

基于 Stackelberg 博弈的多 V2M 电力交易研究*

余 岳, 粟 梅, 孙 尧, 韩 华

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘 要:提出了采用 Stackelberg 博弈研究多 V2M 分时电价交易模式的一般模型及分析方法。根据分布式发电出力 and 系统负荷分布,以多个含有电动汽车的微电网为研究对象,对多 V2M 进行博弈方分类,在场景描述的电力交易环境下建立了两级 Stackelberg 博弈模型,严格证明了售电主导方和购电跟随方的两级 Stackelberg 博弈均衡的存在,并提出了相应的求解流程,求解 24 h 内系统分时电价。研究将传统价格模型和 Stackelberg 博弈模型进行对比,算例结果证明了博弈模型的有效性,所提出的模型和结论均具有一定普适性,为多 V2M 系统的发展方向和管理措施提供了理论依据。

关键词: 多 V2M; 分时电价优化; Stackelberg 博弈

中图分类号: TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.40

Multi-V2M energy trading via Stackelberg game

Yu Yue, Su Mei, Sun Yao, Han Hua

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A Stackelberg game model is proposed to study TOU-based trading modes in multi-V2M system. According to DG's power output and load distribution, multi-V2M is classified and Stackelberg game model is established. Stackelberg game's equilibrium with sellers and purchasers is strictly proved. The 24 hours price for the system is calculated. Taking 5 V2Ms system as an example, the Nash equilibrium explains the system's working process. The results on the traditional pricing model and Stackelberg game model are compared, and demonstrate the effectiveness of the proposed game model. The proposed model as well as the results have good adaptiveness, which can provide a theoretical basis for the development and management measures of multi-V2M system.

Keywords: multi-V2M; TOU price optimization; stackelberg game theory

0 引 言

2011 年,美国陆军车辆研究中心和西班牙加泰罗尼亚理工大学,分别在 IEEE 会议上发表论文,提出电动汽车(electrical vehicles, EV)接入微电网的概念^[1-2]。电动汽车接入微电网,即 V2M(vehicles to microgrid),已经成为当前微电网系统研究热点。V2M 系统不但具备电动汽车和微电网的各自优点,两者的结合也拓展了 V2M 的研究新领域^[3-4]。对于经济飞速发展的我国,电动汽车接入微电网系统的应用更具有重要的绿色发展意义,电动汽车使用电力作为能源,绿色环保,大量减少了有害气体排放,有助改善城市空气质量提高;大量采用太阳能和风

力等能源发电的微电网系统,也具有良好的环境保护特点,两者一定程度上都降低了中国对燃煤和石油的需求。

微电网中,光伏发电(photovoltaic, PV)、风力发电(wind turbine, WT)等分布式电源出力具有随机性,属于不可控微源,为了增加系统的稳定性,微电网一般配备有储能单元,通常由蓄电池组构成;V2M 中,EV 的接入后成为微电网的负荷。与 V2G(vehicles to grid)系统相似,在一定条件下 EV 也是 V2M 的储能单元,可以被 V2M 调度^[5]。单个独立的 V2M,可以通过调度储能单元蓄电池和 EV 内的电能,在一定程度上满足系统功率平衡的要求。但是,当储能单元容量和 EV 充放电条件低于系统调度需要时,V2M 只能通过加大可控微源的发电量,或者连接到外部电网,比如公网,获得电价相比自身发电更

低的电能。相反,如果 V2M 电力富余,除了存入储能单元蓄电池和 EV,还可以选择通过电力市场将电力出售^[6]。

如果选择通过公网或者其他 V2M 将电力出售,V2M 之间系统就需要建立交易体系。然而,传统的电力交易中静态的电价模型不能满足含有电动汽车接入的微电网系统,随着 V2M 系统的成熟发展,V2M 电力交易研究成为一个热点^[7-9]。目前,很多研究成果和相关研究文献开始寻求使用博弈均衡的方法,对 V2M 系统电力交易模型进行研究。

文献[10]在 24 h 内,建立了公网(供电公司)和多个用户之间的分时电价博弈模型模型,通过分析和推导,详细证明博弈各方的纳什均衡(Nash equilibrium, NE)存在并求取了均衡点。但是,文献中提及的博弈方中,除公网外,用户方却只包含一般传统负载用户,还不是 V2M 系统中所指的分布式储能(distributed storage, DS)用户、分布式发电用户(distributed generation, DG)和电动汽车接入用户。文献[11]的博弈模型中没有公网,在多微电网之间建立博弈模型,在需求侧的角度,将用户分类为发电、储能等类别,提出了不同类型的多微电网用户博弈模型,并严格证明和求解了博弈模型的 NE。但是,文献中模型架构未包含公网,也未考虑 EV 的接入,博弈方只限于微电网用户,文献成果局限于需求侧用户电价博弈。文献[12]建立了一个 V2M 与公网之间的两方博弈模型,严格证明了系统的 NE 存在,并且采用逆向回归算法求解了系统的 NE,并用均衡后的价格重新对系统进行了优化运行,结果证明博弈模型有助于电网“削峰填谷”,但是文献的模型将 V2M 设定为并网负载模式,未对 V2M 并网发电模式进行研究,且未考虑多 V2M 的情况。文献[13]以多微电网与公网电力交易架构为研究对象,采用 NE 均衡研究多微电网电力交易模型建立及求解方法,但是文献中未考虑微电网自身储能单元情况,多电微电网既可以售电也可以将多余电力存入储能单元,如何选择,文献没有考虑;同时,文献还对交易过程进行了 4 点假设,模型的通用性受到限制。文献[14]以多微电网与公网电力交易架构为研究对象,采用 Stackelberg 模型作为博弈对象,建立了“Leader”和“Follower”的收益函数与策略集,证明了系统 NE 的存在,通过反应函数,最终求取系统的 NE。但是该文献中,售电量采取随机选取的方式,未考虑微电网内部需求满意度的问题;售电微电网收益函数中,将存入微电网储能单元的电能也作为售电收益的原因,并未作合理性证明,且假设了所有微电网储能单元容量无限大的条件。

