

DOI: 10.7667/PSPC170959

考虑电动汽车群和新增实体的电力市场多方交易策略研究

陈亦杰¹, 刘故帅², 张忠会¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 目前, 电力市场在新增实体和大规模电动汽车并网的影响下, 交易主体呈现多元化的趋势。以博弈理论为基础, 通过实验计算模拟的方式分析了电力市场的交易方式及策略选择的新形态。首先考虑了地理位置、收益及系统网损等因素, 建立了电动汽车群、新增实体和电网公司多方动态非合作博弈模型。以6个新增实体和2个电动汽车群为例, 采用协同进化遗传算法求解其纳什均衡解。通过算例模拟分析, 验证了所提方法的合理有效性。该研究为分析电动汽车群和新增实体对电力市场多方交易决策的影响提供理论参考。

关键词: 电动汽车群; 新增实体; 多方交易; 博弈论; 协同进化

A study on multi-party trading strategy of electricity market considering electric vehicle group and new entity

CHEN Yijie¹, LIU Gushuai², ZHANG Zhonghui¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China)

Abstract: At present, the New Entities (NEs) and the large-scale Electric Vehicle (EV) access to the electricity market to participate in the electricity trading under the constantly active environment, the transaction participants present a diversification trend. Based on the game theory, this paper analyzes the transaction mode and the new form of strategy selection in the electric power market by means of experimental calculation and simulation. Firstly, considering the factors such as geographical location, revenue and system loss, the static non-cooperative game model of EV groups, NEs and grid company is established. Then six NEs and two EV groups are used as examples, the Cooperative Coevolutionary Genetic Algorithm (CCGA) is used to solve the Nash equilibrium solution. The reasonable validity of the proposed method is verified by the numerical example, which provides a theoretical reference for the analysis of the role of EV groups and NEs in multi-party decision-making in electric power market.

Key words: electric vehicle; new entity; multi-party transactions; game theory; cooperative coevolution

0 引言

在世界电力工业深化改革和国家政策的引导下, 各博弈方在电力市场多方交易中如何获取自身最大的收益? 电网公司的角色该如何转变? 这些问题都是当下急需分析研究的课题^[1]。

近年来, 新能源技术在传统电网中的应用越来越广泛。其中, 高渗透率的电动汽车和分布式电源并网对传统电网的影响得到广泛的关注和研究, 但较多的关注点在安全运行、优化配置和合理规划等方面^[2-3], 研究对电力市场交易策略的影响较少。文献[4]提出电动汽车充放电套利行为对传统电网电价具有一定的“削峰填谷”的作用, 但没有将新增

实体纳入优化模型。文献[5]通过协调调度电动汽车充电和居民可控负荷, 避免了负荷尖峰和电力系统阻塞, 但没有考虑电动汽车放电套利和用户的多电功率管理。随着分布式电源并网技术的不断改进与完善^[6], 越来越多的交易方融入电力市场大环境中, 独立地追求自身效益的最大化^[7-8]。国内外学者的实验计算模拟较少同时涉及电动汽车群模型和新增实体模型。博弈论是分析多方交易的有效手段, 文献[9]建立了电网公司、新增实体和用户的三方静态博弈模型, 分析了其中一个时间节点的静态交易策略, 并未研究动态交易策略。电动汽车群有别于传统风光等分布式电源, 具有充电和放电套利两种属性^[10], 文献[11-12]从电力市场电量交易的角度出发, 分析

了不同数量的新增供电实体对出清电价的影响,但是没有分析电动汽车充放电对电价的影响。文献[13-14]分别利用协同进化算法(Cooperative Coevolutionary Genetic Algorithm, CCGA)实现了微电网环保调度及多区域电网规划,本文采用此方法实现电力市场的多方博弈,得到交易策略的纳什均衡解。

本文建立了多电新增实体、少电新增实体、电动汽车群及电网公司的动态非合作博弈模型,通过CCGA算法求解其纳什均衡解,分别在电动汽车群充电模式和放电套利模式下,分析了新增实体和电动汽车群参与电力市场对市场均衡电价的影响,并分析了电池组老化成本系数对交易电价的影响。

1 电力市场各方交易形态及发展趋势

1.1 新增实体

随着分布式电源技术的不断完善和推广,其布点灵活、初始投资成本低等优势使新增实体在配电网中的应用越来越广泛。新增实体是指拥有后备电源(例如火力发电机组)的小区或街道、拥有备用电池等储能设备的居民用户,拥有光伏电池板或风力发电机的智能楼宇以及其他产销集体。通过智能终端的信息交互,新增实体可以实时获取自身电量盈余或少电情况。本文假设特定区域的配电网范围内同时存在多电新增实体和少电新增实体的情况,多电新增实体具有供电方属性,多电新增实体在交易策略的指导下决定是否参与电力市场交易,少电新增实体具有用户属性,少电新增实体可以在交易策略的指导下选择最优的供电方,如图1所示。各个交易方均可平等地获取信息共享平台中的实时功率盈余等信息。本文假设普通电力用户包含在少电新增实体中。

