r_{ij}) P_{ij} - \partial(\hat{L}_i^{n,\text{ev}}) \quad (16)$$

$$\partial(\hat{L}_i^{n,\text{ev}}) = r_i^n \lambda^{\text{EV}} P_{ei}^{\text{ch}} + (1 - r_i^n) \lambda^{\text{EV}} P_{ei}^{\text{dis}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} r_i^n = 1, n \in N_b \\ r_i^n = 0, n \in N_s \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\hat{L}_i^{n,\text{ev}}$ 表示由于频繁的充放电影响电池的寿命而导致的 EV 的成本; λ^{EV} 表示电池的充放电成本系数。因为 EV 不能在一个时间间隔 t 内同时进行买卖, 因此, 使用 r_i^n 来估计条件。

卖家: 用 c_j 来表示作为卖家的成本[26], 可得

$$c_j = C_j P_{ej}^{\text{dis}}, C_j (P_{ej}^{\text{dis}}) = a (P_{ej}^{\text{dis}})^2 + b P_{ej}^{\text{dis}} + c \quad (19)$$

式中: C_j 为卖家的成本系数; a 、 b 、 c 为买家成本参数。售电方的 EV 利润可表示为

$$f_j = C^s P_j^s + \sum_{i \in N_b} (C_{ij} - r_{ij}) P_{ij} - \partial(\hat{L}_i^{n,\text{ev}}) - c_j - \partial(\hat{L}_i^{n,\text{ev}}) \quad (20)$$

式中, C^s 是向 DN 出售功率的价格。买方 i 和卖方 j 都须平等支付网络使用的费用 r_{ij} 。买卖双方进行能量交易的价格以及双方支付平等的网络使用费用有以下约束:

$$\begin{cases} C^{\min} \leq C_{ij} \leq C^{\max} \\ r^{\min} \leq r_{ij} \leq r^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

DN 运营商: DN 作为代理, 其成本 c_{DN} 主要包括从主电网(高压系统)购电的费用、功率损耗以及变压器和并联电容器的运行成本, 其成本表达式如式(22)。

$$c_{\text{DN}} = -P_{\text{HV}} f_1^p + C_{\text{LS}} \sum_{i \in N} R_i L_i + c_T + c_C \quad (22)$$

式中: f_1^p 、 P_{HV} 分别为从高压系统购买的有功功率及其价格; C_{LS} 为功率损耗系数; c_T 和 c_C 分别为变压器和电容器的运行成本, 表达式如式(23)所示。

$$\begin{cases} c_T = \sum_{i \in N_T} C_i^T |t_i - t_i^1| \\ c_C = \sum_{j \in N_C} \sum_{n=1}^{N_{C,j}} C_{i,n}^C |X_{i,n}^C - X_{i,n}^{C,1}| \end{cases} \quad (23)$$

式中: C_i^T 和 $C_{i,n}^C$ 分别为节点上运行变压器或者电容器成本系数; t_i^1 和 $X_{i,n}^{C,1}$ 分别表示设备的初始位置和状态。DN 的利润定义为式(24), 为已收到的付款减去成本 c_{DN} 。

$$f_{\text{DN}} = \sum_{j \in N_b} \sum_{j \in N_s} 2r_{ij} P_{ij} + C^b \sum_{j \in N_b} P_j^b - C^s \sum_{j \in N_s} P_j^s - c_{\text{DN}} \quad (24)$$

2 EV 充电模型

对于进行能量交易的 EV 必须要考虑以下参数: PiT、PoT 和 PiS。

2.1 插入时间和拔插时间的分布

应用数理统计的方法分析 EV 的不确定性, 可

将 EV 的不确定参数进行统计并建模成一个马尔可夫链模型^[27]。

ω_t 的随机特征对 EV 的充放电有重要影响。对动态的 PiT 和 PoT 建立马尔可夫链模型, 如式(25)所示。变量 $\varepsilon(t)$ 和 $\delta(t)$ 分别为 PiT 和 PoT 的转移概率。例如, 状态转换 $\Phi_{10} (\omega_t = 1 \text{ 到 } \omega_{t+1} = 0)$, 其在时刻 t 内转换概率的大小为 $\varepsilon(t)$ 。

$$\begin{cases} \Phi_{xy} = P_r[\omega_{t+1} = x | \omega_t = y, t], x, y \in \{0, 1\} \\ \Phi_{10} = P_r[\omega_{t+1} = 0 | \omega_t = 1, t] = \varepsilon(t) \\ \Phi_{01} = P_r[\omega_{t+1} = 1 | \omega_t = 0, t] = \delta(t) \\ \Phi_{11} = P_r[\omega_{t+1} = 1 | \omega_t = 1, t] = 1 - \varepsilon(t) \\ \Phi_{00} = P_r[\omega_{t+1} = 0 | \omega_t = 0, t] = 1 - \delta(t) \end{cases} \quad (25)$$

根据 EV 每日驾驶时间表^[28]的分析, EV 过渡概率的时间分布如图 3 所示。PoT 集中在 06:45—08:30 左右。PoT 的均值为 07:40AM(7.66 h), 标准差(std)为 0.57 h。PiT 分布在 17:30—20:00 达到峰值, 均值为 06:38PM(18.64 h), 标准偏差为 0.89 h。

