

基于主从博弈的分布式储能汇聚研究

李琳玮¹,符致敏²,陈明帆¹,何礼鹏¹,覃丹¹,黄丽格¹,程西¹

(1.海南电网有限责任公司,海南 海口 570100;

2.华南理工大学 电力学院 新能源研究中心,广东 广州 510640)

摘要:随着电力市场的开放,零散分布、闲置率高的分布式储能参与汇聚复具备现实条件,汇聚过程能有效提升电网效益。以电动汽车(EV)作为分布式储能的典型代表,基于博弈论思想,充分考虑电动汽车作为出行工具的本职工作,提出了电动汽车聚合商(EVA)与电动汽车集群(EVC)间的主从博弈模型。引入主从博弈,充分遵从个体自主性和智能性,进一步采用一种基于Matlab的YALMIP工具箱的分布式互动算法对问题进行求解,能有效避免电动汽车用户隐私泄露,同时提升博弈参与者的经济效益和促进可再生能源就地消纳。

关键词:分布式储能汇聚;主从博弈;电动汽车(EV)

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23998

Research on Distributed Energy Storage Convergence Based on Master-slave Game

LI Linwei¹,FU Zhimin²,CHEN Mingfan¹,HE Lipeng¹,QIN Dan¹,HUANG Lige¹,CHENG Xi¹

(1. Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570100, Hainan, China; 2. New Energy Research Center,

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640,

Guangdong, China)

Abstract: With the opening of the electricity market, the scattered and high idle rate of distributed energy storage has realistic conditions to participate in the aggregation and reuse, and the aggregation process can effectively improve the efficiency of the power grid. The electric vehicles were taken as a typical representative of distributed energy storage, based on the idea of game theory, and fully considering the work of electric vehicles as a travel tool, the master-slave game model was proposed between electric vehicle aggregator (EVA) and electric vehicle clusters (EVC). Introducing the master-slave game, individual autonomy and intelligence were complied with fully, and further, a distributed interactive algorithm based on Matlab's YALMIP toolbox was adopted to solve the problem, which can effectively prevent the privacy of electric vehicle users from leaking and improve the economic benefit of game participants and promote the local consumption of renewable energy.

Key words: distributed energy storage convergence; master-slave game; electric vehicle(EV)

“十四五”规划和2035年远景纲要中指出可再生能源发电(renewable energy generation, REG)要实现“大规模、高比例、市场化和高质量”发展^[1-2]。随着物联网技术的发展和电力市场的进一步开放,未来电力系统会诞生许多终端电能服务运营商(terminal power service operator, TPSO),其借助市场手段为电能消费者提供细致化的用能服务,同时实现自身获利^[3-4]。

近年来,电动汽车(electric vehicle, EV)产业

快速发展^[5],事实上电动汽车作为一种广泛的分布式储能,其集群汇聚后具备参与电网互动提供辅助服务的潜力^[6]。但是,单一EV具有“容量小、随机性强、自利性高”的特性,若任由其无序接入电网将会导致区域负荷特性变差和台区变压器等资源的浪费^[7]。因此有必要研究分布式EV资源汇聚后参与辅助电网运行的相关问题。对于单一EV用户来说,其希望:1)满足出行需求;2)降低充电成本;3)减少电池损耗^[8]。所以,为了充

基金项目:海南电网科技项目(070000KK52190018)

作者简介:李琳玮(1981—),男,本科,高级工程师,Email:llw518@163.com

通讯作者:符致敏(1997—),男,硕士研究生,Email:1411575135@qq.com

分发挥电动汽车分布式储能的主动特性,必须借助终端电力市场开放潜力,依托终端电能服务运营商通过价格激励等手段引导电动汽车参与汇聚复用来辅助电网运行^[9]。

针对分布式EV储能参与汇聚调度的问题,已有学者展开讨论并取得不错的成果:文献[10]提出一种电动汽车与大规模光伏发电协同增效利用方法,能有效提升光伏发电利用率;文献[11]构建以虚拟电厂作为售电实体参与电动汽车充电管理的协调调度优化模型,实现了分布式能源与电动汽车的能源互补并提升整体运行经济性;文献[12]基于历史信息对EV辅助服务参与者进行了筛选和分类,建立双层配电网最优经济调度模型,能有效改善地区负荷和保证EV良性充电。但是上述模型均未从电动汽车身份本能出发,电动汽车只有在满足日常行程需求的基础上才具有参与汇聚复用的可能性:文献[13]指出电动汽车作为交通工具,车主对电动汽车具有控制权而非运营商,并提出一种电动汽车参与地区电力市场提供备用服务的交易方法,以光伏场景为例验证了该方法可提高系统功率稳定性;文献[14]提出了一种商业建筑微电网启发式运行策略,利用电动汽车提高光伏能源的自耗,减少对电网的影响。