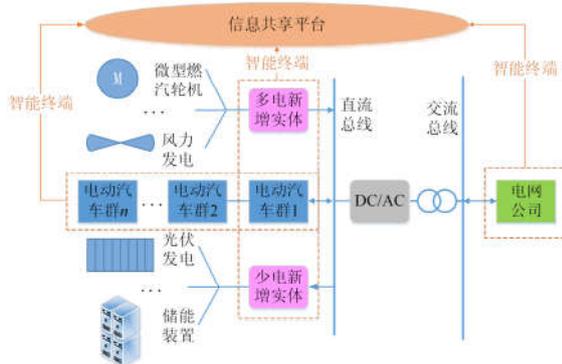


图1 电力市场多方交易结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-party transaction structure in power market

1.2 电动汽车群

假设所有充电桩均为双向充电桩且电网受负荷峰谷差的影响实行阶梯电价。由于充电桩地理位置等约束,电动汽车的停靠率是可预测的,所以可以将同一地点及同一时间段内充放电的电动汽车集合定义为电动汽车群,其在电力市场竞争环境中作为一个独立的主体,拥有不断追求自身利益最大化的属性。电动汽车群参与电力市场交易的方式有两种:一种是作为少电方,从电网中获取电量;另一种是作为多电方,在满足电动汽车自身的电力需求之外,还可以为电网提供电量,参与电力市场竞价过程。

1.3 多方交易形态及发展趋势

随着“新电改9号文”^[15]的问世,用户侧的分布式电源市场开放程度进一步提高,各地区因地制宜地投资建设风、光、生物能等分布式电源,其服务优势在于距离用户近、分布广泛。其中,少电新增实体不仅可以从电网公司获取电量,也可以从满足市场准入标准的多电新增实体或者放电电动汽车群获取,电量余量交易更加灵活。新增实体和电动汽车群放电套利等行为拥有自主选择权,签订合同时可以选择长期供电合同也可以选择短期供电合同,具有较高的灵活性,在政府监督及电网公司的优质服务环境下,新增实体和电动汽车群的满意度将得到保证。从电网公司角度来看,其在电力市场中需要保证电力网络、电力辅助设备服务以及全系统的安全稳定运行,但是电网公司不再是以上网电价和销售电价之间的差价作为全部收入,而是通过对多电交易方收取一定的过网费用作为公司收益的一个重要来源。对增量市场,电网公司同多电交易方同样拥有竞争的权利。此外,电网公司作为电力市场强有力的后盾具有一定的社会责任,对缺电地区(尤其是投资与收益非常不平等的偏远地区)应保证供电质量。

本文本着“谁受益,谁承担成本”的原则,假设新增实体、电动汽车群和电网公司之间均存在电气连接,且电气距离约等于两者之间的直线距离,既考虑了用电方的用电功率又考虑了地理位置因素,线路上交易方*i*、*j*之间的网络损耗 S_{ij} 为

$$S_{ij} = \frac{R_{ij} D_{ij}^2}{U^2} + \alpha D_{ij} \quad (1)$$

式中: R_{ij} 、 U 、 D_{ij} 分别表示线路电阻、线电压及交易电量,假设电能均在电压等级为 U 的线路上传输; α 表示由其他因素引起的网络损耗系数。需要注意的是当传输电量获得收益与网络损耗成本相等

时, 这个交易是没有意义的。即

$$p_{ij} \cdot D_{ij} = c_l \cdot S_{ij} \quad (2)$$

其中, c_l 表示网络损耗经济惩罚系数, 其单位是元/kWh, p_{ij} 表示交易方 i, j 之间的协议电价, 将式(1)代入式(2)得:

$$p_{ij} \cdot D_{ij} = c_l \cdot \left(\frac{R_{ij} D_{ij}^2}{U^2} + \alpha D_{ij} \right) \quad (3)$$

解得:

$$D_{ij} = U^2 (p_{ij} / c_l - \alpha) / R_{ij} \quad (4)$$

2 多方交易博弈模型

2.1 模型假设

假设某地理区域内的电力市场交易主体包括 n 个新增实体(其中多电新增实体 n_d 个, 少电新增实体 n_s 个)、 m 个电动汽车群和 1 个电网公司参与市场竞争。其中多电新增实体有 n_d 个, 少电新增实体有 n_s 个, 则满足 $n = n_d + n_s$ 。假设每个交易日被分割成几个时间间隔, 每个买家必须事先决定谁将成为其下一个时间间隔的电量供应商。在本文模型中, 将每一天分割为 12 个时段, 每个时段用 $t (t=1, 2, \dots, 12)$ 表示。 t 时段多电新增实体 $i (i \in n_d)$ (多电方) 在电力市场交易过程中为电力市场提供的电量 $D_{i,t}$ 既可以流向少电新增实体也可以流向电网公司。少电新增实体 $j (j \in n_s)$ (少电方) 向电力市场索取电量 $D_{j,t}$, 同理 $D_{j,t}$ 的供电方既可以有多电新增实体和电网公司, 也可以是放电套利的电动汽车群。电动汽车群 k 在时段 t 时参与电力市场交易的电量设为 $D_{k,t}$ 。需要说明的是, $D_{k,t} > 0$ 表示在时段 t 电动汽车群 k 向电网售电套利, $D_{k,t} < 0$ 则表示电动汽车群 k 从电网购电来充电, 此时可以看作少电方。

一般认为多电新增实体和放电套利的电动汽车群的起始售电价是低于电网公司的合同售电价的^[16]。在制定交易策略博弈过程中, 多电方之间互相制约, 最终会得到各自的理想交易电价。

电力市场交易过程中新增实体、电动汽车群和电网公司均理性地追求最有利于自己受益的交易策略, 且所有博弈方同时选择交易策略, 或者尽管存在先后顺序, 但是不存在后选择的博弈方知晓其他博弈方交易策略的情况。博弈过程中, 每个博弈方对其他博弈方的策略空间及收益函数都有准确的了解, 即为共同知识, 且各方均独立地追求自身最优利益, 不允许在博弈过程中各方之间传递交易信息。本文博弈模型属于完全信息非合作博弈。

2.2 交易策略及规则

交易策略: t 时段, 新增实体 n 、电动汽车群 m 及电网公司 G 的交易策略分别为其交易电价 p_i^n 、 p_i^m 和 p_i^G 。本文假设电力市场规定了电价上限 p_{\max} 和下限 p_{\min} , 算法模拟过程中采用线性插值法获得各个交易方的初始电价, 在接下来的多次迭代中, 在电价上下限范围内随机改变各交易方的电价, 并进行参数越限检验。

交易规则: 首先少电方按照地理位置的远近, 优先选择距离近且价格低的多电方, 多电新增实体经过被选后仍然剩余的电量与 $U^2 (p_{ij} / c_l - \alpha) / R_{ij}$ 进行比较, 如果大于 $U^2 (p_{ij} / c_l - \alpha) / R_{ij}$ 则将剩余电量上传至电网公司, 如果小于 $U^2 (p_{ij} / c_l - \alpha) / R_{ij}$ 则算作弃光弃风功率损耗, 并计入新增实体的成本中, 弃光弃风功率损耗成本系数用 c_a 表示, 其单位是元/kWh, 直至遍历所有多电新增实体, 如果此时少电方的用电需求还没有被满足, 则由电网公司提供需求缺口。

交易过程中电能的流向示意如图 2 所示, 图中箭头走向表示交易过程中可能的电能流向, 图中 n_d^s 、 n_d^m 、 n_d^G 分别表示多电新增实体向少电新增实体、电动汽车群、电网公司传输电量的数量, 满足:

$$n_d = n_d^s + n_d^m + n_d^G \quad (5)$$

同理, n_s^d 、 n_s^m 和 n_s^G 表示少电新增实体中分别以多电新增实体、电动汽车群和电网公司为供电方的数量, m_n 、 m_s 和 m_G 表示电动汽车群分别与多电新增实体、少电新增实体和电网公司交易时的数量。满足:

$$n_s = n_s^d + n_s^m + n_s^G \quad (6)$$

$$m = m_n + m_s + m_G \quad (7)$$

需要说明的是, 假设电动汽车群的充电和放电套利是在不同的时间段进行的。即放电套利时间段内 $m_n = 0$, 充电时段内 $m_s = 0$ 。仍满足等式约束。

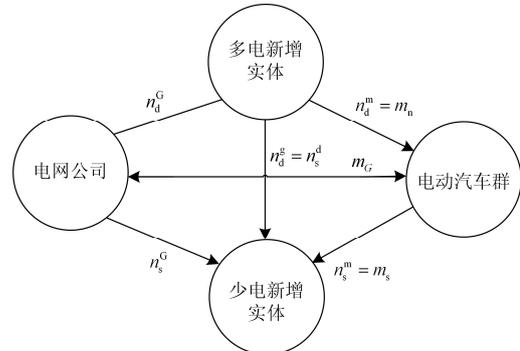


图 2 交易过程中电能流向示意图

Fig. 2 Flow of electricity in the process of trading

2.3 各交易方收益模型

2.3.1 多电新增实体模型

多电新增实体的多电总功率用 Q_{n_d} 表示，通过电网向少电新增实体和电动汽车群提供电量产生效益 u_{tra,n_d} ，其成本是向电网公司缴纳的过网费用 u_{ser,n_d} 及其相应的网络损耗成本 S_{n_d} ，此外因弃风弃光产生的惩罚成本 u_{a,n_d} 由多电新增实体承担，多电新增实体的收益 w_{n_d} 如下式所示。