本文建立了包含分布式发电、分布式储能用户、EV 和微电网内普通用户的多个 V2M 共同参与的电力交易

场景,同时考虑 V2M 的售电与购电两种工作模式,提出了一个基于 Stackelberg 博弈均衡的多 V2M 电能交易模型,通过推导,验证了模型的 NE 的存在性,并求取了两级系统各自的 NE。通过算例研究分析和对比现有研究成果,证明了模型的有效性。

1 多 V2M 电力交易非合作博弈

多 V2M 系统中,各个 V2M 之间独立采取决策,互不沟通,各 V2M 不联合,各 V2M 之间也没有达成任何协议,而是根据对方的策略单独采取行动,即采用非合作博弈模式。

V2M 中包含 DG 单元、DS 单元和 EV 单元,为了达到自身最优运行的目的,各单元根据条件改变自身出力。V2M 进入电力市场后,电力交易受成本、需求等因素影响,V2M 购电与售电一个动态调整的过程^[15]。

多 V2M 博弈框架如图 1 所示。参与博弈者有售电方与购电方。框架中包含 WT、PV、燃气轮机(gas turbine, GT)等分布式发电装置。功率流方向为实线箭头所指方向,在分时优化时间段内,一般设 $t = 1$ h,GT 发电总和用 I_t^{dg} 表示,由于 WT 与 PV 为不可控发电单元, P_{pv}^w 、 P_w^w 为根据气象数据而确定的常熟数。能够参与调度的微源为 GT;储能单元系统充放电调度用 I_t^{bess} 表示, I_t^{ev} 为电动汽车出力调度;微电网普通用户负荷为 L_t ;接入微电网后,如果微电网的总负荷大于原有配置的分布式发电出力总和,通过调度 DS 和 EV 后仍然无法满足需求时,则需要从电力市场购入电力 I_t 满足功率平衡的需求^[16];如果微电网的总负荷小于原有配置的分布式发电出力总和,富余的电力可以选择存入 DS 或者 EV,也可以选择通过电力市场售出电力 I_t 。

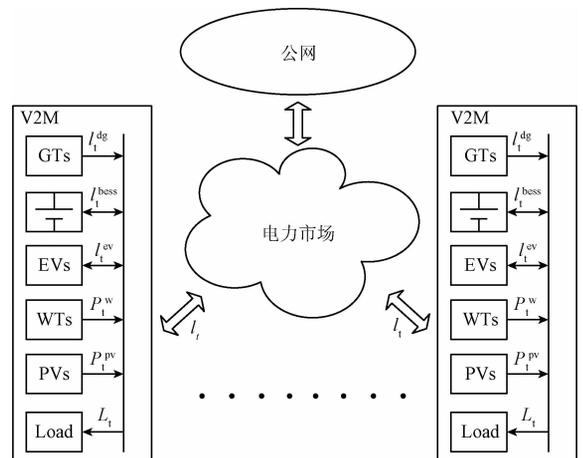


图 1 多 V2M 系统斯德伯格博弈模型架构
Fig. 1 Architecture for multi-V2M Stackelberg game

本文模型架构中的多个 V2M 采取策略各自独立,相互之间不合作、无协议。在此前提基于 Stackelberg 博弈的对参与博弈双方建模。在 Stackelberg 博弈中,售电方是博弈的主导者,也称“Leader”,售电方采取的策略是售电量的多少,从而实现售电方利润最大化;购电方在博弈中是跟随者,也称“Follower”,根据售电方采取的策略相应通过改变购电的出价从而实现购电方成本最优^[17]。

2 多 V2M 电力交易 Stackelberg 博弈模型

Stackelberg 博弈中有 4 个要素,即主导者和跟随者、策略集和参与方的收益^[18]。

2.1 博弈参与方

在本文设置的 Stackelberg 博弈场景中,博弈参与者为 V2M,在某一时刻,如果 V2M 电力富余向市场售电,则属于博弈中的售电方,属于 Stackelberg 博弈中的主导者;如果 V2M 电力缺乏,需要通过市场购电,则属于博弈中的购电方,属于 Stackelberg 博弈中的跟随者。按照这种分类,可以分为:V2M 售电方和 V2M 购电方。设 V2M 售电方集合为 J ,V2M 购电方集合为 I 。因此,博弈为多方博弈,博弈参与方包括 V2M 售电方, $j \in J$ 和 V2M 购电方, $i \in I$ 。

2.2 策略集

2.2.1 V2M 售电方策略集

忽略 DS 和 EV 在充放电过程中的损耗,假设充放电过程中 DS 和 EV 系统端口电压基本恒定,对于任意分时优化时间段 t 内,博弈主导者,售电方 j 的策略集由式(1)表示。

$$\Omega^j = \{ \tilde{P}_t^j \in R_-^H : l_j^{\min} \leq \tilde{P}_t^j \leq l_j^{\max}, \forall t \} \quad (1)$$