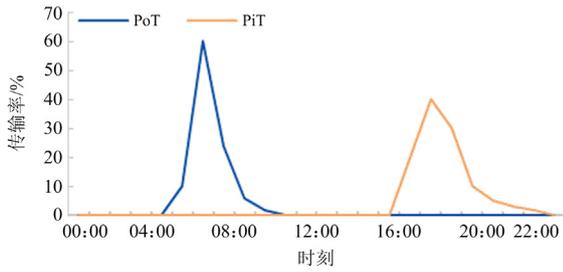


图 3 PoT 和 PiT 的分布

Fig. 3 Release of both PoT and PiT

2.2 EV 的 PiS 分布

在工作日开始时, EV 在一定的 SOC 下离开充电桩, SOC 随行驶距离的增加而减少。当 EV 在一天结束后返回到充电桩时, 出发前的 SOC(Plug-out SOC, PoS)是后续市场能量交易中需要考虑的重要参数。但是, PiS 不能直接计算, 因为 PiS 不仅与出发前的 SOC 有关, 而且还与一天的 EV 里程有关。因此, 本文将 EV 的 SOC 的不确定性集中在行驶距离的不确定性上。里程的不确定性由文献[13,27-29]进行统计数据分析后的建模得到。

综上所述, EV 的 SOC 状态决定了 EV 在交易中的角色。同时 PiS 对后续的调度非常重要。在 PiT 处的 EV 电池的 PiS 主要受行驶距离的影响。驾驶距离 D 主要用于计算式(26)中的 P_{is} 。

$$P_{is} = (P_{os} - \frac{D}{D_r}) \geq S_{OC, ev}^{\min} \quad (26)$$

式中: P_{is} 表示 PiS 时的 SOC; P_{os} 和 D_r 分别代表 PoT

的 SOC 和 1 kWh 驱动 EV 行驶的距离(6.7 km/kWh); $S_{OC, ev}^{\min}$ 代表最低 SOC 的限制。EV 电池充满电时为 $S_{OC, ev}^{\max}$ 。根据美国交通部的调查数据(National Household Travel Survey, NHTS)^[30]的统计分布, EV 充电状态的不确定性由 D 来描述。给定 P_{os} 下 PiS 和 PoS 的转移概率分布如图 4 所示。EV 充电和电池容量限制应满足式(27)。

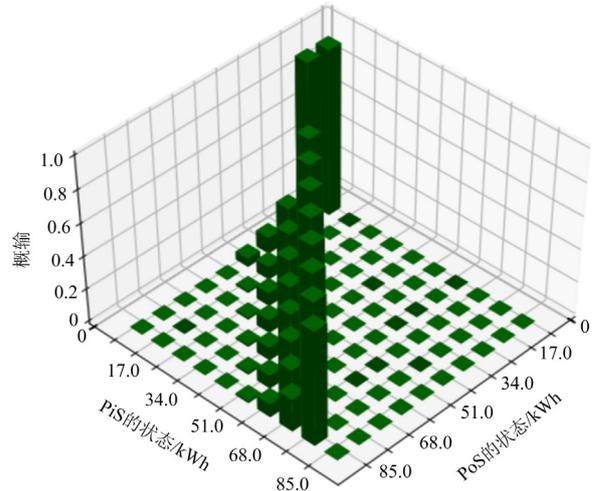


图 4 PiS 和 PoS 的转移概率分布

Fig. 4 Transfer probability distribution of PiS and PoS

$$\begin{cases} \Psi_{ab} = P_r[P_{is} = S_{OC, a} | P_{os} = S_{OC, b}] \\ S_{OC, a}, S_{OC, b} \in S \\ S = \{S_{OC, t+1}^{ev} = S_{OC, t}^{ev} + \Delta t w_t P_{ei, k}^{ch} \eta^{EV} \\ S_{OC, ev}^{\min} \leq S_{OC, t}^{ev} \leq P_{is} \leq S_{OC, ev}^{\max}, \forall t\} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $S_{OC, a}$ 、 $S_{OC, b}$ 分别表示 EV 接入和离开时的 SOC 状态; $S_{OC, t}^{ev}$ 、 $S_{OC, t+1}^{ev}$ 分别为 EV 充放电前后的 SOC 状态; η^{EV} 代表能量交换的效率; Ψ_{ab} 是 $P_{is} = S_{OC, a}$ 且 $P_{os} = S_{OC, b}$ 的概率。

3 纳什议价市场

纳什议价用于解决合作利润的分配问题。文献[19,31-32]证明了讨价还价的问题, 对于纳什议价问题其前提就是达成“协议”, 其内容包括约定行为以及利润分配。本文考虑在约定行为的前提下进行利润分配。同时纳什议价有以下 4 个公理。

