

增量市场环境下多供电主体市场博弈模型与交易行为分析

刘源¹, 潘雪莉², 杨军¹, 陈艳², 胡文博², 邹芹²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北武汉 430072; 2. 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司, 湖北武汉 430013)

摘要:研究新增供电主体参与电力市场的运营机制对电力市场的健康和可持续发展具有重要意义。构建包含配电网运营商、分布式电源运营商、储能运营商和用户的增量市场模型,分析各主体间的市场关系和价格传导机制;基于市场博弈理论,利用纳什均衡解的存在性条件构建增量市场环境下多主体参与的双层优化模型。仿真结果验证了所提模型及求解方法的有效性,增量市场环境下运营商供给能力是影响其博弈策略的关键因素,外部监管手段有利于培植新的供电主体,但也存在由于运营商规模不对等造成垄断电价的交易问题。

关键词:增量市场;博弈理论;双层优化;多目标优化;纳什均衡

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911033

0 引言

随着电力体制改革逐步深化,增量配电网试点改革逐步引起业内人员关注^[1]。虽然规定每个增量园区内只能有一家拥有配电网运营权的售电公司,但多家市场主体参与售电业务已具备明确的政策信号。目前,已有关于部分增量配电网的市场研究^[2-4],但市场运营阶段增量配电网下多家售电公司的竞争模式与价格机理尚未见报道。

针对多主体参与的电力市场交易机制以及用户与电网企业互动模式,国内外已经开展了相关研究工作。众多研究^[5-13]为开放电力市场改革、培育多元化电力市场主体、鼓励社会资本投资及完善电价引导机制提供了一定的理论支撑,但对用户侧可调度资源^[5-6]和分布式电源、储能等新兴资源的接入考虑不足,也没有深入分析影响运营商市场竞争策略^[8-9]、用户用能行为^[10-11]的相关因素。为此,本文在充分考虑储能系统和用户侧可调度资源市场参与的同时,构建包含多个供电主体的增量市场交易架构,研究基于博弈理论的多主体电能交易过程,分析在开放电力市场和增量试点过程中存在的交易问题与薄弱环节。

本文的主要贡献在于:基于双层优化方法和主从博弈原理,构建增量市场架构下多供电主体的主从博弈模型,并分别基于纳什均衡解的充要条件和多目标优化方法进一步描述外部监管与自由竞争2种场景下的博弈模型;基于并行计算的混合智能算法求解并仿真研究2种场景下的运营商竞价策略与用户用能行为,分析外部监管手段、储能盈利大小对

运营商市场行为的影响和市场薄弱环节,为不同阶段电力市场改革及价格引导机制的完善提出相关建议。

1 增量市场框架及交易模式

结合图1具体介绍增量配电网地区多主体参与的增量售电业务的开展方式。

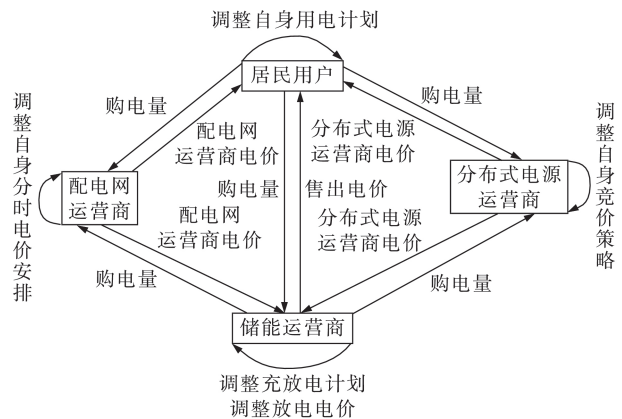


图1 增量市场的电力交易运营模式

Fig.1 Power transaction operation mode in increment market

配电网运营商发布当日的电价安排,以调节区域内的用电负荷;分布式电源运营商根据历史竞价情况发布竞争性电价,以保证在自身发电量充足的情况下有足够的价格优势,尽可能地出售电能;根据配电网运营商和分布式电源运营商发布的电价,居民用户利用家中的可调负荷调整自身的用电安排,在一定水平上降低用电成本;储能运营商选取具有竞争力电价的一方安排充电,并在二者电价较高时段将储能作为辅助电源售电给用户来赚取中间差价。由以上分析得出,增量市场的电力交易运营模式可归纳为多主体参与的多阶段博弈问题,多方主

收稿日期:2019-03-29;修回日期:2019-10-08

基金项目:教育部人文社会科学研究项目(17YJCZH212)

Project supported by the Humanities and Social Science Research Program of Ministry of Education(17YJCZH212)

体在保证市场可持续性的基础上充分开展竞争与互动,在经历多阶段的博弈后,最终市场趋于稳定,各方价格策略及用电计划不再改变。

2 主要市场交易主体的数学模型

本节将对第 1 节所介绍的市场主体及参与者的交易模型进行详细介绍。

2.1 居民用户

用户侧均为用电负荷,不存在储能设备,根据消耗电能的方式及负荷属性可以将负荷划分为可平移负荷和刚性负荷。

将可平移负荷记为 P^A ,这类负荷需要消耗的电能总量固定;将刚性负荷记为 P^B ,这类负荷工作时间和消耗的电量都不可调。任意时刻 t 的负荷 P_t^L 均由 P_t^A 、 P_t^B 两部分构成:

$$P_t^L = P_t^A + P_t^B \quad t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (1)$$