式中: \tilde{P}_t^j 是 V2M 售电方 j 的选择的售电功率,由式(2)表示。

$$\tilde{P}_t^j = d_t^j + m_t^j \quad (2)$$

$$m_t^j = l_t^{j,\text{bess}} - l_t^{j,\text{dg}} + l_t^{j,\text{ev}} \quad (3)$$

$$d_t^j = L_t^j - P_t^{j,\text{pv}} - P_t^{j,\text{w}} \quad (4)$$

式(3)表示在分时优化时段 t 内,售电方 j 采取的 DS、EV 充放电策略和 DG 的发电总和。式(4)中, L_t^j 表示售电方 j 中普通用电用户的负荷, $P_t^{j,\text{pv}}$ 和 $P_t^{j,\text{w}}$ 分别表示光伏发电功率和风电发电输出功率。V2M 除了一般普通负载外,还配置有 DG、DS 和 EV。分时优化时段 t 内, $l_t^{j,\text{dg}}$ 表示所有分布式发电电源的发电功率, $l_t^{j,\text{bess}}$ 表示储能系统的充放电功率, $l_t^{j,\text{ev}}$ 表示所有接入 V2M 的电动汽车充放电功率总和。对于 V2M 售电方 j , $l_t^{j,\text{dg}}$ 、 $l_t^{j,\text{bess}}$ 、 $l_t^{j,\text{ev}}$ 还需要满足下列边界约束条件。

$$\begin{cases} l_{\min}^{j,\text{ev}} \leq l_t^{j,\text{ev}} \leq l_{\max}^{j,\text{ev}} \\ l_{\min}^{j,\text{bess}} \leq l_t^{j,\text{bess}} \leq l_{\max}^{j,\text{bess}} \\ l_{\min}^{j,\text{dg}} \leq l_t^{j,\text{dg}} \leq l_{\max}^{j,\text{dg}} \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 V2M 购电方策略集

对于任意分时优化时间段,购电方 i 能够采取的策略集由式(6)表示。

$$\Omega^i = \{ C_t^i \in R_+^H : C_B \leq C_t^i \leq C_S, \forall t \} \quad (6)$$

式中: C_t^i 表示 V2M 购电方 i 的购电出价, C_B 表示供电网的购电价格, C_S 表示供电网的售电价格。购电方的出价不应高于 C_S ,否则购电方直接从供电网购电即可。购电方的出价也不应低于 C_B ,否则售点方将直接与供电网交易。

2.3 收益函数

2.3.1 V2M 售电方收益函数

不计损耗,售电方 j 的收益函数模型由式(7)表示。

$$U_t^j(\tilde{P}_t^j, l_t^{-j}, c_t) = \sum_{i=1}^r \left(\sum_{i \in I} E_t^i C_t^i \frac{\tilde{P}_t^j}{\hat{E}_t} + S_t^j \right) \quad (7)$$

式中: l_t^{-j} 指除售电者 j 以外的所有售电者采取的策略集合, c 表示全体购电者能够采取的策略集合; E_t^i 表示购电者 i 成功购得的电量总和,如式(8)所示; \hat{E}_t 表示 t 时段全部售电方的售电总和,如式(9)所示; S_t^j 表示用户满意度函数由式(11)表示,表达式具体分析见 3.3.3 节。

$$E_t^i = \sum_{j \in J} \tilde{P}_t^j \frac{C_t^i}{\sum_{i \in I} C_t^i} = \hat{E}_t \frac{C_t^i}{\sum_{i \in I} C_t^i} \quad (8)$$

$$\hat{E}_t = \sum_{j \in J} \tilde{P}_t^j \quad (9)$$

2.3.2 V2M 购电方收益函数

不计损耗,购电方的收益函数模型由式(10)表示。

$$U_t^i(C_t^i, C_t^{-i}, l_t) = \sum_{i=1}^r (E_t^i C_S - E_t^i C_t^i) \quad (10)$$

购电方如果没有从售电方购得足够的电能,那么将从供电网购电,因此购电方的用电需求总能得到满足。

2.3.3 V2M 售电方满意度函数

S_t^j 表示 V2M 售电方满意度。当 V2M 系统有富余电能时,可以根据情况决定是存入 DS 或者是 EV。当 V2M 为售电方时应满足 $\tilde{P}_t^j < 0$, $d_t^j \leq 0$ 。当售电功率 \tilde{P}_t^j 小于售电方实际负荷 d_t^j ,表示 d_t^j 需要的负荷由 DS 和 EV 放电从而达到平衡,此时设置 S_t^j 为负值。满意度函数的设置反映了实际电力交易中,售电方和购电方的需求满足度^[19], S_t^j 的需要满足下列设置规则:1)首先, S_t^j 是一个非减函数。2)其次, S_t^j 是一个凹函数,在坐标轴左右终值方向上 S_t^j 逐渐趋向饱和。

本文的满意度函数设置为:

$$S_t^j = d_t^j \beta_i \left[\left(\frac{\tilde{P}_t^j}{d_t^j} \right)^{\alpha} - 1 \right] \quad (11)$$