电动汽车的随机移动特性导致其成为汇聚形式最复杂的分布式储能,在研究电动汽车汇聚复用的基础上再研究其他形式的分布式储能汇聚工作是简单易行的。因此,本文以电动汽车储能作为分布式储能的代表,从电动汽车的本职工作出发,充分考虑电动汽车的基本出行需求,以含高渗透率本地可再生能源发电的微电网为研究对象,从分布式储能汇聚角度建立电动汽车聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)-电动汽车集群(electric vehicle cluster, EVC)间的主从博弈模型,实现对分布式电动汽车储能的汇聚复用,同时实现EVA获利、EVC充放电成本降低和可再生能源就地消纳。

1 系统架构和电动汽车模型

1.1 汇聚系统架构

汇聚系统架构如图1所示。该系统以并网型微电网为背景,包含:风力(wind turbine, WT)发电资源、光伏(photovoltaic, PV)发电资源、电动汽车(EV)、基本负荷(load, LD)和电动汽车聚合商

(EVA),微电网通过公共连接点(point of common coupling, PCC)与上层配电网进行电能交换。

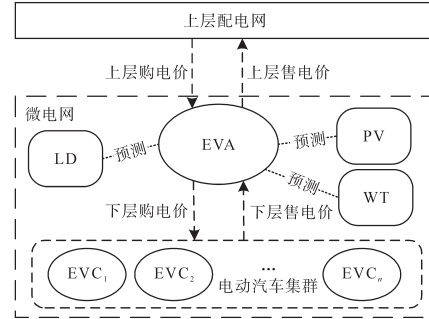


图1 汇聚系统架构

Fig.1 Converged system architecture

汇聚系统架构旨在实现分布式电动汽车储能资源的日前汇聚,以促进可再生能源的就地消纳。汇聚系统互动流程主要包括:1)EV上传次日的参与汇聚意愿和基本出行信息至EVA;2)EVA对次日的微网PV,WT出力和LD情况进行预测,并获取上层购售电价信息;3)EVA与EVC进行主从博弈互动,实现EVA最优分时售购电价制订和主动EVC最优充放电计划的制订。

1.2 电动汽车模型

1.2.1 电动汽车集群划分

考虑到单辆电动汽车的容量较小,其大规模参与汇聚将会引起优化维数灾的问题,因此本文首先对电动汽车进行集群划分,将具有近似出行时间的电动汽车划入同一集群,具体的:

$$t \pm \Delta t \Rightarrow t \quad (1)$$

即 $t \pm \Delta t$ 时刻范围内入网或离网的电动汽车均认为是 t 时刻入网或离网的,理论上 Δt 越小优化精度越高,但无法起到降低优化维度的作用,本文取 $\Delta t = 0.5\text{h}$,最终可采用一致性算法将集群优化功率分配至每一辆电动汽车。

1.2.2 电动汽车约束

电动汽车用户一般是逐利的群体,在外界利益驱使力度足够的情况下,会在满足充电预期的基础上参与聚合商互动以降低充放电成本。

对任何一辆电动汽车的动态信息集合 S^i 可表示为

$$S^i = \{ T_{in}^i, T_{out.exp}^i, SOC_{in}^i, SOC_{exp}^i, P_{d,n}, P_{c,n}, SOC_{min}, SOC_{max}, Q_n \} \quad (2)$$

式中: i 为第 i 辆电动汽车; T_{in}^i 为入网时间; $T_{out.exp}^i$ 为预计离网时间; SOC_{in}^i 为入网荷电状态; SOC_{exp}^i 为离网预期荷电状态; $P_{d,n}$ 为额定放电功率; $P_{c,n}$ 为额

定充电功率; SOC_{\min} 为荷电状态下限; SOC_{\max} 为荷电状态上限; Q_n 为额定容量。

一般而言,电动汽车状态量为连续变化的过程,为了仿真进行,本文将连续变量离散化,离散时间尺度为 $\Delta t = 1h$,电动汽车存在以下约束以及状态量更新过程:

$$P_{cd}^i(t) = \begin{cases} P_{cd}^i(t) & t \in [T_{in}^i, T_{out.exp}^i] \\ 0 & t \notin [T_{in}^i, T_{out.exp}^i] \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为优化时段; $P_{cd}^i(t)$ 为电动汽车的充放电功率,大于0表示充电,小于0表示放电,等于0表示处于浮充状态。