其中, T 为一个交易周期包含的时刻数。模型中各时刻负荷需满足一定的条件,其中可平移负荷在可平移区间内消耗的电能总量是固定的,在可平移区间外不消耗电能,该过程可用式(2)和式(3)进行表示。

$$\sum_{t \in [\alpha_n, \beta_n], \forall n} P_t^A = Q^A \quad (2)$$

$$P_t^A = 0 \quad t \notin [\alpha_n, \beta_n] \quad (3)$$

其中, α_n 为第 n 个可平移时段开始的时刻; β_n 为第 n 个可平移时段结束的时刻; Q^A 为可平移时段内消耗的电能总量。由于用户负荷不具备能量存储能力,电能必须即销即用,因此需要考虑功率平衡约束:

$$P_t^{\text{DNL}} + P_t^{\text{DGL}} + P_t^{\text{SL}} = P_t^L \quad (4)$$

其中, P_t^{DNL} 为 t 时刻配电网运营商向用户出售的电能功率; P_t^{DGL} 为 t 时刻分布式电源运营商向用户出售的电能功率; P_t^{SL} 为 t 时刻储能运营商向用户出售的电能功率。

根据配电网运营商或分布式电源运营商及其他新增供电实体 M 提供的价格策略 p_m , 用户通过调节自身的用电计划以及选择最佳的供电商来实现自身利益的最大化。用户侧的用电成本可由式(5)计算。

$$C(P_t^L, p_{m,t}) = \sum_{i=1}^T P_i^L p_{m,i} \Delta t = \sum_{i=1}^T (P_i^{\text{DNL}} p_{\text{DN},i} + P_i^{\text{DGL}} p_{\text{DG},i} + P_i^{\text{SL}} p_{\text{S},i}) \Delta t \quad m \in M \quad (5)$$

其中, $p_{m,t}$ 为 t 时刻由供电实体 m 提供的负荷功率; $p_{\text{DN},t}$ 、 $p_{\text{DG},t}$ 和 $p_{\text{S},t}$ 分别为 t 时刻配电网运营商、分布式电源运营商和储能运营商的售电电价; Δt 为调度系统刷新的时间间隔。值得注意的是,为追求效用最大化,用户的效用函数需变为相反数形式,即 $U_c = -C$ 。

2.2 配电网运营商

基于分时电价配电网运营商的营收可表示为:

$$U_D = \sum_{i=1}^T p_{\text{DN},i} \Delta t (P_i^{\text{DNL}} + P_i^{\text{DNS}}) \quad (6)$$

其中, P_i^{DNS} 为 t 时刻配电网运营商流向储能系统的充电功率。

配电网运营商在追求自身利益最大化的过程中需满足下列约束条件。

(1) 系统爬坡约束。

对于配电网运营商而言,其电能主要来源于上级电网中的旋转设备,任意时段其功率波动应满足上级电网机组的爬坡约束。

$$-R_D^{\text{DN}} \Delta t \leq P_{t+1}^{\text{DN}} - P_t^{\text{DN}} \leq R_U^{\text{DN}} \Delta t \quad (7)$$

其中, R_D^{DN} 和 R_U^{DN} 分别为上级电网机组的最大向下和向上爬坡速度; P_{t+1}^{DN} 和 P_t^{DN} 分别为 $t+1$ 时刻和 t 时刻配电网提供的总功率。

(2) 系统容量约束。

由于配电网运营商所辖区域与上级电网联络的变压器、线路等设备容量限制,其电能售出的最大功率应满足式(8)所示条件。

$$0 \leq P_t^{\text{DN}} \leq P_{t,\max}^{\text{DN}} \quad (8)$$

其中, $P_{t,\max}^{\text{DN}}$ 为系统所允许的最大功率。

(3) 市场定价约束。

配电网运营商在参与市场竞争过程中,应履行保底供电义务,向居民所售电价应服从国家定价指导区间,不能在追求利益最大化情况下无限制调节自身售电价格。因此,为防止运营商的趋利行为而产生“宰客”电价,破坏市场的可持续性,应由外部监管部门设置一定的价格约束,明确市场利益体量:

$$p_{\text{DN}}^{\min} \leq p_{\text{DN},t} \leq p_{\text{DN}}^{\max} \quad (9)$$

其中, p_{DN}^{\min} 和 p_{DN}^{\max} 分别为配电网运营商指导电价的下限和上限。

2.3 分布式电源运营商

分布式电源运营商通过调整自身的售电电价参与增量市场的利益分配。用售电销售额构造分布式电源运营商的效用函数:

$$U_G = \sum_{i=1}^T p_{\text{DG},i} (P_i^{\text{DGL}} + P_i^{\text{DGS}}) \Delta t \quad (10)$$