式中: α 、 β 分别为满意度参数,且 $\alpha < 1$, $\alpha\beta < 0$ 。通过改变 α 、 β 参数, S_t^j 函数终值饱和的趋势也将如图 2 所示随之改变。

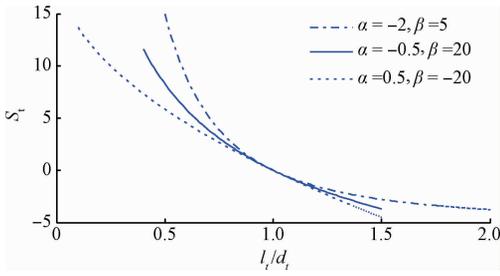


图 2 不同参数设置下的用户满意度函数曲线
Fig. 2 User satisfaction function curve with different parameter settings

分析式(11)可知, S_t 满足下列条件:

- 1) 当 $l_t^j = d_t^j < 0$ 时, $S_t = 0$;
- 2) 当 $d_t^j < l_t^j < 0$ 时, $S_t > 0$;
- 3) 当 $l_t^j < d_t^j < 0$ 时, $S_t < 0$ 。

2.4 博弈均衡分析

Stackelberg 博弈均衡存在的条件如下:

1) 对于纯策略集式(6), 购电方存在非合作博弈 NE 均衡。

2) 对于任意购电方策略集 c_t^* , 售电方总能从策略集式(1)找到最优策略使售电收益最优。

2.4.1 条件 1) 证明

购电方在分时优化时段 t 内, 在策略集中选择一个确定的策略, 决定购电电价, 所以, 式(6)描述的策略集为纯策略。纯策略博弈的 NE 需要满足以下两个条件才能求解:

- (1) 式(6)表示的策略集是欧氏空间的非空紧凸集。
- (2) 收益函数式(10)对策略集式(6)连续且拟凹。

式(6)的描述的策略集变量, 约束条件为线性不等式, 所以条件(1)得证。

证明收益函数 U_t^i 是凹集, 其充要条件是式(10)的汉森矩阵 $H(U_t^i)$ 半正定。

$$H(U_t^i) = \begin{bmatrix} \nabla^2 c_{t1}^i c_{t1}^i U_t^i & \nabla^2 c_{t1}^i c_{t2}^i U_t^i \\ \nabla^2 c_{t2}^i c_{t1}^i U_t^i & \nabla^2 c_{t2}^i c_{t2}^i U_t^i \end{bmatrix} \quad (12)$$

首先, 联立式(8)与(10), 求取 U_t^i 的一阶偏导数:

$$\nabla c_{t1}^i U_t^i = \hat{E}_t \frac{C_s \sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l^t - 2C_t^i \sum_{l \in \Gamma} C_l^t + C_t^{i2}}{(\sum_{l \in \Gamma} C_l^t)^2} \quad (13)$$

然后, 求取 U_t^i 的二阶偏导数:

$$\begin{cases} \nabla^2 c_{t1}^i c_{t1}^i U_t^i = -2\hat{E}_t \frac{C_s \sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l^t + (\sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l^t)^2}{(\sum_{l \in \Gamma} C_l^t)^3}, \forall t \\ \nabla^2 c_{t1}^i c_{t2}^i U_t^i = 0, \quad t1 \neq t2 \end{cases} \quad (14)$$

观察式(14)可得, $H(U_t^i)$ 矩阵对角线元素全部小于等于 0, 而非对角线元素全部为 0, 所以 $H(U_t^i)$ 为半正定得证。收益函数 U_t^i 满足条件(2)。因此, 条件 1) 得证。

2.4.2 条件 2) 证明

令式(13)等于 0, 得:

$$C_t^{i*} = \sqrt{\sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l (C_s + \sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l) - \sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l} \quad (15)$$

对于任意购电方策略集 c_t^* , 售电方得收益函数为:

$$U_t^j(l_t^j, l_t^{-j}, c_t^*) = \sum_{t=1}^T (\sum_{t \in \Gamma} E_t^i C_t^{i*} \frac{l_t^j}{\hat{E}_t} + S_t^j) \quad (16)$$

分别求取式(16)的一阶和二阶导数得:

$$\nabla l_{t1}^j U_t^j = \sum_{t \in \Gamma} \left(\frac{C_t^{i*2}}{\sum_{l \in \Gamma} C_l^t} \right) - \alpha_t \beta_t \left(\frac{l_t^j}{d_t^j} \right)^{\alpha_t - 1} \quad (17)$$

$$\nabla^2 l_{t1}^j l_{t1}^j U_t^j = -\alpha_t \beta_t (\alpha_t - 1) \frac{l_t^{j\alpha_t - 2}}{d_t^{j\alpha_t - 1}} \quad (18)$$

分析式(18), 可知 U_t^j 二阶导数为负, 因此售电方得收益函数 U_t^j 为严格凸集。令式(17)等于 0, 得:

$$l_t^{j*} = d_t^j \left(\sum_{t \in \Gamma} \frac{C_t^{i*2}}{\sum_{l \in \Gamma} C_l^t \alpha_l \beta_l} \right)^{1/(\alpha_t - 1)} \quad (19)$$