式(3)为非并网时间内电动汽车充放电功率为0约束。

$$-P_{d,n} \leq P_{cd}^i(t) \leq P_{c,n} \quad (4)$$

式中: $P_{c,n}, P_{d,n}$ 分别为电动汽车在并网时间内的最大的充、放电功率。

式(4)为电动汽车的充放电功率大小约束,即电动汽车在并网时间内的充放电功率不能超过最大的充放电功率约束。

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC^i(t) \leq SOC_{\max} \\ SOC^i(t) = SOC^i(t-1) + \\ \frac{P_{cd}^i(t)\eta[P_{cd}^i(t)]\Delta t}{Q_n} \\ \eta[P_{cd}^i(t)] = \begin{cases} 1/\eta_{dis} & P_{cd}^i(t) < 0 \\ \eta_c & P_{cd}^i(t) \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $SOC^i(t)$ 为 t 时刻电动汽车的荷电状态; η_c 为充电效率; η_d 为放电效率。

式(5)为电动汽车荷电状态约束以及荷电状态的更新过程。

$$\begin{cases} SOC^i(T_{out.exp}^i) \geq SOC_{out.exp}^i \\ SOC^i(T_{out.exp}^i) = SOC_{in}^i + \frac{\sum_{t=T_{in}^i}^{T_{out.exp}^i} P_{cd}^i(t)\eta[P_{cd}^i(t)]\Delta t}{Q_n} \\ SOC_{exp}^i = SOC_{\min} + \frac{L_d Q_{100}}{100Q_n} + \frac{L_{res} Q_{100}}{100Q_n} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_{100} 为百公里耗电量; L_d 为日行驶里程; L_{res} 为预防突发情况预留的行程。

式(6)为电动汽车的预期荷电状态约束,即电动汽车在预期离网时刻的荷电状态必须大于或等于预期的荷电状态,以满足出行需求。

上述电动汽车的动态信息由电动汽车用户

上传至智能车机平台。该平台上信息共享,辅助于EV个体集群划分和主从博弈的互动进行,但是其他EV用户的信息不对本EV用户进行输出,避免了用户隐私的泄露。

2 汇聚模型建立

EVA与EV集群之间的互动关系建立为主从博弈模型:EVA在获取上层配电网分时购售电价信息的基础上,在微网内部制订针对电动汽车用户的分时购售电价。同时,EVA配备一定容量的柴油机和电池储能资源以促进可再生能源就地消纳和保证微网负荷需求。EVA将初始电价分布信息下发给EV集群,EV集群基于接收到的电价分布在本地智能车机系统优化自身的充放电行为,并将优化结果上发给EVA,EVA基于EV集群的累积操作进而优化电价分布。二者构成一个两阶段的博弈过程,可经过迭代实现均衡。

2.1 EVA模型

2.1.1 电价设计

EVA的主要决策变量为24个时段的分时购售电价,本文的购电价均指下层向上层购买电能的电价,售电价均指下层向上层出售电能的电价。

购电价和售电价可表示如下:

$$\begin{cases} \mathbf{h}_b = [h_b(1), h_b(2), \dots, h_b(t), \dots, h_b(24)] \\ \mathbf{h}_s = [h_s(1), h_s(2), \dots, h_s(t), \dots, h_s(24)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{h}_b 为EVA的购电价向量; \mathbf{h}_s 为售电价向量。

为了防止问题退化,即防止EV集群直接参与上层配电网互动,引入下列的电价约束:

$$H_s(t) \leq h_s(t) \leq h_b(t) \leq H_b(t) \quad (8)$$

式中: $H_s(t), H_b(t)$ 分别为上层配电网制订的 t 时刻的售电价和购电价。

EVA作为主从博弈的领导者,掌握电价制定权,利益天然的向其倾斜,为避免EVA恶意抬升购电价和下压售电价获得高额利润,本文制订以下协议避免此类情况的发生:

$$\begin{cases} h_b(t) \leq \alpha(t)H_b(t) \\ h_s(t) \geq \beta(t)H_s(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\alpha(t)$ 为购电价保护系数; $\beta(t)$ 为售电价保护系数,本文取 $\alpha(t) \in [0.95, 0.98], \beta(t) \in [1.02, 1.05]$ 。