其中, P_i^{DGS} 为 t 时刻分布式电源运营商向储能运营商出售的电能功率。

分布式电源运营商在参与增量市场交易过程中的基本约束与配电网运营商一致,包括系统爬坡约束、系统容量约束和市场定价约束,此处不再赘述。

2.4 储能运营商

储能运营商基于分时电价政策,可以积极参与需求侧响应;在谷时段择优选择供应商储存电能,在峰时段提高价格向用户出售电能获取差价收益。该

收益可以用式(11)表示。

$$U_S = \sum_{t=1}^T p_{S,t} P_t^{SL} \Delta t - \left(\sum_{t=1}^T p_{DN,t} P_t^{DNS} \Delta t + \sum_{t=1}^T p_{DG,t} P_t^{DGS} \Delta t \right) \quad (11)$$

储能运营商在制定自身充放电计划和售电价格时需满足如下约束条件。

(1) 储能系统荷电状态 SOC (State Of Charge) 约束。

储能系统充放电后的荷电状态应约束在一定的范围内。荷电状态与充放电功率具有一定的耦合关系：

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{\max} \quad (12)$$

$$\text{SOC}_{t+1} = \text{SOC}_t + \eta_c \frac{(P_t^{DNS} + P_t^{DGS}) \Delta t}{E^S} - \frac{1}{\eta_D} \frac{P_t^{SL} \Delta t}{E^S} \quad (13)$$

其中, SOC_t 为 t 时刻储能系统的荷电量; SOC_{\min} 和 SOC_{\max} 分别为储能系统的最小和最大荷电状态; η_c 和 η_D 分别为储能系统的充电效率和放电效率; E^S 为储能系统的最大电能储存容量。

(2) 最大充放电功率约束。

储能系统的最大充放电功率应不超过设备容量。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{C,t}^S \leq P_{C,\max}^S \\ 0 \leq P_{D,t}^S \leq P_{D,\max}^S \end{cases} \quad (14)$$

其中, $P_{C,\max}^S$ 和 $P_{D,\max}^S$ 分别为储能系统的最大充电功率和最大放电功率; $P_{C,t}^S$ 和 $P_{D,t}^S$ 分别为储能系统在 t 时刻的充电功率和放电功率。

(3) 储能爬坡约束。

相比于传统电源, 储能系统爬坡速度快, 但其爬坡时间也不能忽略不计。

$$-R_D^S \Delta t \leq P_{t+1}^S - P_t^S \leq R_U^S \Delta t \quad (15)$$

其中, R_D^S 和 R_U^S 分别为储能系统的最大向下和向上调节速度; P_t^S 为 t 时刻储能系统功率。

(4) 售电价格约束。

为保证储能运营商的售出电价不低于充电成本, 其售电价格可以由售价系数和充电成本进行表示:

$$p_{S,t_s} = K_s \frac{\sum_{t=1}^{t_s} p_{DN,t} P_t^{DNS} \Delta t + \sum_{t=1}^{t_s} p_{DG,t} P_t^{DGS} \Delta t - \sum_{t=1}^{t_s} p_{S,t} P_t^{SL} \Delta t}{\sum_{t=1}^{t_s} (P_t^{DNS} + P_t^{DGS} - P_t^{SL}) \Delta t} \quad (16)$$

其中, K_s 为售电价格系数, 且 $K_s \geq 1$; t_s 为储能向用户售电的时刻。

3 增量市场主从博弈模型及求解方法

3.1 市场博弈模型的构建

在本文所构建的增量市场模型中, 博弈主体包括领导者配电网运营商 D 及其价格策略 p_{DN} , 分布式

电源运营商 G 及其价格策略 p_{DG} , 储能运营商 S 及其价格策略 p_S , 充电功率 P^{DNS} 、 P^{DGS} , 以及跟随者居民用户 C 及其用电计划 P^{DNL} 、 P^{DGL} 、 P^{SL} 。判断博弈过程达到均衡的标准为: 在均衡点处, 任意领导者或跟随者单方面改变自身竞争策略都不会引起其他主体策略的改变。当该市场博弈问题达到均衡点时, 策略集合 a^* 应满足下列充要条件:

$$\begin{aligned} U_n(a_i^*, a_{-i}^*) &\geq U_n(a_i, a_{-i}^*) \\ \forall n \in \{D, G, S, C\}, \forall i \in I = \{1, 2, 3, 4\} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, a_i^* 为第 i 个市场主体在均衡点采取的最优策略; a_{-i}^* 为除第 i 个市场主体外的其他所有市场主体在均衡点采取的最优策略; a_i 为第 i 个市场主体可能采取的策略。

在构建博弈模型时分为以下 2 种情况: Case 1, 这种情况为具备外部调节与监管的市场模型, 运营商在外部监管条件下达成市场配额, 各自具备一定的市场影响力, 与用户及储能运营商展开博弈; Case 2, 这种情况为自由竞争的市场模型, 运营商充分竞争, 同时与用户及储能运营商展开博弈。

Case 1 的数学模型可以描述为:

$$\begin{cases} \max_{x,y} \alpha U_D + \beta U_C \\ \text{s.t.} \quad u_{li} \leq x_i \leq u_{ui} \\ \quad \quad f_i(x, y) = c_i \\ \quad \quad \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \max_{x,y} U_C \\ \text{s.t.} \quad u_{li} \leq y_i \leq u_{ui} \\ \quad \quad g_i(y_i) = z_i \end{cases}$$