对于任意购电方策略集 c_t^* , 式(19)中 l_t^{j*} 为售电方最优策略。因此, 条件 2) 得证。

综上所述, 本节所建立的包含购电方和售电方的两级 Stackelberg 博弈, 存在唯一的博弈均衡点。

3 Stackelberg 博弈均衡的求解

对第 2 节中所建立的 Stackelberg 模型均衡点的求解, 一般采用逆向回归算法对模型求解。首先, 购电方设置购电分时电价, 然后售电方根据购电分时电价制定售电策略, 确定售电量, 最后购电方微电网用户根据此次分时电价、售电方微电网用户根据此次分时售电量, 分别在不同的分时优化时段 t , 选取不同的可控微源发电功率和储能单元、电动汽车充放电功率使得用电及发电成本最优。

3.1 购电方均衡求解

当购电方达成 NE 均衡后, 购电电价满足:

$$c_t^{i*} = c_t^{j*}, \quad j \in \Gamma \setminus \{i\} \quad (20)$$

结合式(15), 可得:

$$c_t^{i*} = \sqrt{(k-1)c_t^{i*} [C_s + (k-1)c_t^{i*}] - (k-1)c_t^{i*}} \quad (21)$$

式(21)中 k 为参与博弈的购电方 V2M 总数, 化简后得:

$$c_t^{i*} = C_s \frac{k-1}{2k-1} \quad (22)$$

3.2 售电方均衡求解

将式(22)代入(19)可得:

$$l_t^{j*} = d_t^j \left(\sum_{t \in \Gamma} \frac{C_t^{i*2}}{\sum_{l \in \Gamma \setminus \{i\}} C_l^t \alpha_l \beta_l} \right)^{1/(\alpha_t - 1)} \quad (23)$$

式(23)即为售电方 j 在NE处的售电功率。然后,根据文献[20]中的优化模型及方法,将式(2)~(4)作为等式约束条件,通过优化,最终求取所有参与博弈的V2M的 l_i^{bess} 、 l_i^{dg} 、 l_i^{ev} 调度值。

4 算例方案与求解

4.1 算例参数

将算法求解周期设定为24 h,设定5个V2M参与博弈,根据天气与负荷情况相应生成购电方与售电方。V2M包含PV发电、WT发电、微型GT发电、储能单元系统和电动汽车。各V2M的配置如表1所示。各V2M接入的EV动力电池总容量和自身最大负载如表2所示。

表1 各V2M的配置与最大负载

Table 1 Configuration of each V2M and maximum load

| 编号 | PV/kW | WT/kW | GT/kW | DS/ (kW·h) | EV/ (kW·h) | Load/ (kW·h) |
|----|-------|-------|-------|---------------|---------------|-----------------|
| 1 | 200 | 200 | 50 | 350 | 160 | 300 |
| 2 | 450 | 300 | 100 | 400 | 360 | 350 |
| 3 | 450 | 200 | 50 | 350 | 320 | 325 |
| 4 | 150 | 200 | 20 | 250 | 120 | 250 |
| 5 | 400 | 300 | 100 | 400 | 320 | 375 |

算法求解周期为24 h,以1号的V2M为例:PV配置为200 kW,WT最大发电功率为200 kW,微型燃气轮机配置为50 kW;储能单元采用铅酸蓄电池,配置总和SOCmax(state of charge)为350 kW·h,相应最小SOCmin为50 kW·h,设置最大充放电功率为50 kW,充放电效率0.9,初始SOC为50 kW·h;1号V2M接入20辆电动汽车,全部电动汽车EVSOCmax总和为160 kW·h,最大充放电功率80 kW,总计最小EVSOCmin为40 kW·h;接入V2M的电动汽车一般通过Aggregator协同管理,参与调度,根据参考文献[21]提供的统计数据:EV接入和驾离时间具有明显的随机分布特征,即EV驶入时间集中在每晚18:00~19:00,驶离时间集中在每天上午07:00时;电动汽车在第2天离开时,都以满电状态驶离;每天行驶路程近似满足对数正态分布,因此EV接入时的初始SOC具有一般正态分布特征,而且除电动汽车外,V2M系统内部总的负载最大值为300 kW;分时优化时段内,微源预测及负载预测如图3所示,满意度函数中参数的设置参考文献[10]。

4.2 算例方案

1) 根据天气预报及负荷预测,V2M确定24 h内DG出力以及用户负荷分布情况;

2) 根据DG出力及用户负荷,V2M确定自身在博弈中的角色,即确定是购电方或者售电方;

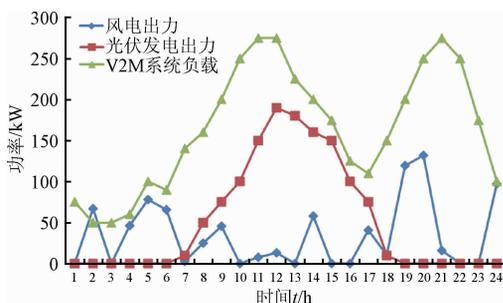


图3 1号V2M 24 h微源与负荷的预测功率
Fig. 3 24 hours power forecasting of DGs and load for V2M No. 1

3) 售电方根据式(4)计算 d_i^j ;

4) 购电方根据式(22)计算 c_i^{i*} ;

5) 根据购电方的 c_i^{i*} ,售电方根据式(23)计算 l_i^j ;