1) 对称性。两个难以区分的参与者应该在解决方案中得到相同的回报。

2) 帕累托效率。任何解决方案都不应该低效, 双方都有改进的空间。如果没有其他观点对两个参与者都一样好, 并且至少对一个参与者严格地更好,

那么解决方案是有效的。

3) 无关替代方案的独立性。较大子集中的首选解决方案仍然是较小子集中的首选解决方案。

4) 等价效用变换的不变性。收益并不依赖于实际数字, 而是依赖于对结果的潜在偏好。

上述 4 个公理定义了纳什议价问题具有合理的唯一解。

3.1 广义纳什议价问题

在纳什议价的基础上, 为了进行更公平的利润分配, 本文允许各个代理人根据自己的需求响应具有不同的议价能力。最后根据代理的议价能力进行利润分配^[18]。设 $A := \{DN\} \cup N_b \cup N_s$ 表示所有代理的集合, GNB 问题可以表述为

$$\text{GNB: } \max_{\varphi_1, \varphi_2} \prod_{\ell \in A} (f_\ell - f_\ell^\circ)^{\alpha_\ell}$$

$$\text{s.t. (1)–(24), (27), } f_\ell \geq f_\ell^\circ, \forall \ell \in A$$

式中: f_ℓ 为代理参与合作时的利润, f_ℓ° 指代理不参加合作时的利润; $(f_\ell - f_\ell^\circ)$ 为净利润; α_ℓ 为代理的议价能力, DN 的议价能力设置为 $\alpha_{DN} = \sigma$ 、买家为 $\alpha_i = (1 - \sigma)P_{ci}^{\text{ch},*} / M$ 、卖家为 $\alpha_j = (1 - \sigma)P_{cj}^{\text{dis},*} / M$ 且 $M = \sum_{i \in N_b} P_{ci}^{\text{ch},*} + \sum_{j \in N_s} P_{cj}^{\text{dis},*}$ 。带有*的量由决策变量 φ_1 提供。为求解 GNB 问题, 将 GNB 问题分成两个子问题: 社会福利最大化问题(P1)和能源交易问题(P2)。 φ_1 和 φ_2 分别为 P1 或者 P2 的决策变量。GNB 问题是一个非凸的混合整数非线性规划问题, 但它有一个重要的性质, 如命题 1 所示, 可用于简化问题求解。

命题 1: 设 $\{\varphi_1^*, \varphi_2^*\}$ 是 GNB 问题的最优解。 φ_1^* 也是 P1 的最优解, 实现最大的社会福利 W^* 。

证明: 设 ρ_ℓ 表示代理收到的付款总额。其利润 f_ℓ 可以表示为

$$f_\ell = w_\ell + \rho_\ell \quad (28)$$

式中, w_ℓ 为各代理对社会福利 W 的贡献。假设 $\sum_{\ell \in A} \rho_\ell = 0$, $\sum_{\ell \in A} (f_\ell - f_\ell^\circ) = W - F^\circ$ 表示所有净利润之和, 式中 $F^\circ = \sum_{\ell \in A} f_\ell^\circ$ 。由于支付具有零和属性, 对于任何固定的支付结果 $\{\rho_\ell\}_{\ell \in A}$, 总是存在 $\{\lambda_\ell\}_{\ell \in A}$ 使得:

$$\sum_{\ell \in A} \lambda_\ell = 1, f_\ell - f_\ell^\circ = \lambda_\ell (W - F^\circ), \forall \ell \in A \quad (29)$$

市场中必须有 $W > F^\circ$ 和 $f_\ell > f_\ell^\circ$, 否则代理将没有参与市场的积极性, 再有 $\lambda_\ell > 0$, 于是可将 GNB 问题的目标函数表述为

$$\prod_{\ell \in A} [\lambda_\ell (W - F^\circ)]^{\alpha_\ell} \quad (30)$$

再对其进行进一步转化为对数式:

$$\sum_{\ell \in A} \alpha_\ell \ln[\lambda_\ell (W - F^\circ)] = \sum_{\ell \in A} \alpha_\ell \ln(\lambda_\ell) + \left(\sum_{\ell \in A} \alpha_\ell \right) \ln(W - F^\circ) \quad (31)$$

由于对数函数是单调递增的, 又 $\lambda_\ell (W - F^\circ) > 0$, 因此对原 GNB 问题进行对数变换不会影响其最优解。又因式(30)中 α_ℓ 和 F° 是固定的, 因此最大化 GNB 问题的目标结果是最大化社会福利 W , 得证。

3.2 社会福利最大化问题(P1)

由于 $W = \sum_{\ell \in A} f_\ell$, W 中价格/支付相关的条款相互抵消, 于是可以得到

$$W = \sum_{i \in N_b} u_i - \sum_{j \in N_s} c_j - c_{DN} \quad (32)$$

所以关于第一个子问题及社会福利最大化将表示如下:

$$\text{P1: } \max_{\varphi_1} W = \sum_{\ell \in A} w_\ell$$

$$\text{s.t. (1)–(15), (17)–(19), (21)–(23), (27)}$$

其中决策变量为 $\varphi_1 := (\{P_{ci}^{\text{ch}}\}_{i \in N_b}, \{P_{cj}^{\text{dis}}\}_{j \in N_s}, \{f_i^p,$

$f_i^q, l_i, v_i, v_i'\}_{i \in N}, \{\{x_{i,n}^C\}_{n=1}^{N_{C,i}}\}_{i \in N_C}, \{t_i\}_{i \in N_T})$ 。P1 是一个非凸混合整数非线性规划(MINLP)问题, 由二次方程(9)、离散变量以及双线性项组成。

3.3 能源交易问题(P2)