$$w_{n_d} = u_{tra,n_d} - u_{ser,n_d} - S_{n_d} - u_{a,n_d} \quad (8)$$

$$u_{tra,n_d} = \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} \cdot p_t^i \quad (9)$$

$$u_{ser,n_d} = c_{ser} \cdot \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} \quad (10)$$

$$S_{n_d} = c_l \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_d} \left(\frac{R_{ij} D_{ij}^2}{U^2} + \alpha D_{ij} \right) + \right. \quad (11)$$

$$\left. \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{k=1}^m \left(\frac{R_{ik} D_{ik}^2}{U^2} + \alpha D_{ik} \right) + \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{R_{iG} D_{iG}^2}{U^2} + \alpha D_{iG} \right) \right)$$

$$u_{a,n_d} = c_a \left(Q_{n_d} - \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} \right) \quad (12)$$

式中， c_{ser} 为电网公司对过网电量收取的过网服务费用系数，单位为元/kWh。

2.3.2 少电新增实体模型

少电新增实体 n_s 在满足自身用电需求的前提下不断追求售电价最低的供电方，少电新增实体的效用函数主要涉及费用、电能质量和服务水平满意度等，本文以少电新增实体的用电需求是否得到满足作为用户效用的评估指标。定义少电新增实体 n_s 在时间段 t 的效用函数为 $u_{s,t}$ 为

$$u_{s,t} = \beta \cdot D_{j,t} \quad j=1, 2, \dots, n_s \quad (13)$$

其中， β 为效用系数，本文假设 $D_{j,t}$ 得到满足时 $\beta=1$ ，其余情况 $\beta=0$ 。

少电新增实体的成本是向供电方的支付费用

u_{tra,n_s} ：

$$u_{tra,n_s} = \sum_{t=1}^{12} \sum_{j=1}^{n_s} D_{j,t} \cdot p_t^j + \sum_{t=1}^{12} \sum_{j=1}^{n_s} D_{j,t} \cdot p_t^G + \sum_{t=1}^{12} \sum_{j=1}^{n_s} D_{j,t} \cdot p_t^m \quad (14)$$

则少电新增实体的收益 w_{n_s} 可用下式表示。

$$w_{n_s} = \sum_{t=1}^{12} u_{s,t} - u_{tra,n_s} \quad (15)$$

2.3.3 电动汽车群模型

电动汽车群参与电力市场交易的套利收益 w_m

是在满足自身用电需求以外通过可利用的电池容量进行充放电套利。假设电动汽车群 k 的电池组总容量为 P_k ，其中冷备用容量占比为 c_b ，电动汽车群电池组的平均放电深度为 c_h ，电池组套利老化成本系数为 c_g ，在放电套利时段内，假设电动汽车群 k 的放电容量为 P_k^{out} ，用 $u_{tra,m}^{out}$ 表示电动汽车群的放电套利收益。电动汽车群的成本 $u_{tra,m}^{in}$ 是在充电过程中的支付费用。假设充电时段内，电动汽车群 k 的充电容量为 P_k^{in} ，起始 SOC 服从正态分布 $N(0.5, 0.4)^2$ 并在 $[0.2, 0.95]$ 范围内，用 $c_{k,t}$ 表示电动汽车群 k 在时间段 t 内电池组的剩余功率占比， $c_{k,t}$ 在不同时段内的值可以通过蒙特卡罗法模拟获得。

$$w_m = u_{tra,m}^{out} - u_{tra,m}^{in} \quad (16)$$

$$u_{tra,m}^{out} = \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^{m_s} P_k^{out} \cdot (p_t^k - c_g) + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^{m_G} P_k^{out} \cdot (p_t^k - c_g) \quad (17)$$

$$u_{tra,m}^{in} = \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^{m_n} P_k^{in} \cdot p_t^n + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^{m_G} P_k^{in} \cdot p_t^G \quad (18)$$

$$P_k^{out} = c_h \cdot (c_b \cdot P_k + \sum_{t=1}^{12} (1 - c_b) \cdot P_k \cdot c_{k,t}) \quad (19)$$

$$P_k^{in} = \sum_{t=1}^{12} P_k \cdot c_{k,t} \quad (20)$$

2.3.4 电网公司模型

电网公司在电力市场多方交易过程中的效益 u_G 主要是向少电新增实体和电动汽车群收取的电费和向多电新增实体及放电套利电动汽车群的过网服务费用。一般认为，电网公司距离少电方的供电距离是大于多电方距离少电方的供电距离的。电网公司运营过程中需要承担系统运行维护、设备维修、人员管理费用及网络损耗等成本，本文用一个可微的二次函数 $u_{c,G}^G$ 表示成本与电量的关系。