6) 根据 l_i^j 和 d_i^j ,参考现有微电网优化模型及方法,对所有V2M进行优化调度。

4.3 算例结果分析

根据相应天气条件和负荷预测,由式(4),可得各V2M的 d_i^j 功率分布情况,如图4所示。

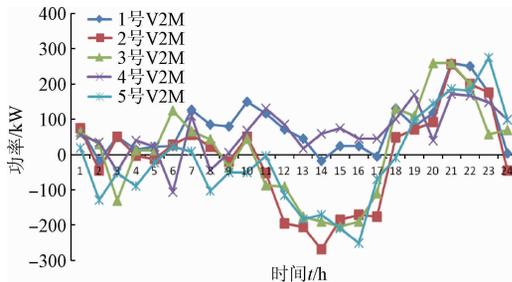


图4 各V2M 24 h的 d_i^j 功率分布情况

Fig. 4 Power distribution of each d_i^j in 24 hours

根据各一天24个时段的V2M的 d_i^j 正负情况,可以确定各时段的V2M博弈身份, $d_i^j > 0$ 表示有电力富余,为售电方,反之为购电方,从而计算出各时段的V2M购电方个数 k ,结果如图5所示。

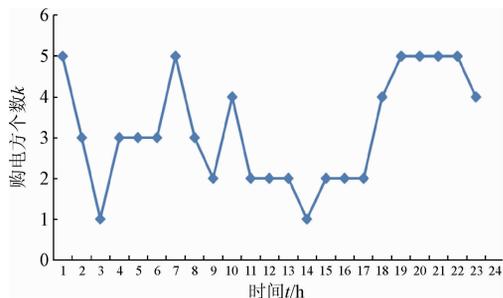


图5 各时段购电方个数 k

Fig. 5 Number of electricity buyers in each period

根据式(22)计算购电方各时段,博弈均衡无序电价 c_t^{i*} ,如图6所示。然后将 c_t^{i*} 代入式(23),求得各售电方的售电量,如图7所示。

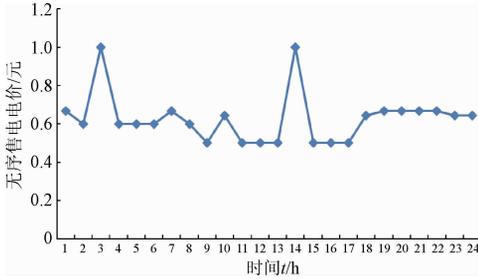


图6 博弈均衡无序电价

Fig. 6 Game equilibrium price

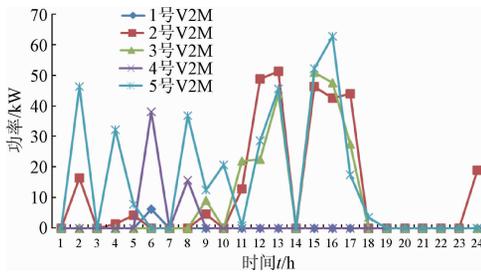


图7 24 h 内 V2M 售电方销售电量分布

Fig. 7 Distribution of V2M sales in 24 hours

如果 V2M 各按照传统方式与公网进行电力交易,以 1 号微电网为例,采用参考文献[20]的传统电价定价模式,1 号 V2M 的运行优化结果如图 8 所示。

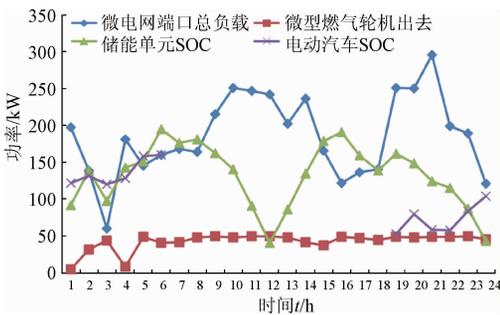


图8 传统电价策略下1号V2M优化运行结果

Fig. 8 V2M optimization results with traditional pricing strategy

如果采用本文建立的多 V2M 博弈定价方法,1 号 V2M 的运行优化结果如图 9 所示。

与图8相比较,虽然 EV 也参与了系统的调度,当是 EV 储能单元的放电曲线更低,EV 的 SOC 利用率更高,而且仍然保证了满电量驶离微电网;DS 在一天开始和结束时的荷电状态同样保持不变,但是,DS 充放电曲线峰值得到增加,最高 SOC 达到极值,DS 的容量也被充分利用。

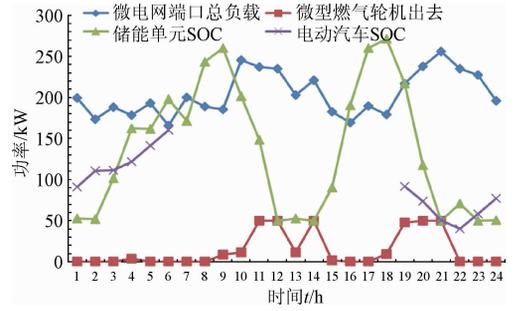


图9 博弈分时电价下1号V2M优化运行结果

Fig. 9 Optimal operation results of V2M with game price

1 号 V2M 在传统电价策略与 Stackelberg 博弈下的端口总负载曲线对比,如图 10 所示。采用 Stackelberg 博弈分时电价策略,1 号 V2M 的端口的总负荷峰值相比传统电价策略时更低,功率分布也相比更平均,由此可见对于多 V2M 系统的端口负荷,Stackelberg 博弈分时电价策略发挥了“削峰填谷”的作用。