由于支付问题在 P1 中相互抵消, 与代理之间能量交易相关的变量 $\varphi_2 := (\{P_i^b\}_{i \in N_b}, \{P_j^s\}_{j \in N_s}, \{C_{ij}, P_{ij}, r_{ij}\}_{i \in N_b, j \in N_s})$ 不包括在 P1 中。为了获得这些参数, 并在代理之间寻求一个公平的利润分配, 进而形成一个完整的 GNB 问题, 可将 P1 中所得到的最优解代入到 DN、买家以及卖家的利润表达式, 可得新的利润表达式分别为

$$z_{DN} = \sum_{j \in N_b} \sum_{j \in N_s} 2r_{ij} P_{ij} + C^b \sum_{j \in N_b} P_j^b - C^s \sum_{j \in N_s} P_j^s - c_{DN}^* - f_{DN}^\circ \quad (33)$$

$$z_i = u_i^* - C^b P_i^b - \sum_{j \in N_s} (C_{ij} + r_{ij}) P_{ij} - \partial(\hat{L}_i^{n,\text{ev}}) - f_i^\circ, \forall i \in N_b \quad (34)$$

$$z_j = C^s P_j^s + \sum_{i \in N_b} (C_{ij} - r_{ij}) P_{ij} - \partial(\hat{L}_j^{n,\text{ev}}) - c_j^* - f_j^\circ, \forall j \in N_s \quad (35)$$

式中: 带有*的量由决策变量 φ_1 提供; f_{DN}° 、 f_i° 、 f_j° 分别为 DN、买家以及卖家没有参与合作时的利润。将 P2 的目标式用 $\prod_{\ell \in A} (z_\ell)^{\alpha_\ell}$ 表示, 并且将其进一步转化为对数函数 $\sum_{\ell \in A} \alpha_\ell \ln(z_\ell)$ 。由于对数函数单调

递增, 因此对数变换不改变系统最优解。能源交易问题 P2 可表示为

$$\begin{aligned}
 \text{P2: } \max_{\varphi_2} \Lambda &= \sum_{\ell \in A} a_{\ell} \ln(z_{\ell}), \\
 \text{s.t. } &(21), (33) \text{---}(35), \\
 P_i^b + \sum_{j \in N_s} P_{ij} &= P_{ei}^{\text{ch},*}, P_i^b \geq 0, \forall i \in N_b, \\
 P_j^s + \sum_{i \in N_b} P_{ij} &= P_{ej}^{\text{dis},*}, P_j^s \geq 0, \forall j \in N_s, \\
 z_{\ell} &\geq 0, \forall \ell \in A, P_{ij} \geq 0, \forall i \in N_b, j \in N_s
 \end{aligned}$$

3.4 GNB 问题备注

3.4.1 交易信息

在交易中所有代理共享所需要的交易信息(即利润函数以及约束条件)。如果缺失交易信息, GNB 问题所得到的结果值将处于分断状态, 代理将无法进行利润分配, 代理之间的合作也将不存在。对于愿意参与交易的代理, 在交易信息提交完毕后通过求解 GNB 问题可实现利润分配 $\{f_{\ell}^*\}_{\ell \in A}$ 。代理在场所获得的利润将比其在市场外所获得的利润要高。因此, 如果代理想增加其利润, 则应该如实披露其信息, 并配合解决 GNB 问题。

3.4.2 GNB 问题解决方案

只要 GNB 问题(P1 和 P2)可行, 则 GNB 问题的决策变量 $\{\varphi_1^*, \varphi_2^*\}$ 都将存在。但由于 GNB 问题的非凸性导致 $\{\varphi_1^*, \varphi_2^*\}$ 的结果将不唯一, 可参考 P2, 先将其转换为 $\sum_{\ell \in A} a_{\ell} \ln(f_{\ell} - f_{\ell}^{\circ})$, 由于 GNB 问题是单调递增函数, 所以 $\{\varphi_1^*, \varphi_2^*\}$ 尽管有多个解, 但是利润分配结果 $\{f_{\ell}^*\}_{\ell \in A}$ 是不变且唯一的。对于所提出的问题可调用遗传算法进行求解。

4 模拟评价

GNB 市场能量交易流程图如图 5 所示。所有参与市场代理的交易信息形成一个 GNB 问题。在对问题进行求解过程中将 GNB 分成两个子问题, 解决 P1 可以得到决策变量 $\{\varphi_1\}$, 再将所得到的 $\{\varphi_1\}$ 代入 P2 从而可以解出 $\{\varphi_2\}$ 。模型和算法在 Matlab2019a 中实现, 两个子问题 P1 和 P2 使用 PyCharm 调用 Geatpy 工具包来解决。

在模拟仿真中选用一个 15 节点的网络^[18], 如图 6 所示, 并且在这 15 个节点之下有 15 台 EV。同时在每一个节点配有一个充电桩, 每一个充电桩上都具有一个智能电表来收集 EV 的 SOC。通过所安装的智能电表判定参与市场的 EV 的代理身份(买家或卖家)。在这里能量交易时间设置为单个时段 ($t = 1 \text{ h}$), 考虑式(22)中所定义的 DN 的短期成本,

选取 EV 的初始 SOC, 如图 7 所示, 其余参数由表 1^[2,24-25]给出。对于买家及卖家的成本参数, 根据文献[23,26]设定为 $\alpha = 0.5$ 、 $\omega = 0.5$ 、 $a = 0.5$ 、 $b = 0.5$ 、 $c = 0$ 、 $\sigma = 0.1$ 。