其中, $i = 1, 2, \dots$; x, y 分别为模型上层和下层所包含的变量; u_{li} 和 u_{ui} 分别为第 i 个不等式约束的下限和上限; x_i, y_i 为第 i 个不等式约束中的变量; c_i 和 z_i 分别为上层和下层模型中第 i 个等式约束数值侧的数值大小; α 和 β 分别为配电网运营商和分布式电源运营商的市场影响系数, 取值范围为 0~1, 该影响力由外部监管与调节手段决定。该双层优化模型的上层考虑运营商策略空间的约束条件, 目标函数为二者效用函数的线性加权, 上层问题的本质是利用多目标优化来解决博弈问题^[14]; 下层考虑用户和储能运营商策略空间的约束条件, 目标函数为用户购电费用最小。

Case 2 的数学模型可以描述为:

$$\begin{cases} \min_{x,y} \Delta U = \max \{ \Delta U_D, 0 \} + \max \{ \Delta U_C, 0 \} \\ \text{s.t.} \quad u_{li} \leq x_i \leq u_{ui} \\ \quad \quad f_i(x, y) = c_i \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \min_{x,y} U_C \\ \text{s.t.} \quad u_{li} \leq y_i \leq u_{ui} \\ \quad \quad g_i(y_i) = z_i \end{cases}$$

其中, ΔU_D 和 ΔU_C 分别为配电网运营商和分布式电源运营商 2 次博弈过程中效益函数的变化量; ΔU 为 2 次博弈过程中所有效益函数的最大变化量。基于式(17)所述纳什均衡解的充要条件, 利用优化问题的对偶理论将不等式约束转化为上层模型的最小化问题, 根据文献[15]中对适应度函数的设计, 构造如式(19)所示的上层目标函数, 保证了上层领导者之间的自由博弈与充分竞争。纳什均衡解的存在性证明如附录所示。

3.2 模型的求解方法

Case 1 和 Case 2 的数学模型只是目标函数的表达形式有所区别, 为了更清晰表达, 这里以 Case 1 的式(18)为例, 对上、下层包含的目标函数和约束条件进行进一步说明: 上层目标函数为线性权重的配电网运营商和分布式电源运营商效用函数之和, 上层约束条件包括配电网运营商和分布式电源运营商的市场定价约束(式(9)和 2.3 节中略写的电价约束); 下层目标函数为用户购电费用最低(式(5)), 下层约束包括配电网运营商和分布式电源运营商的容量、爬坡约束(式(7)、(8)和 2.3 节中省略的分布式电源容量和爬坡约束)以及储能荷电状态约束(式(12)、(13))、最大充放电功率约束(式(14))、爬坡约束(式(15))、售电价格约束(式(16))。区别于两阶段优化问题, 上层模型与下层模型的最优解并非直接传递关系, 而是相互耦合影响: 上层模型通过电价变量作用于下层优化结果, 下层优化结果的功率变量反作用于上层最优电价的制定。

因此, 为保证上、下层循环迭代过程的收敛性, 在设计求解算法时采用遗传算法作为整个模型的外部趋优控制环节, 在内部适应度函数中利用非线性规划 fmincon 求解器求解下层优化问题。同时考虑到遗传算法中每一代种群中个体间相互独立, 不存在耦合的特点, 完全满足并行计算的条件, 在每一代种群中计算适应度函数时, 可以充分利用硬件水平引入并行计算以缩短由于迭代及大量随机个体增加的计算时间。本文通过 MATLAB2009 及以上版本支持的并行 for 循环 parfor 实现相关并行计算操作。整个算法的架构如图 2 所示。

4 算例分析

4.1 算例介绍

居民负荷情况如图 3 和表 1 所示。分布式电源运营商的最大爬坡速度为 200 kW/h, 设备最大容量为 200 kW; 配电网运营商的最大爬坡速度同样为 200 kW/h, 设备最大容量为 900 kW; 储能运营商的最大爬坡速度为 100 kW/h, 最大充、放电功率均为 100 kW, 充、放电效率为 0.9, 储存的最大电能容量为 3000 kW·h, 本算例中储能的初始容量为 300 kW·h, 初始电能价格为 1.6 元/(kW·h)。配电网运营商的