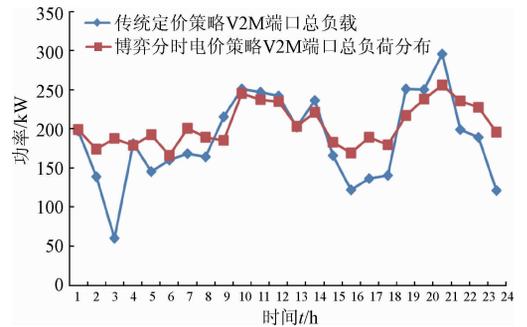


图10 博弈分时定价与传统定价策略下1号V2M负荷分布结果对比

Fig. 10 Loads distribution comparison between the TOU game pricing strategy and traditional pricing strategy

5 实验方案与求解

5.1 实验参数

采用半实物平台建立 3 个 V2M 参与博弈的场景, V2M 包含 3 kW PV 发电、3.7 kW 连轴对拖模拟 WT 发电系统、4 kW · h 铅酸储能单元系统和 3 kW · h 锂电池模拟电动汽车接入。各 V2M 的配置如表 2 所示,实验方案参见 4.2 节,分时优化时段内,以 1 号 V2M 为例的微源预测及负载预测如图 11 所示。各 V2M 的 d_t^i 功率分布情况图,如图 12 所示。

表2 半实物 V2M 的配置

Table 2 Configuration of experimental V2M

| 编号 | PV/kW | WT/kW | DS/ (kW·h) | EV/ (kW·h) | Load/ (kW·h) |
|----|-------|-------|---------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0.5 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1.5 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 |

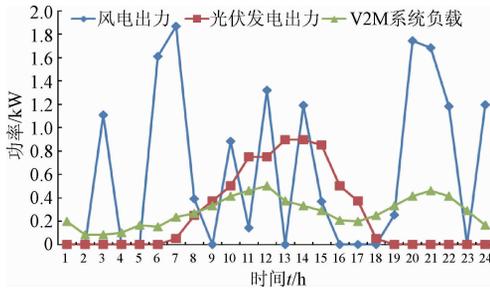


图 11 1号 V2M 24 h 微源与负荷的预测功率
Fig. 11 24 hours power forecasting of DGs and load for V2M No. 1

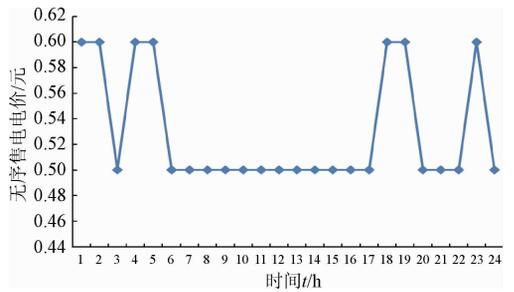


图 14 博弈均衡无序电价
Fig. 14 Game equilibrium price

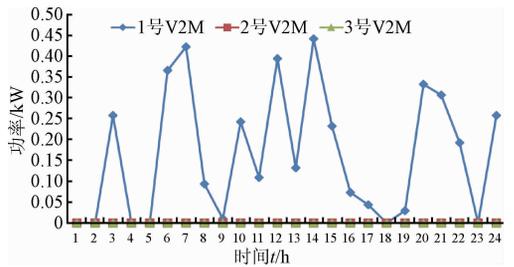


图 15 24 h 内 V2M 售电方销售量分布
Fig. 15 Distribution of V2M sales in 24 hours

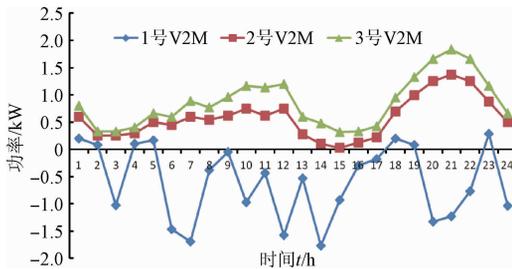


图 12 各 V2M 24 h 的 d_i^j 功率分布情况
Fig. 12 Power distribution of each d_i^j in 24 hours

5.2 算例结果分析

各时段的 V2M 购电方个数 k , 结果如图 13 所示。根据式(22)计算购电方各时段, 博弈均衡无序电价 c_i^{i*} , 如图 14 所示。然后根据式(23), 求得各售电方的售电量, 如图 15 所示。

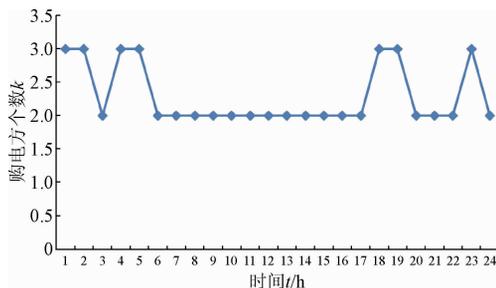


图 13 各时段购电方个数 k
Fig. 13 Number of electricity buyers in each period

3号 V2M 在传统电价策略与 Stackelberg 博弈下的端口负载曲线对比, 如图 16 所示。与算例仿真相似, 3号 V2M 的端口的总负荷峰值相比传统电价策略时更低, 功率分布也相比更平均。