$$u_G = u_{ser,n_d} + \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} \cdot p_t^G + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^{m_G} P_k \cdot p_t^G \quad (21)$$

$$u_{c,G} = aQ_G^2 + bQ_G + c \quad (22)$$

$$Q_G = \sum_{t=1}^{12} \sum_{j=1}^{n_s} D_{j,t} + \sum_{t=1}^{12} \sum_{k=1}^{m_G} P_k^{in} + \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} \quad (23)$$

$$S_G = c_l \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_s} \left(\frac{R_{jG} D_{jG}^2}{U^2} + \alpha D_{jG} \right) + \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{R_{iG} D_{iG}^2}{U^2} + \alpha D_{iG} \right) \right) \quad (24)$$

一个时间周期内电网公司的收益为收入与成本的差值，用 w_G 表示：

$$w_G = u_G - u_{c,G} - S_G \quad (25)$$

3 基于 CCGA 算法求解纳什均衡解

3.1 纳什均衡

纳什均衡是指当任意一方电价改变时, 各博弈方不再有主动意愿改变自身电价策略使其收益有所增加。为实现纳什均衡, 适应度函数表达为

$$\Delta w_i = w_i(\mathbf{p}^*) - w_i(\mathbf{p}) \quad i \in (1, 2, \dots, n+m+1) \quad (26)$$

式中: w_i 表示博弈方 i 的收益; \mathbf{p}^* 及 \mathbf{p} 表示不同的博弈方的电价策略组合。当 Δw_i 恒等于 0 时, 达到纳什均衡。

3.2 CCGA 算法及算法流程

CCGA 算法借鉴自然界的协同演化机制, 符合博弈论的理论框架^[17], 该算法可以实现交易各方“同时”(算法实际运行时, 行动时间有先后顺序, 但是与同时行动的结果是相同的)获取自身交易决策最优的目的。CCGA 算法与传统遗传算法相比不再是单一种群的迭代寻优, 而是多个不同种群之间的协同进化。本文有 4 个种群(交易方), 如图 3 所示。

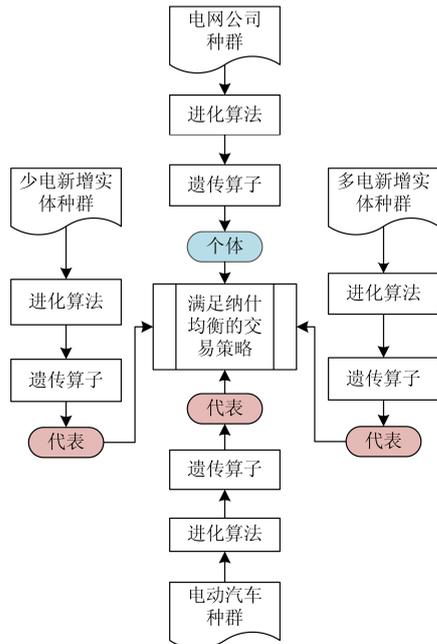


图 3 CCGA 算法框架图

Fig. 3 Flow chart of CCGA

以电网公司种群迭代寻优为例说明协同进化的物理意义, 即当选择电网公司最优电价策略个体时, 将它和其他种群目前最优电价策略的代表构成组合策略, 然后计算组合策略的适应度值, 从而评判此电网公司个体策略的优劣。在每次迭代过程中, 每个种群代表的策略都与其他种群代表的策略共同构成组合策略, 以该组合策略所对应的适应度函数值为目标进行不断迭代。即 CCGA 算法是各博弈主

体分别进行优化, 并对各个主体的优化过程进行协调以达到整体最优的目的。CCGA 算法求解纳什均衡解的计算步骤如下所述。

1) 读入参数数据, 信息初始化。

2) 编码, 本文采用实数编码的方法, 组合策略用矩阵 \mathbf{p} 表示为

$$\mathbf{p} = [p_1^d, p_2^d, \dots, p_{n_d}^d, p_1^s, p_2^s, \dots, p_{n_s}^s, p_G, p_1^v, p_2^v, \dots, p_m^v] \quad (27)$$

式中: $p_{n_d}^d$ 表示第 n_d 个多电新增实体的电价; 同理 $p_{n_s}^s$ 、 p_m^v 分别表示第 n_s 个少电新增实体和第 m 个电动汽车群的电价; p_G 表示电网公司的电价, 即假设一定地理范围内只有一家电网公司。

3) 对不同种群独立进行选择、交叉、变异等遗传算子操作, 获得新的交易策略。

4) 将上一次迭代产生的最优个体保留, 替换掉本次迭代出现的适应度最低的个体, 但上次迭代保留的最优个体也参与选择、交叉、变异的操作, 既保证了群体的多样性, 也避免迭代中出现的优秀个体被破坏。