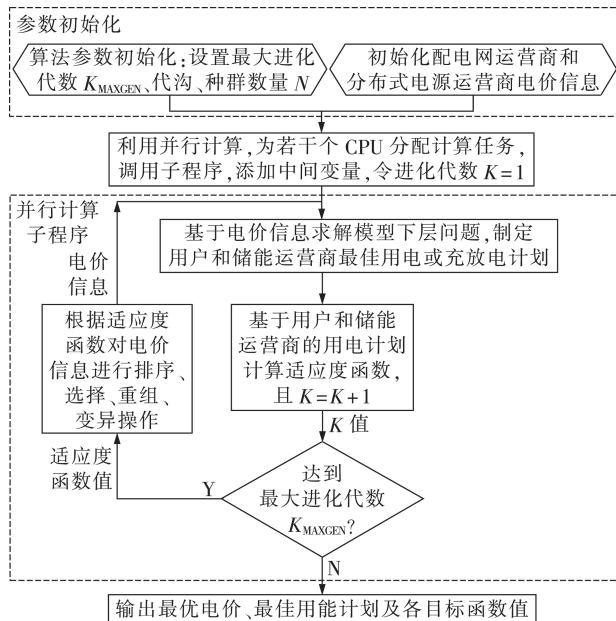


图 2 基于并行计算的混合智能算法程序架构

Fig.2 Framework of hybrid intelligent algorithm based on parallel computing

最高电价设置为 2 元/(kW·h), 分布式电源运营商的最高电价设置为 1.8 元/(kW·h)。储能运营商的盈利系数在 [1, 2] 区间变化。

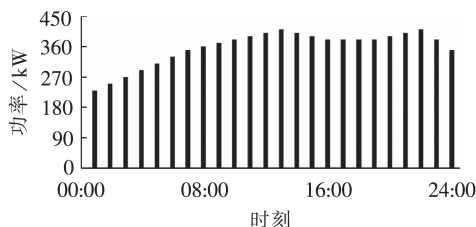


图 3 居民用户的刚性负荷需求

Fig.3 Rigid load demand of resident users

表 1 居民可平移负荷

Table 1 Users' flexible load

可平移负荷	可平移时段	负荷/kW
1	01:00—04:00	420
2	15:00—17:00	630

4.2 博弈模型的优化结果分析

算法在 RAM 为 16 GB、CPU 为 8 核 Intel Xeon E5-2407v2@2.40 GHz 服务器上的平均运行时间为 13 644.47 s。求解 Case 1 和 Case 2 的博弈模型得到配电网与分布式电源运营商电价如图 4 所示。最优电价政策下用户的用电行为如图 5 所示。

如图 4(a) 所示, 在 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.5$ 的情况下, 认为配电网运营商与分布式电源运营商具备相同的市场影响力, 配电网运营商在绝大多数时刻报价要高于分布式电源运营商, 且 01:00、03:00、04:00 等 8 个时刻的报价接近其价格约束的上限。对比图 5(a) 中用户的用电行为对以上报价策略进行解释: 图 5(a)

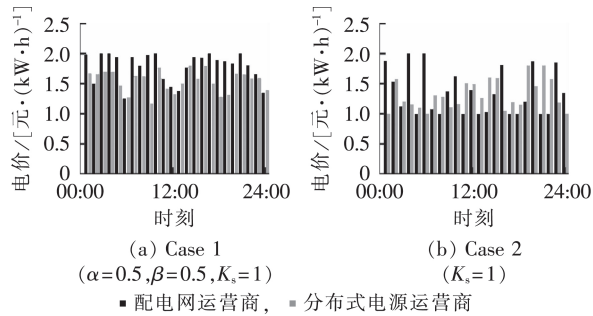


图4 配电网运营商与分布式电源运营商的最优电价政策
Fig.4 Optimal electricity price policy of distribution network agent and distributed generation agent

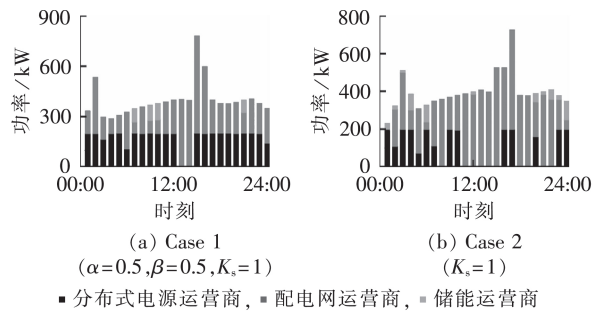


图5 最优电价政策下用户的用电行为

Fig.5 Users' power consumption behavior under optimal electricity price policy

中各时刻分布式电源运营商功率基本满发,这是由于分布式电源运营商的电价较配电网运营商的电价低,用户优先选择分布式电源运营商进行供电;但即使分布式电源运营商处于满发状态,仍不能满足全部用户的功率需求,用户不得不选择电价较高的配电网运营商进行供电。

Case 2模型的优化电价如图4(b)所示。相比于Case 1的结果,更自由的博弈环境使得分布式电源运营商采取了更为激进的报价策略。结合图5(b)中Case 2的用户用电行为来看,激进的报价策略导致其售电量严重降低。计算图4中Case 1和Case 2的平均电价,Case 1的最终电价水平要高于Case 2。因此,适当的竞争有利于发挥市场决定资源配置的作用。

进一步观察用户的用电行为,用户在01:00—04:00和15:00—17:00的可平移负荷分配情况如图6所示。对于Case 1,在图6(a)中的01:00—04:00时段,配电网运营商和分布式电源运营商的报价在02:00时相对于其他几个可平移时刻均为最低,所以用户集中选择在02:00消耗可平移负荷,但考虑到系统的爬坡容量,2家运营商无法在一个时刻消纳所有的平移负荷,因此有小部分负荷选择在其他时刻进行消纳。Case 1的15:00—17:00及Case 2与上述分析同理,此处不再赘述。