4.1 网络约束下的社会福利对比

采用以下两种不同场景进行对比研究。

1) 无 Volt-VAR 控制设备。同样在 15 节点的网络上, 在各节点上没有安装变压器以及并联电容器, 但是采用一个 GNB 市场。

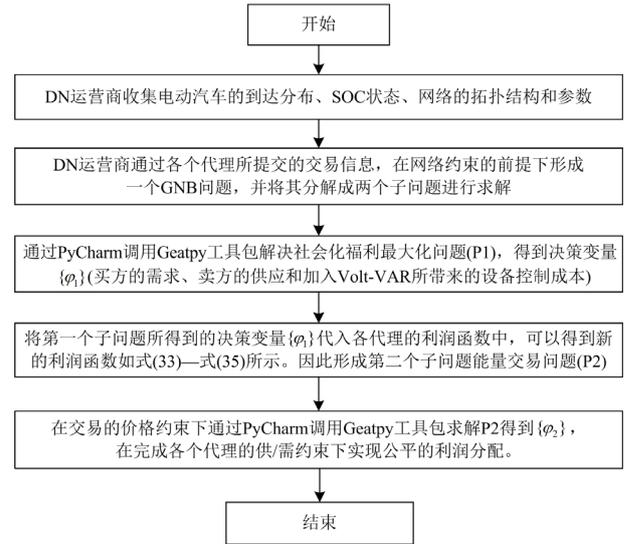


图 5 GNB 市场模型下的能量交易流程图

Fig. 5 Flow chart of energy trading under GNB market model

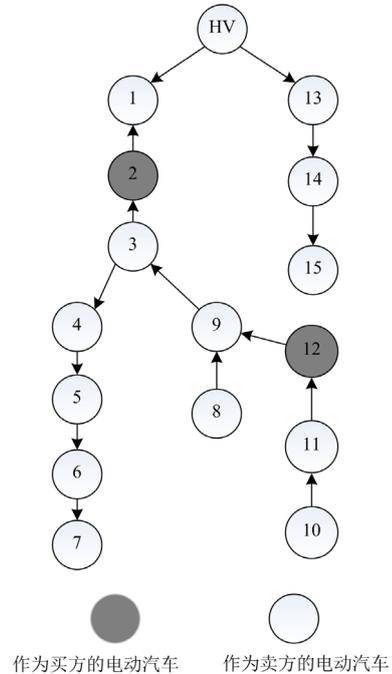


图 6 15 节点配电网络

Fig. 6 The 15-node power distribution network

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

参数	数值	参数	数值
C^b /(元/kWh)	2	C_{LS} /(元/kWh)	1.5
C^s /(元/kWh)	1	C_i^T /元	7
C^{min} /(元/kWh)	0.5	$C_{i,n}^c$ /元	1.5
C^{max} /(元/kWh)	2.1	$P_{ei}^{ch,max}$ /kWh	[0,20]
r^{min} /(元/kWh)	0	$P_{ei}^{dis,max}$ /kWh	[5,60]
r^{max} /(元/kWh)	2	K_i	6
P_{HV} /(元/kWh)	2.5	$\Delta t/h$	1
T_i	{0.98,0.99,1,1.01,1.02}		
B_i	{0.01,0.02,0.04,0.08}		

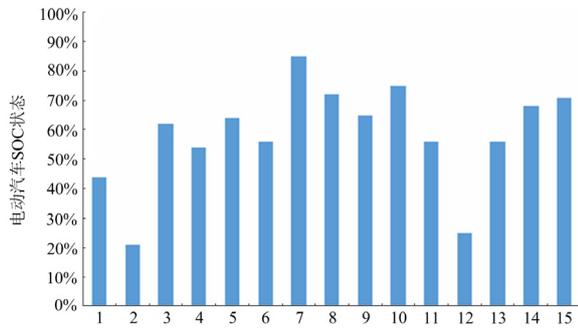


图 7 15 台 EV 的初始 SOC 状态

Fig. 7 SOC status of 15 EVs

2) 本文所提出的方法。

图 8 为装有不同数目 Volt-VAR 控制设备的节点的允许电压以及社会福利, 对比研究节点未加入 Volt-VAR 控制和在 {2,3} 两个节点加入 Volt-VAR 控制、{2,3,6,11,13,15} 等 6 个节点加入 Volt-VAR 控制, 以及在 15 个节点中都加入 Volt-VAR 控制。从算例结果可知, 随着允许电压的增大, 市场将有更多的电力交易, 增加了社会福利。对于无 Volt-VAR 控制, 其允许电压 > 0.03 p.u. 时开始产生社会福利。同样随着加入 Volt-VAR 控制的节点越多, 社会福利也得到更好的改善, 各个代理利润也会有所增加。设定允许电压为 0.03 p.u., 将装有 Volt-VAR 控制的 15 节点配电网^[18]和没有 Volt-VAR 控制的进行比较, 作为卖方(买方)的 EV 所出售(购买)的能量量如图 9 所示。分析可知, 加入了 Volt-VAR 控制促进了 EV 能源交易量, 同时若出现交易量为 0 的 EV, 在 P2 中会将其剔除。