式(9)为分时段角度下的利益保护协议。在实际运行过程中,如果该微网区域下EV的参与汇聚意愿低下,则可适当降低购电价保护系数和提高售电价保护系数,以吸引更多的EV用户参与汇聚过程。当汇聚过程稳定下来后,这些系数可由EVA和EV集群共同协商决定:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T h_b(t) \leq T \cdot \bar{h}_{b_max} \\ \sum_{t=1}^T h_s(t) \geq T \cdot \bar{h}_{s_min} \end{cases} \quad (10)$$

式中: T 为总的优化时段; \bar{h}_{b_max} 为购电价均值上限; \bar{h}_{s_min} 为售电价均值下限。

在本文的上层配电网电价基础上,可取 $\bar{h}_{b_max} \in [0.70, 0.73]$, $\bar{h}_{s_min} \in [0.42, 0.45]$ 。

式(10)为全时段角度下的利益保护协议。在实际运行过程中,如果该微网区域下EV的参与汇聚意愿低下,建议适当降低购电价均值上限和提高售电价均值下限。

2.1.2 EVA的目标及约束

1) 目标函数。EVA通过电价机制为EV用户提供精细化用能服务,同时期望最大化运营收益。此外EVA还具有促进可再生能源发电就地消纳和保证负荷需求的职责,本文特地引入罚成本项 p^{EVA} 来刻画EVA的该部分职责。EVA的目标函数表示为

$$\min f^{EVA} = \sum_{t=1}^T [C^{EVA}(t)] + p^{EVA} \quad (11)$$

式中: $C^{EVA}(t)$ 为EVA的参与运营成本,包括了柴油机运维成本 $C_{DE}(t)$ 、电池储能运维成本 $C_{BA}(t)$ 、与EV集群的互动成本 $C_{A2E}(t)$ 和与上层配电网的互动成本 $C_{A2G}(t)$; p^{EVA} 为罚成本。具体如下:

$$\begin{cases} C_{DE}(t) = c_{oil} D_{iesel}(t) + m_{DE} P_{DE}(t) \\ D_{iesel}(t) = c_1 P_{DE}^2(t) + c_2 P_{DE}(t) + c_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: c_{oil} 为燃油价格; $D_{iesel}(t)$ 为油耗量; m_{DE} 为单位功率运维成本系数; $P_{DE}(t)$ 为柴油机出力; c_1, c_2, c_3 为与柴油机油耗量特性有关的系数。

$$C_{BA}(t) = m_{BA} P_{BA}^2(t) \quad (13)$$

式中: m_{BA} 为单位平方功率运维成本系数; $P_{BA}(t)$ 为电池储能出力,大于0表示充电,小于0表示放电。

$$C_{A2E}(t) = - \sum_{i=1}^N \left[\max(P_{EVcd}^i(t), 0) \cdot h_b(t) + \min(P_{EVcd}^i(t), 0) \cdot h_s(t) \right] \Delta t \quad (14)$$

式中: $P_{EVcd}^i(t)$ 为第*i*个EV集群的充放电功率; N

为EV集群数量。

$$C_{A2G}(t) = [\max(P_{ex}^{EVA}(t), 0) \cdot H_b(t) + \min(P_{ex}^{EVA}(t), 0) \cdot H_s(t)] \Delta t \quad (15)$$

式中: $P_{ex}^{EVA}(t)$ 为EVA与上层配电网的交换功率,大于0表示购入电能,小于0表示售出电能。

$$p^{EVA} = \gamma_1 \sum_{t=1}^T \left[\frac{P_{LD}(t) - P_{PV}(t) - P_{WT}(t) - P_{ex}^{EVA}(t) - \sum_{i=1}^N P_{EVcd}^i(t)}{P_{DE}(t) + P_{BA}(t) + \sum_{i=1}^N P_{EVcd}^i(t)} \right]^2 \quad (16)$$

式中: $P_{LD}(t)$ 为基本负荷预测数据; $P_{PV}(t)$ 为光伏预测出力; $P_{WT}(t)$ 为风电预测出力; γ_1 为EVA的电网意识系数,且随着博弈进行, γ_1 不断增大以实现博弈均衡。在本文中,建议取 $\gamma_1 = 0.005$,迭代速度为5倍。