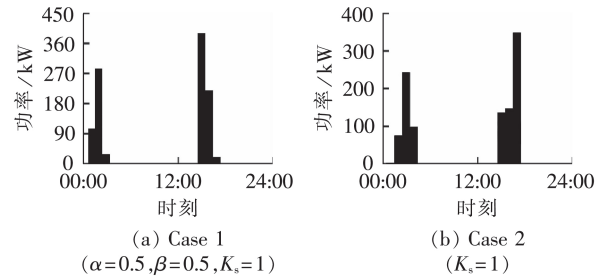


图6 最优电价政策下用户可平移负荷的分配情况
Fig.6 Allocation of translated load under optimal electricity price policy

4.3 储能运营商盈利系数分析

改变Case 1和Case 2的模型中售电价格系数,使其在1.1~2.0之间以步长0.1变化,得到储能运营商的平均电价水平和售出电能分别如图7和图8所示。观察图7(a)中的电价变化发现:改变Case 1的模型中售电价格系数只会影响其自身的电价策略,对配电网运营商和分布式电源运营商的平均电价水平均无影响。结合图8(a)可见,当售电价格系数大于1.3时,用户不再向储能运营商购买电能。因此,在Case 1的模型中大致可以判断储能运营商通过“低储高发”的利润空间在30%左右。

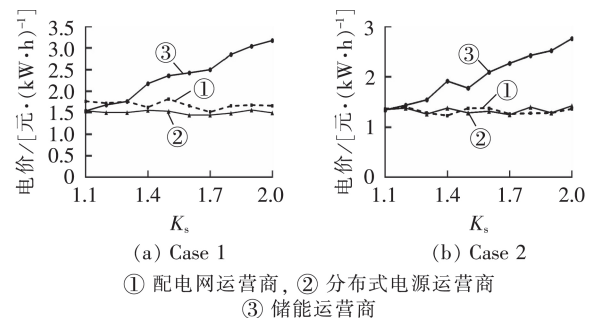


图7 储能运营商不同售电价格系数的平均电价水平

Fig.7 Average electricity price of energy storage agent under different profit coefficients

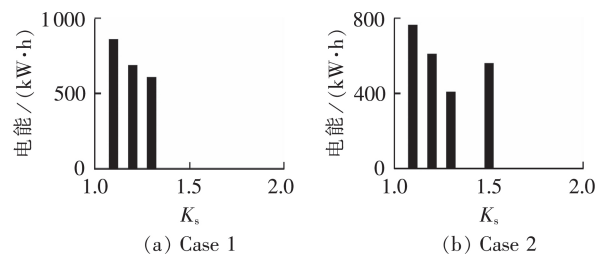


图8 储能运营商不同售电价格系数下的售出电能

Fig.8 Electricity sold by energy storage agent under different profit coefficients

观察图8(b)可见:随着储能运营商售电价格系数增大,售出电能大致呈现降低趋势;由于随机算法的解存在不稳定性,在 $K_s=1.4$ 时电价出现明显波动,导致该情况下售出电能下降至0,此时售出电能变化趋势与其他售电价格系数下不同。与Case 1同

理可以判断,Case 2 中储能运营商盈利的临界点大致在售电价格系数为 1.6 附近。

综合上述仿真可见,相比于 Case 1 中储能运营商的利润空间,Case 2 中储能运营商盈利的临界点较高。充分的竞争压低了电价,因此 Case 2 情况下利润空间更大。因此,开放的电力市场环境更有利于储能系统的投资回报。

4.4 运营商市场影响系数分析

改变 Case 1 的模型中分布式电源与配电网运营商的市场影响系数占比, α 的变化范围为 0.1~1; 为了便于对比分析,假设储能运营商售电价格系数均为 1。根据 10 组电价及用户用能行为数据,统计得到不同市场影响系数下分布式电源运营商与配电网运营商的电能交易费用情况如图 9 所示。

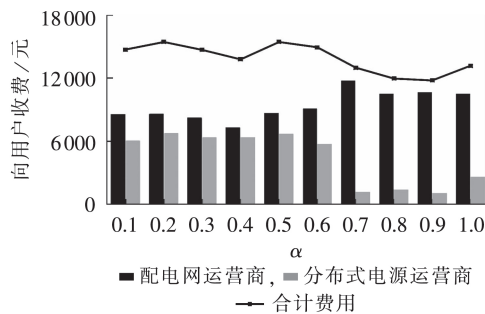


图 9 不同市场影响系数下运营商的电能交易费用

Fig.9 Electricity transaction cost by agents under different market influence coefficients

由图 9 可见,在配电网运营商市场影响系数逐渐增大的过程中,较之配电网运营商,分布式电源运营商的电能交易费用变化幅度更为明显,其对市场影响系数的敏感程度较低。利用规模经济理论可以对上述现象进行解释:当配电网运营商市场影响系数较小时,由于分布式电源运营商的规模远小于市场需求,即使分布式电源运营商可以卖出所有电能,也不能满足用户全部的用电需求,此时配电网运营商形成垄断,向不饱和的部分高价售电维持自身利益;而当配电网运营商市场影响系数较大时,配电网运营商为卖出更多电能而压低电价,以“低价多销”的方式维持自身利益,但分布式电源运营商规模较小,随着售电量减少只能靠提高电价的方式来尽可能维持自身利益,但电价越高购电的用户越少,因而在市场影响系数变化时其敏感程度极高,自身利益难以得到维持。综上所述,运营商的规模即供电能力,是影响运营商博弈行为的主要因素。