5) 根据式(8)、式(15)、式(16)、式(25)独立计算各个种群的适应度值, 通过协同进化的方式获取自身最优策略。

6) 判断是否遍历所有种群, 是则迭代结束, 否则转入步骤 3)。

4 算例分析

本文假设某地区电网面积为 $10 \times 10 \text{ km}^2$, 其中多电新增实体 3 个, 少电新增实体 3 个, 电动汽车群 2 个, 电网公司 1 个, 地理位置如图 4 所示。

假设新增实体、电动汽车群和电网公司之间均存在电气连接, 且电气距离约等于两者之间的直线距离, 线路单位电阻 0.21Ω , 线路电压均为 12.66 kV , 网损惩罚系数 0.8 元/kWh , 电网公司收取的服务费用系数 0.15 元/kWh , 弃光弃风成本系数 0.3 元/kWh , 电动汽车群放电套利老化成本系数 0.42 元/kWh , 单个锂电池的最大理论容量为 64 kWh , 最大放电深度为 80% , 冷备用电池组容量比例为 50% ; 交易日分为 12 个时间间隔, 电动汽车群充电时段为 5—9, 放电套利时段 1—4 及 10—12; 单位时段内多电新增实体功率和少电新增实体少电功率分别是一组在 $0.6 \sim 1 \text{ MW}$ 和 $0.6 \sim 2 \text{ MW}$ 范围内的随机实数。CCGA 算法参数: 电动汽车群充电模式下染色体编码长度为 4, 放电套利模式下染色体编码长度为 6, 交叉概率 0.9 , 变异概率 0.3 , 电价上、下限值为 1.2 元 、

0.5 元, 迭代次数 200, 种群规模 200。

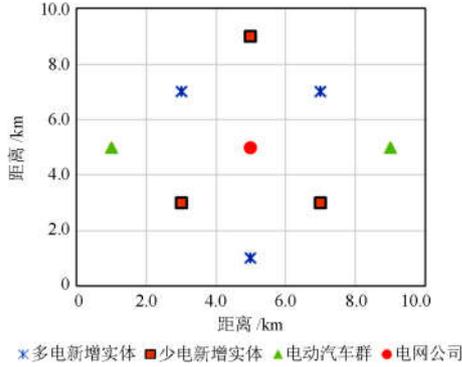


图 4 地理位置示意图

Fig. 4 Location map

以多电新增实体 1 在时刻 1 的迭代过程电价收敛正态分布曲线为例说明 CCGA 算法的有效性, 如图 5 所示。图中给出了第 1、50、100、150 和 200 代时 200 个种群最优解的正态分布。由正态曲线变化趋势可知, 次优个体在迭代过程中不断被淘汰, 曲线趋于“高瘦”, 最终集中在最优值附近。

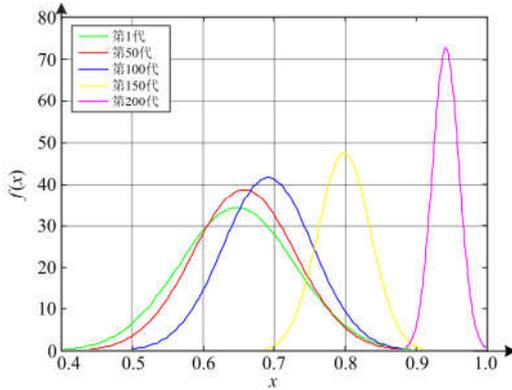


图 5 迭代过程正态分布图

Fig. 5 Normal distribution of the iterative process

以电动汽车群充电和放电套利两个不同交易模式分别分析电动汽车群和新增实体对电力市场电价交易策略的影响。其中市场均衡电价 \bar{p}_t 定义为某时段内各个多电方的交易电量和其交易电价的乘积与总交易电量的比值, 如式(28)所示。

$$\bar{p}_t = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} \cdot p_t^i + \sum_{i=1}^{n_s^G} D_{i,t} \cdot p_t^G + \sum_{k=1}^{m_G} P_k^{\text{in}} \cdot p_t^G + \sum_{k=1}^{m_s} P_k^{\text{out}} \cdot p_t^k}{\sum_{i=1}^{n_d} D_{i,t} + \sum_{i=1}^{n_s^G} D_{i,t} + \sum_{k=1}^{m_G} P_k^{\text{in}} + \sum_{k=1}^{m_s} P_k^{\text{out}}} \quad (28)$$

4.1 电动汽车群充电模式分析

电动汽车在充电时段具有少电方属性, 在电力

市场中作为交易价格的接受者, 在电动汽车充电时段(假设其他时段电动汽车不参与市场交易), 达到纳什均衡时, 其他供电方的电价策略的价格走势具有鲜明的特征且互相之间的具有较高的辨识度, 如图 6 所示。