4.2 基于 DN 的能量交易

设定在以下几个场景中各个节点都装有 Volt-VAR 控制, 同时允许电压设为 0.03 p.u.。

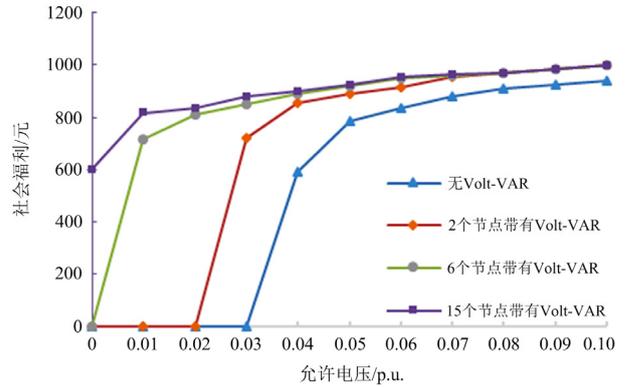


图 8 安装有不同数目 Volt-VAR 控制的节点的允许电压以及社会福利

Fig. 8 Allowed voltage and social benefits of nodes with different numbers of Volt-VAR control

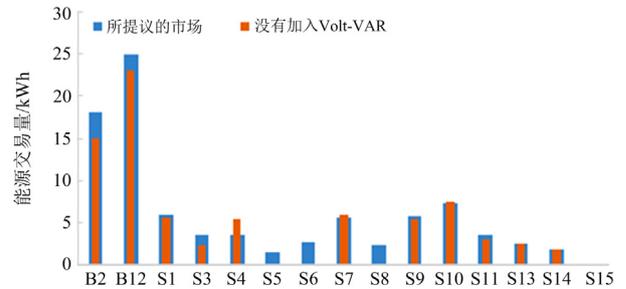


图 9 作为卖方的 EV 所出售或者作为买方的 EV 所购买的能量量(B: 买方, S: 卖方)

Fig. 9 Amount of energy purchased by the electric vehicles sold as the seller or purchased as the buyer (B: the buyer, S: the seller)

1) 没有考虑 DN 作为市场代理。在 GNB 市场中 DN 运营商没有成为代理, 在利润分配当中也没有考虑到 EV 充放电成本。

2) 考虑 DN 作为市场代理, 但是不考虑电动车的充放电成本。对于参与 GNB 市场的 EV, 其利润函数中没有考虑其充放电成本及电池损耗成本。

3) 本文所提出的方法。

图 10 为不同场景下各个代理的成本, 没有考虑充放电成本的 EV 其支付的成本最小, 但由于没有考虑损耗成本导致 EV 电池损耗增加, 收益减少。图 11 为不同场景下各个代理的收益, 由于市场中 DN 未作为代理商, 不会收到任何支付款项, 所有 DN 只有负的利润。EV 因为没有 DN 作为代理, 在支付款项中不需要支付网络使用成本费用 r_{ij} , 所得利润比本文所用方法要高, 但是由于 DN 没有加入市场并有效控制 Volt-VAR, 造成网络成本增加, 所以得到的利润小于本文所提出的方法。图 12 给出不

同场景下各个代理的利润, 本文所提出的方法将 DN 和 EV 都作为代理, 可见, 由于模型促进了各个 EV 之间的能量交易, 所以各个代理都可以获得可观的利润。本文所提出的方法下各个代理所收到的付款由图 13 给出, 对于传统的能源交易方式, 买

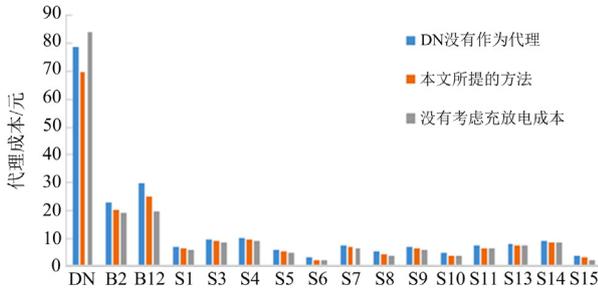


图 10 不同场景下各个代理的成本

Fig. 10 Cost of each agent in different scenarios

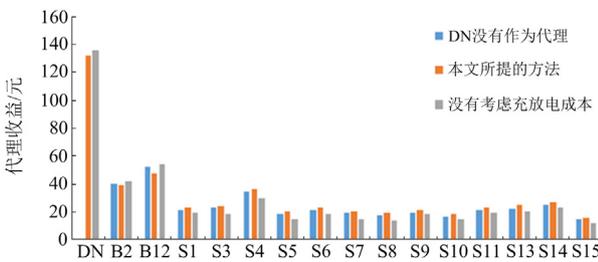


图 11 不同场景下各个代理的收益

Fig. 11 Benefits of each agent in different scenarios

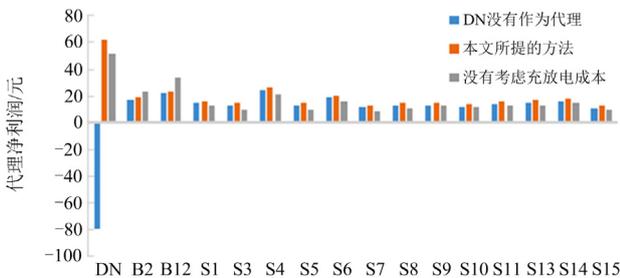


图 12 不同场景下各个代理的利润

Fig. 12 Profits of each agent in different scenarios

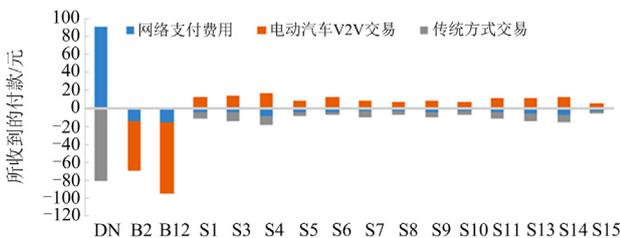


图 13 本文所提出的方法下各个代理所收到的付款

Fig. 13 Payment received by the individual agents under the method presented herein