5 结论

本文提出包含配电网运营商、分布式电源运营商、储能运营商与用户的增量市场竞争机制,构建多主体参与的市场博弈模型,仿真验证了模型及算法

的可行性。得到的主要结论如下。

(1)现阶段储能投资的获利有限,仅通过“低储高发”获利甚至难以收回投资成本。因此,未来应逐步建立在增值服务市场的利益增长点,比如电网的削峰填谷、延缓设备升级改造等。

(2)相比于自由竞争的增量市场,通过外部监管或调节手段划分市场份额有利于市场的可持续发展以及培植新的供电主体。但自由竞争的市场更有利于降低用户的用能成本。

(3)由于电力行业的天然垄断特性,供给能力是影响供电主体参与市场竞争实力的主要因素。传统供电主体容易在市场主体实力不对等的情况下产生垄断电价,外部监管部门应严防发生这种情况。

在未来的工作中,笔者将考虑多供电主体在售电市场与辅助服务市场的同步参与,对政府相关指导意见提到的辅助服务市场(如紧急备用、可中断负荷的补贴政策、优化网损)开展相关研究,并寻求求解速度更快、收敛性更好、求解结果更稳定的优化算法。

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. 关于印发《增量配电业务配电区域划分实施办法(试行)》的通知,发改经体[2018]424 [Z]. 北京:国家发展改革委,国家能源局,2018.
- [2] 侯佳,吴志力,崔凯. 放开增量配电投资业务关键问题研究综述[J]. 电力建设,2017,38(9):127-131.
HOU Jia, WU Zhili, CUI Kai. Review on key issues of releasing incremental distribution network investment business[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 127-131.
- [3] 陈立,王蓓蓓,黄俊辉,等. 电网公司保底服务实施后的增量配电网投资策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):38-44.
CHEN Li, WANG Beibei, HUANG Junhui, et al. Asset investment strategy adapting default service of incremental distribution network for grid companies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 38-44.
- [4] 张金良,张文文,李德智,等. 基于合作博弈理论的增量配电网收益分配策略研究[J]. 电力需求侧管理,2018,20(4):16-21.
ZHANG Jinliang, ZHANG Wenwen, LI Dezhi, et al. Research on income distribution of incremental distribution network based on cooperative game theory[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(4): 16-21.
- [5] 魏繁荣,随权,林湘宁,等. 一种电网多主体场景下的制氢装置新运营模式及其调度策略[J/OL]. 中国电机工程学报. [2018-06-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.170517>.
- [6] 史开拓,刘念,张建华,等. 多运营主体的微电网随机匹配交易机制[J]. 电网技术,2016,40(2):587-594.
SHI Kaituo, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Random matching trading mechanism in microgrid of multi-operators[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 587-594.
- [7] 曾嘉志,赵雄飞,李静,等. 用电侧市场放开下的电力市场多主体博弈[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):129-136.
ZENG Jiazhi, ZHAO Xiongfei, LI Jing, et al. Game among multiple entities in electricity market with liberalization of power

- demand side market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24):129-136.
- [8] 马丽,刘念,张建华,等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3655-3661.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Distributed energy management of community energy Internet based on leader-followers game[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3655-3661.
- [9] 周楠,樊玮,刘念,等. 光伏微网的多主体合作运营模式及效益分配[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5):134-141.
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Multi-subject cooperative operation model and profit allocation of PV-based microgrid[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2016, 32(5):134-141.
- [10] 黄伟,闫彬禹,熊伟鹏,等. 基于两阶段博弈的主动配电网运营机制[J]. 南方电网技术, 2017, 11(9):79-87.
HUANG Wei, YAN Binyu, XIONG Weipeng, et al. Operating mechanism of active distribution network based on two-stage game[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9): 79-87.
- [11] 刘连光,潘明明,田世明,等. 考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6):1618-1625.
LIU Lianguang, PAN Mingming, TIAN Shiming, et al. A non-cooperative game analysis of an competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6):1618-1625.
- [12] 秦婷,刘怀东,王锦桥,等. 基于讨价还价博弈理论的分布式能源合作收益分配模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 134-140.
- QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):134-140.
- [13] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局域多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 191-203.
MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5):191-203.
- [14] 谢识予. 经济博弈论[M]. 上海:复旦大学出版社, 2002.
- [15] 杨铮,彭思成,廖清芬,等. 面向综合能源园区的三方市场主体非合作交易方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14):32-39, 47.
YANG Zheng, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Non-cooperative trading method for three market entities in integrated community energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):32-39, 47.

作者简介:



刘源

刘源(1993—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为分布式电源接入的配电网规划技术及电力市场(E-mail: ly_wuhu@foxmail.com);

杨军(1977—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电动汽车及分布式电源接入的电网调度运行及市场机制(E-mail: JYang@whu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Market game model and trading behavior analysis of multiple power supply agents in increment electricity market

LIU Yuan¹, PAN Xueli², YANG Jun¹, CHEN Yan², HU Wenbo², ZOU Qin²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Power Supply Company of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430013, China)

Abstract: It is of great significance for the healthy and sustainable development of electricity market to research the operation mechanism of new added power supply agents participating in the electricity market. An incremental market model including distribution network agent, distributed generation agent, energy storage agent and users is built, and the market relationship and price conduction mechanism among each agent are analyzed. Based on the market game theory and existence condition of Nash equilibrium solution, a bi-level optimization model of incremental market participating with multiple agents is constructed. Simulative results verify the effectiveness of the proposed model and solving method, the supply capacity of agents is the key factor influencing their game strategies in the incremental market environment, and external regulatory measures are conducive to the cultivation of new power supply agents, but the trading problem of monopoly price caused by the unequal scale of agents is also exists.