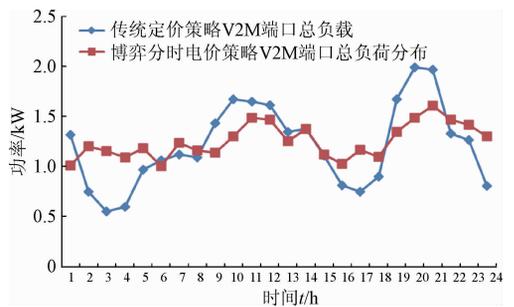


图 16 博弈分时定价与传统定价策略下
3号 V2M 负荷分布结果对比
Fig. 16 Loads distribution comparison between the TOU game pricing strategy and traditional pricing strategy

6 结 论

针对多 V2M 电力交易场景, 建立了基于 Stackelberg 博弈均衡的多 V2M 电价博弈场景。博弈双方为 V2M 售电方和购电方, 由 V2M 当前负荷决定是否为售电方或购电方由 V2M, 角色变换灵活。在博弈场景中, 建立了两级博弈, 分析了博弈的 4 个要素, 建立了 Stackelberg 博弈模型, 严格分析和证明了两级博弈中, 各自的 NE 存在性, 并求解

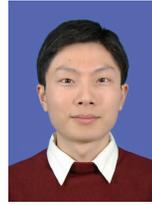
了 NE。完成定价策略后,对于新的功率条件,对比传统定价策略下的 V2M 端口负荷分配,证明了所建立的基于 Stackelberg 博弈均衡多 V2M 电力交易模型的有效性。

参考文献

- [1] ERSAL T, AHN C, HISKENS I A, et al. Impact of controlled plug-in EVs on microgrids: A military microgrid example[J]. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011, 5(22):1-7.
- [2] VILLAFÁILA-ROBLES R, LLORET-GALLEGO P, HEREDERO-PERIS D, et al. Electric vehicles in power systems with distributed generation: Vehicle to Microgrid (V2M) project [C]. International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, IEEE, 2012: 1-6.
- [3] 曹一家, 苗轶群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):1-6.
CAO Y J, MIAO Y Q, JIANG Q Y, et al. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 1-6.
- [4] 于会群, 钟永, 张浩, 等. 微电网混合储能系统控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(5): 730-738.
YU H Q, ZHONG Y, ZHANG H, et al. Research on control strategy of hybrid energy storage system in microgrid[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(5):730-738.
- [5] 余岳, 粟梅, 孙尧, 等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1261-1268.
YU Y, SU M, SUN Y, et al. Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicle. [J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1261-1268.
- [6] 李雪亮, 吴奎华, 冯亮, 等. 电动汽车动力电池与风电协同利用的优化调度策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(4):501-509.
LI X L, WU K H, FENG L, et al. Optimization scheduling strategy research on synergistic utilization of electric vehicle batteries and wind power [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 31(4): 501-509.
- [7] 李生虎, 丁明. 电力市场中基于电价弹性的电力系统运行可靠性的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 34 - 40.
LI SH H, DING M. Coordination to power system operational reliability in power market based on price elasticity[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 34-40.
- [8] 余小莉, 郝玢鑫. 新型绿色电动汽车电池更换站的研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10):16-20.
SHE X L, ZHU B X. Research on novel green electric vehicle battery replacement station [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(10):16-20.
- [9] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [10] YANG P, TANG G., NEHORAI A. A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 884-892.
- [11] ATZENI I, ORDEZ L G, SCUTARI G, et al. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 866-876.
- [12] 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 Y, SU M, SUN Y, HAN H. Time-of-use electricity price game via V2M. [J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):200-207.
- [13] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4):848-857.
ZHAO M, SHEN CH, LIU F, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [14] JOOBYUNG L, JUN G, JUN K C, et al. Distributed energy trading in microgrids: A game-theoretic model and its equilibrium analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3524-3533.
- [15] PALMA-BEHNKE R, BENAVIDES C, ARANDA E, et al. Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism[C]. Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), 2011: 1-8.
- [16] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.

- [17] ATZENI I, ORDEZLG, SCUTARI G, et al. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 866-876.
- [18] HARSANYI J C, SELTEN R. A general theory of equilibrium selection in games[M]. Massachusetts: MIT Press Books, 1988.
- [19] SINHA A, BASU A K, LAHIRI R N, et al. Setting of market clearing price (MCP) in microgrid power scenario[C]. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008: 1-8.
- [20] 余岳, 粟梅, 孙尧, 等. 基于模糊去约束法的 V2M 系统运行优化[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(10): 77-83.
YU Y, SU M, SUN Y, et al. Fuzzy control to reduce the constraints of V2M system optimal scheduling [J]. Journal of Hunan University : Natural Sciences, 2014, 41(10): 77-83.
- [21] 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(11): 203-212.

作者简介



余岳, 分别在 2007 年和 2015 年于中南大学获得硕士学位和博士学位, 现为中南大学副教授, 主要研究方向为微电网运行优化、电力电子与电力传动。

E-mail: 68613367@qq.com

Yu Yue received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Central South University in 2007 and 2015, respectively. Now he is an associate professor in Central South University. His main research interests include microgrid operation optimization and power electronics and power drives.



韩华 (通讯作者), 分别在 1998 年和 2008 年于中南大学获得硕士学位和博士学位, 现为中南大学教授, 主要研究方向为可再生能源发电、电力电子装置控制。

E-mail: 643936120@qq.com

Han Hua (Corresponding author) received her M.Sc. and Ph.D. degrees both from Central South University in 1998 and 2008, respectively. Now she is a professor in Central South University. Her main research interests include renewable energy power generation system, and power electronic equipment.