家所支付的款项偏少, 所以作为买家的 EV 几乎没有与 DN 进行交易。对于作为卖家的 EV, 在供应大于需求的情况下, 将会把剩余的能量以传统的能源交易方式出售给 DN。

同时, 拟议的市场更倾向于用 V2V 的形式来进行能量交易, 因此 DN 也可以获得足够多的网络使用费用, 从而获得正的利润。因为在市场中的每一个代理都可以获得一个正的利润, 从而可以提高参与市场代理的积极性。

4.3 计算性能

在本文所提出的模型基础上, 通过使用不同的网络以及增加代理数量的方式来验证模型的有效性和实用性。采用 33 节点网络^[19], 并且配置 33 辆 EV 进行仿真。

从式(13)可以看出, 在第一个子问题中存在着二进制变量, 其主要由 Volt-VAR 控制中变压器以及电容器所引起。同样地, 在 P2 中也存在着由于 $r_{ij}P_{ij}$ 和 $C_{ij}P_{ij}$ 所带来的非线性变化。因此, 随着所参与的代理越来越多, 引入的二进制变量以及非线性的因素也会越来越多, 对于计算性能要求也越来越高。

调用 Gepty 求解出的决策变量 φ_1 和 φ_2 代入原 GNB 问题得到的解为 f_t , 将其与算法结果 f_t^* 按照式(36)计算误差 ϑ 。并且采用一种增强的自适应拉格朗日松弛法(Enhanced adaptive Lagrangian relaxation, ELR)^[33]求解原 GNB 题。

$$\vartheta = f_t^* - f_t \quad (36)$$

用本文所提出的算法和调用 ELR 同时对各个子问题进行求解。图 14 给出两种算法所得结果的误差, 比较可以发现, 相较于 ELR, 本文所用方法误差更小。并且两者误差都接近于零, 从而可以看出所提方法的准确性。

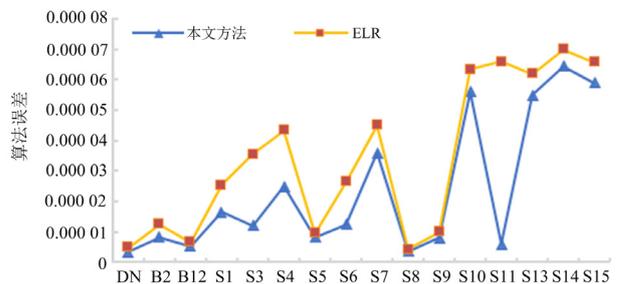


图 14 两种算法所得结果的误差

Fig. 14 Error of the results of both algorithms

表 2 给出了两种算法的计算时间, 在 15 节点的网络中模型的计算效率都相对比较高。改变买家卖家的数量后, 计算的时间有了明显的增加, 但本文

所提出的方法优于 ELR。在 33 节点的配电网中, 由于参与的代理越来越多, 计算效率也大幅度降低。继续改变卖家买家的数量, 选取 16 个买家、17 个卖家, 将会有 $16 \times 17 = 272$ 种交易协议, 计算时间需要 4796.325 s。采用本文提出的模型, 一个买家只和 5 个卖家进行匹配, 计算时间可下降至接近 56.39 s。随着数据驱动及深度学习的进步发展, 算法的运行时间会得到进一步的提升。

表 2 两种算法计算时间

Table 2 Calculation time of two algorithms

买卖双方组合	15 节点		33 节点		
	(2,13)	(7,8)	(10,23)	(16,17)	(16,17)*
本文方法 所用时间/s	4.56	11.35	180.43	4796.32	56.39
ELR 使用 时间/s	4.72	12.36	189.4	4825.32	68.51

注: *买家设定只和 5 个卖家进行匹配。

5 结论

本文提出了一种基于广义纳什议价理论下的 V2V 能量交易模型。模型中引入的 DN 运营商也成为代理, 同时在配电网中安装 Volt-VAR 控制设备。对于在市场中作为代理的 EV 考虑其不确定性和充放电成本。然后将该市场模型表述为一个 GNB 问题, 同时将其分解为两个子问题, 分别是社会福利最大化问题(P1)和能源交易问题(P2)。最后调用遗传算法来解决该 GNB 问题, 得到以下主要结论:

1) 模型中作为代理的 DN 运营商能积极主动控制 Volt-VAR 设备解决 EV 接入网络所带来的潮流堵塞, 以减轻网络负担, 使得社会化福利得到最大化。

2) 所提出的模型可以在不违反价格约束的情况下使参与的代理获得可观、公平的利润, 并且促进 EV 之间的能量交易。

3) 由于本文只考虑到低压网络这一层面, 探索具有配电网-微电网-电动汽车多层次网络下的能量交易将是后续工作的重点。

参考文献

- [1] CHOWDHURY S, CHOWDHURY S P, CROSSLEY P. Microgrids and active distribution networks[M]. Tehran, Iran: Gheddis Press, 2022.
- [2] 李本新, 刘振, 陈厚合, 等. 基于主从博弈的输配电网协同经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 131-140.
LI Benxin, LIU Zhen, CHEN Houhe, et al. Collaborative economic dispatch of coupled transmission and distribution networks based on the Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 131-140.
- [3] KIM J, DVORKIN Y. A P2P-dominant distribution system architecture[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(4): 2716-2725.
- [4] UMOREN I A, JAFFARY S S A, SHAKIR M Z, et al. Blockchain-based energy trading in electric-vehicle-enabled microgrids[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2020, 9(6): 66-71.
- [5] SUN G, DAI M, ZHANG F, et al. Blockchain-enhanced high-confidence energy sharing in internet of electric vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 7868-7882.
- [6] 程杉, 尚冬冬, 魏昭彬, 等. 基于纳什议价博弈的微电网一体化电站分布式协调优化[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(5): 86-95.
CHENG Shan, SHANG Dongdong, WEI Zhaobin, et al. Hierarchical and distributed coordination and optimization of microgrid with CSSIS based on Nash bargaining game[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(5): 86-95.
- [7] ZENG L, LI C, LI Z, et al. Hierarchical bipartite graph matching method for transactive V2V power exchange in distribution power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 12(1): 301-311.
- [8] OZDAGLAR A. Game theory with engineering applications lecture 14: Nash Bargaining solution[J]. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [9] 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, 2018, 66(8): 6087-6097.
- [10] ANOH K, MAHARJAN S, IKPEHAI A, et al. Energy peer-to-peer trading in virtual microgrids in smart grids: a game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 1264-1275.
- [11] 刘杨, 刘天羽. 基于区块链和动态定价模型微电网 P2P 能源交易[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 30-36.
LIU Yang, LIU Tianyu. P2P energy trading in microgrid based on blockchain and dynamic pricing model[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 30-36.
- [12] 彭振华, 孙志鹏, 邓芳明. 基于最优匹配机制的微电网 P2P 交易策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 89-96.
PENG Zhenhua, SUN Zhipeng, DENG Fangming. P2P transaction strategy for microgrid based on optimal matching mechanism[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 89-96.
- [13] 程杉, 陈梓铭, 徐康仪, 等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 15-21.
CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An

- orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 15-21.
- [14] MELENDEZ K A, DAS T K, KWON C. A Nash-bargaining model for trading of electricity between aggregations of peers[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123.
- [15] KOUFAKIS A M, RIGAS E S, BASSILIADES N, et al. Offline and online electric vehicle charging scheduling with V2V energy transfer[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 21(5): 2128-2138.
- [16] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(12): 63-71.
- [17] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBIĆ G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(5): 5163-5173.
- [18] ZHONG W, XIE S, XIE K, et al. Cooperative P2P energy trading in active distribution networks: an MILP-based Nash bargaining solution[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(2): 1264-1276.
- [19] KIM H, LEE J, BAHRAMI S, et al. Direct energy trading of microgrids in distribution energy market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 35(1): 639-651.
- [20] PAUDEL A, SAMPATH L, YANG J, et al. Peer-to-peer energy trading in smart grid considering power losses and network fees[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4727-4737.
- [21] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. *IEEE Power Engineering Review*, 1989, 9(4): 101-102.
- [22] YANG Z, BOSE A, ZHONG H, et al. Optimal reactive power dispatch with accurately modeled discrete control devices: a successive linear approximation approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(3): 2435-2444.
- [23] FARANDA R, PIEVATOLO A, TIRONI E. Load shedding: a new proposal[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4): 2086-2093.
- [24] 马益平. 考虑 EV 调度的微电网混合储能容量优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(23): 98-107.
MA Yiping. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for micro-grid considering EV scheduling[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 98-107.
- [25] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(15): 127-134.
YAN Jun, YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley electricity tariffs[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 127-134.
- [26] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD H, SCHOBER R, et al. Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1170-1180.
- [27] 余岳, 粟梅, 孙尧, 等. V2M 系统分时电价博弈研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(1): 200-207.
YU Yue, SU Mei, SUN Yao, et al. Time-of-use electricity price game via V2M[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(1): 200-207.
- [28] 胡思洋, 杨健维, 廖凯, 等. 计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16): 33-46.
HU Siyang, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Fault analysis method for an urban distribution network considering large-scale electric vehicle access[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 33-46.
- [29] WU X, HU X, MOURA S, et al. Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 333: 203-212.
- [30] National household travel survey daily travel quickfacts | bureau of transportation statistics[EB/OL]. [2021-11-01]. <https://www.bts.gov/statistical-products/surveys/national-household-travel-survey-daily-travel-quick-facts>.
- [31] NASH J F. The bargaining problem[J]. *Econometrica*, 1950, 18(2): 155-162.
- [32] ROTH A E. *Axiomatic models of bargaining*[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [33] ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(1): 620-628.

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-12-15

作者简介:

余岳(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为微电网运行优化、电力电子和电力驱动器; E-mail: yuyue@hut.edu.cn

文怀超(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网的运行优化; E-mail: 2822619036@qq.com

唐继孟(1989—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为复杂系统建模与优化. E-mail: 18684640625@163.com

(编辑 魏小丽)