Key words: incremental market; game theory; bi-level optimization; multi-objective optimization; Nash equilibrium

附录:

定理 1^[1-2]: 记 $J=\{1, 2, 3\}$ 、 $K=\{1, 2\}$, 对任意 $i \in J$, X_i 为第 i 个领导者的策略空间, 笛卡尔积 $X=\prod_{i \in J} X_i$ 为所有领导者的策略空间, 同理笛卡尔积 $Y=\prod_{j \in K} Y_j$ 为所有跟随者策略空间。

$f_i(x_i, y_i)$ 为第 i 个领导者的目标函数; $g_j(x_j, y_j)$ 为第 j 个跟随者的响应函数, G 为所有跟随者的一个集值映射。均衡存在性定理如下。

对任意 $i \in J$, X_i 和 Y 分别为 2 个局部凸 Hausdorff 线性拓扑空间中的非空凸紧致子集。

$f_i: \prod_{i \in K} X_i \times Y \rightarrow \mathbf{R}$ 为连续函数, 且满足以下内容则存在 $f_i(x_i^*, x_i^*, y_i^*) = \min f_i(x_i, x_i^*, y_i)$, x_i

$\in X_i$, $y_i \in G(x_i, x_i^*)$ 即纳什均衡解。

(1) $\forall x_{-i} \in X_{-i} \rightarrow f_i(x_i, x_{-i}, y_i)$ 是拟凸的;

(2) $G: \prod_{i \in K} X_i \times Y \rightarrow \mathbf{R}$ 是连续的集值映射。

定理 2^[3]: 对 \mathbf{R} 上的拟凸函数。连续函数是拟凸的充要条件如下。

当且仅当下述条件至少有一个成立:

(1) 函数是非减的;

(2) 函数是非增的;

(3) 存在一点 c , 使得对于 $t < c$, f 非增; 对于 $t \geq c$, f 非减, 点 c 可以在 f 的全局最小点中任选一个。

关于策略空间为非空紧致子集的证明: 观察各个市场主体的约束条件, 均为实数空间中的闭集同时也是凸集, 满足定理 1 的前提条件。

关于效用函数在策略空间上连续的证明: 观察各主体效用函数均为二阶可导, 策略空间上任意一点在效用函数上的映射均满足左极限等于右极限, 故映射集合连续。

关于效用函数拟凸性的证明: 对于用户存在以下等式 $\frac{\partial U_C}{\partial P_t^{DNL}} = -\sum_{t=1}^T p_{DN,t} \Delta t$ 且 $\frac{\partial^2 U_C}{\partial (P_t^{DNL})^2} = 0$,

$\frac{\partial U_C}{\partial P_t^{DGL}} = -\sum_{t=1}^T p_{DG,t} \Delta t$ 且 $\frac{\partial^2 U_C}{\partial (P_t^{DGL})^2} = 0$, $\frac{\partial U_C}{\partial P_t^{SL}} = -\sum_{t=1}^T p_{S,t} \Delta t$ 且 $\frac{\partial^2 U_C}{\partial (P_t^{SL})^2} = 0$, 故 U_C 为非增函数, 即

$\{P_t^{DNL}, P_t^{DGL}, P_t^{SL}\}$ 上的拟凸函数。对于配电网运营商, 因为 $\frac{\partial U_D}{\partial P_{DN,t}} = \sum_{t=1}^T \Delta t (P_t^{DNL} + P_t^{DNS})$,

$\frac{\partial^2 U_D}{\partial (P_{DN,t})^2} = 0$, 又因为 $\frac{\partial U_D}{\partial P_{DN,t}} \geq 0$, 所以 U_D 为非减函数, 即 $\{p_{DG,t}, p_{DN,t}, p_{S,t}\}$ 上的拟凸函数。

对于分布式电源运营商, 因为 $\frac{\partial U_G}{\partial p_{DG,t}} = \sum_{t=1}^T (P_t^{DGL} + P_t^{DGS}) \Delta t$, $\frac{\partial^2 U_G}{\partial (p_{DG,t})^2} = 0$, 又因为 $\frac{\partial U_G}{\partial p_{DG,t}} \geq 0$,

所以 U_G 为非减函数, 即 $\{p_{DG,t}, p_{DN,t}, p_{S,t}\}$ 上的拟凸函数。综上所述, 各主体效用函数均满

足拟凸条件。

参考文献:

[1] 杨哲, 蒲勇健. 不确定性下多主从博弈中均衡的存在性[J]. 控制与决策, 2012, 27(5):736-740.

- [2]邓喜才, 郭华华. 两阶段主从博弈均衡解的存在性[J].经济数学, 2009, 26(4):50-53.
- [3]Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe. Convex optimization [M]. 北京:清华大学出版社, 2013.