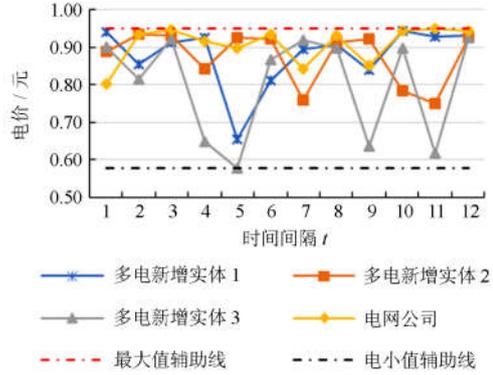


图 6 电动汽车群充电模式下各供电方的电价示意图

Fig. 6 Electricity price of each power supplier in the charging model of EV groups

4.2 电动汽车群放电套利模式分析

电动汽车在放电套利时段具有多电方属性, 在电力市场中作为交易价格的影响者, 将电动汽车群放电套利市场均衡价格曲线与电动汽车群不参与市场交易时市场均衡价格曲线进行比较, 分析电动汽车群对电力市场交易电价的影响, 其中时段 5—9 电动汽车群不进行放电套利。对照结果如图 7 所示。

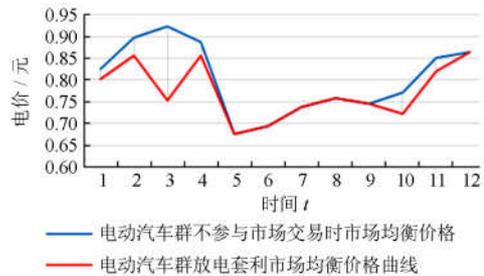


图 7 电动汽车群放电套利模式下市场均衡电价示意图

Fig. 7 Balanced price of the market in the discharge arbitrage model of EV groups

从图 7 中可以看出, 市场均衡价格因为电动汽车群的套利行为而有所降低。说明电动汽车群的放电套利可以进一步激活市场, 起到一定的稳定电价的作用。

电动汽车群放电套利时段交易各方的电价如图 8 所示, 交易电价在 0.59~0.97 元/kWh 波动, 各交易方电价辨识度较高且变化较为平稳。

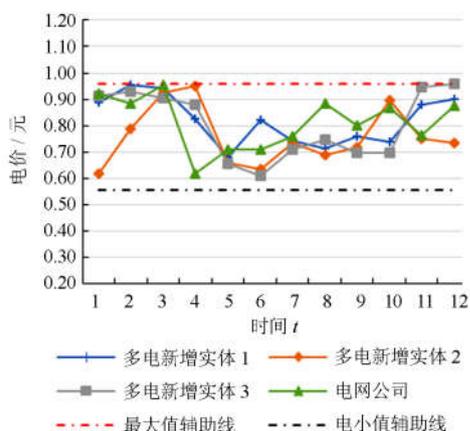


图 8 电动汽车群放电套利模式下各供电方电价策略

Fig. 8 Electricity price of each power supplier in the discharge arbitrage model of EV groups

电动汽车群的交易电价如图 9 所示, 因 5—9 时段电动汽车群不放电, 假设这个时段电动汽车群不参与电力市场交易, 所以图中该时段没有数值。

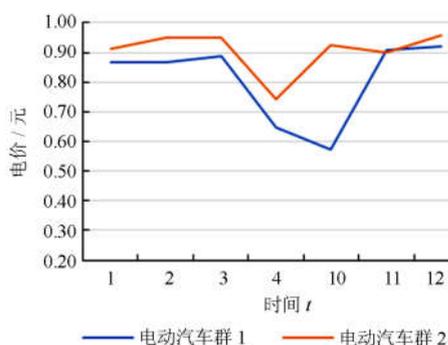


图 9 电动汽车群交易电价

Fig. 9 Transaction price of EV groups

图 9 中可以看出不同电动汽车群的电价策略在拥有相同走势的前提下自身特征较为明显。

4.3 电池组放电套利老化成本灵敏度分析

电动汽车群的电池组充放电次数是有上限的, 且随着使用年限的增大, 电池组的效率降低, 维护成本也随之升高, 所以分析老化成本对交易电价的影响是有必要的。本文分析在交易容量等条件不变的情况下, 得到老化成本系数分别为 0.42 元/kWh、0.6 元/kWh 时电动汽车群的市场均衡价格曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 老化成本系数升高, 电动汽车群放电套利交易均衡电价也随之升高。需要说明的是, 5—9 时段是电动汽车群的充电时段, 所以图中 5—9 时间段没有数值。

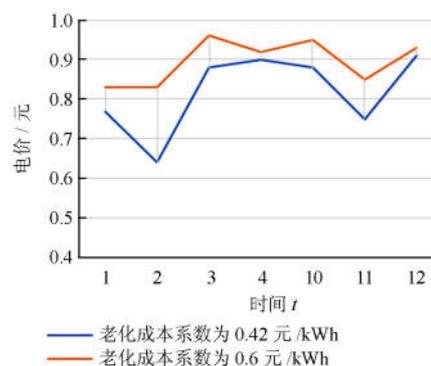


图 10 不同老化成本系数的市场均衡价格曲线

Fig. 10 Market equilibrium price curve of different aging cost coefficient

5 结论

本文建立了多电新增实体、少电新增实体、电动汽车群和电网公司的多方动态非合作博弈模型, 分别在电动汽车群充电模式和放电套利模式下得到满足纳什均衡的电价交易策略, 结论如下:

1) 多电新增实体和电动汽车放电套利行为为动机主要取决于自身效用函数、定量判据(网损惩罚系数、弃光弃风成本等)等因素。相关决策者可以通过调节定量判据值对并网交易方进行宏观调控。

2) 电动汽车群放电套利行为有别于多电新增实体, 还受到放电套利老化成本系数的影响, 未来电池组技术的突破可以为电动汽车群的电价交易策略提供更大的竞价空间。

本文假设电力市场规定了电价上下限, 算法模拟过程中采用线性插值法获得各个种群的初始电价, 在接下来的多次迭代中, 在电价上下限范围内随机改变各博弈方的电价, 并进行参数越限检验。在进一步工作中, 可考虑将电价的边际能量成本、网损成本以及阻塞成本作为电价报价的依据。

参考文献

- [1] 曾鸣, 张晓春. 以电力需求响应推动供给侧变革——以北京市为例[J]. 中国电力企业管理, 2016(1): 60-63. ZENG Ming, ZHANG Xiaochun. Demand response acts as the revolutionary forces in promoting the supply side changes[J]. China Power Enterprise Management, 2016(1): 60-63.
- [2] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28. HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.

- [3] 马霖, 张世荣. 分时电价/阶梯电价下家庭并网光伏发电系统运行优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 819-825.
MA Lin, ZHANG Shirong. Optimal operation scheduling of family grid-connected photovoltaic systems under time-of-use and ladder tariffs[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 819-825.
- [4] 王晔, 谢鸣, 张少华. 考虑电动汽车的电力市场均衡分析[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2993-2998.
WANG Xian, XIE Ming, ZHANG Shaohua. Analysis on equilibrium of electricity market under grid-integration of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2993-2998.
- [5] 刘伟佳, 吴秋伟, 文福栓, 等. 电动汽车和可控负荷参与配电系统阻塞管理的市场机制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 26-33.
LIU Weijia, WU Qiuwei, WEN Fushuan, et al. A market mechanism for participation of electric vehicles and dispatchable loads in distribution system congestion management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 26-33.
- [6] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [7] 张彼德, 何嶝, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85.
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.
- [8] 张高, 王旭, 蒋传文, 等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2295-2301.
ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Economic analysis of virtual power plants based on bi-level optimization dispatch[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2295-2301.
- [9] 张忠会, 刘故帅, 谢义苗. 基于博弈论的电力系统供给侧多方交易决策[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1779-1785.
ZHANG Zhonghui, LIU Gushuai, XIE Yimiao. A game theory approach to analyzing multi-party electricity trading on supply side[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1779-1785.
- [10] 武小梅, 谢旭泉, 林翔, 等. 电动汽车提供备用服务的地区电力市场模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 71-76.
WU Xiaomei, XIE Xuquan, LIN Xiang, et al. Local electricity market model considering reserve service provided by electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 71-76.
- [11] 张忠会, 赖飞屹, 谢义苗. 基于纳什均衡理论的电力市场三方博弈分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3671-3679.
ZHANG Zhonghui, LAI Feiyi, XIE Yimiao. Analysis of trilateral game in electricity market based on Nash equilibrium theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3671-3679.
- [12] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [13] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [14] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.
WANG Xiuli, LI Shuhui, CHEN Haoyong, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11-15.
- [15] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[Z]. 2015.
- [16] 张明锐, 谢青青, 欧阳丽. 考虑电动汽车的并网型微网储能选址定容[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 25-32.
ZHANG Mingrui, XIE Qingqing, OUYANG Li. Sizing and siting of BESS for grid-connected microgrid with electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 25-32.
- [17] 陈皓勇, 王锡凡, 别朝红, 等. 协同进化算法及其在电力系统中的应用前景[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 94-100.
CHEN Haoyong, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Cooperative coevolutionary approaches and their potential applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 94-100.

收稿日期: 2017-06-27; 修回日期: 2017-08-18

作者简介:

陈亦杰(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力自动检测与控制; E-mail: 342602741@qq.com

刘故帅(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网规划及电力市场; E-mail: family_2012@163.com

张忠会(1962—), 男, 教授, 研究方向为电力系统自动检测与控制及电网规划。

(编辑 葛艳娜)