2) 约束条件。EVA的约束包括电价约束、辅助设备约束和与上层配电网交互功率约束,2.1.1小节已经给出电价约束,这里说明柴油机约束、电池储能约束和与上层配电网的交互功率约束。

$$\begin{cases} 0.2P_{DE, rated} \leq P_{DE}(t) \leq P_{DE, rated} \\ -P_{DE, cl} \leq P_{DE}(t) - P_{DE}(t-1) \leq P_{DE, cl} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{DE, rated}$ 为柴油机的额定出力; $P_{DE, cl}$ 为柴油机的爬坡限制。

$$\begin{cases} -P_{BA, rated} \leq P_{BA}(t) \leq P_{BA, rated} \\ SOC_{BA}(24) \geq SOC_{BA}(1) \\ SOC_{BA}(t) = SOC_{BA}(t-1) + \frac{P_{BA}(t) \eta_{BA} [P_{BA}(t)] \Delta t}{Q_{BA, n}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{BA, rated}$ 为电池储能的额定功率; $Q_{BA, n}$ 为电池储能的额定容量。

$$P_{ex_min}^{EVA} \leq P_{ex}^{EVA}(t) \leq P_{ex_max}^{EVA} \quad (19)$$

式中: $P_{ex_min}^{EVA}$, $P_{ex_max}^{EVA}$ 分别为EVA与上层配电网交互功率的最小值和最大值。

2.2 EV集群模型

EV集群基于接收到的分时售购电价信息,在本地智能车机系统上制订次日的充放电计划。电动汽车除了具有最小化充放电成本的目的外,其作为微网成员之一,具有一定可再生能源就地消纳意识,因此EV集群的目标函数由充放电成本和罚成本组成。

$$\min f^{EV-j} = \sum_{t=1}^T [C_c^i(t) + C_d^i(t)] + p^{EV-j} \quad (20)$$

式中: $C_c^i(t)$ 为充电成本; $C_d^i(t)$ 为放电收益; p^{EV-j} 为罚成本项。

$$C_c^i(t) = h_b(t) \cdot \max [P_{EVcd}^i(t), 0] \cdot \Delta t \quad (21)$$

$$C_d^i(t) = h_s(t) \cdot \min [P_{EVcd}^i(t), 0] \cdot \Delta t \quad (22)$$

$$p^{EV,i} = \gamma_2 \sum_{t=1}^T \left[P_{LD}(t) - P_{PV}(t) - P_{WT}(t) - P_{ex}^{EVA}(t) - P_{DE}(t) + P_{BA}(t) + P_{EVcd}^i(t) \right]^2 \quad (23)$$

式中: γ_2 为 EV 集群的电网意识系数, 一般小于 EVA 的电网意识系数。

随着未来电能消费者电网责任意识的觉醒, 他们参与电力市场将承担一部分的电网安全稳定和清洁能源消纳责任, 这是合理的。在本文中, 建议取 $\gamma_2 = 0.001$, 迭代速度为 2 倍。原因在于, EVA 所承担的电网功率平衡责任要小于 EVA。

2.3 主从博弈及求解流程

在该模型中, EVA 与 EV 集群均有各自的利益诉求, 处于一种非合作的状态: EV 集群基于 EVA 制订的分时售购电价进行最佳决策, 而他们的优化结果又反过来作用于 EVA 的电价策略。这种相互促进改善的互动形式符合于动态非合作博弈中主从博弈的特征: EVA 作为领导者, 决策变量为分时售购电价的概率分布、辅助资源出力及与上层配电网的交互功率; EV 集群作为跟随者, 决策变量为充放电功率。

主从博弈模型可表示为

$$G = \left\{ \{EVA, EV_i\}_{i \in N}, \{Y_{EVA}, Y_{EV_i}\}_{i \in N}, \{f^{EVA}, f^{EV_i}\}_{i \in N} \right\} \quad (24)$$

该博弈模型包含一般博弈的 3 大元素: 参与者 $\{EVA, EV_i\}_{i \in N}$ 、策略集 $\{Y_{EVA}, Y_{EV_i}\}_{i \in N}$ 和效益函数 $\{f^{EVA}, f^{EV_i}\}_{i \in N}$ 。策略集可用上述模型的约束条件表示, EVA 的策略集包括式(7)~式(10)和式(17)~式(19), EV_i 的策略集包括式(3)~式(6); 效益函数可用目标函数表示, EVA 的效益函数可用式(11)表示, EV_i 的效益函数可用式(20)表示。在本文中, 博弈的效益函数统一表示为成本函数形式, 只需加个负号即可。

考虑到 EV 参与者具有较高的自主性和智能性, 传统的集中式优化方法已不适用于上述模型。因此, 本文提出一种基于 Matlab 平台 YALMIP 工具箱的分布式求解算法, 无需集中所有 EV 的设备参数和出行习惯等数据, 有效保护了用户隐私。

博弈均衡判据包括: 1) 系统日前不平衡功率在允许范围内; 2) 博弈参与者的相邻两次决策差距在允许范围内。

主从博弈模型求解流程如图 2 所示。

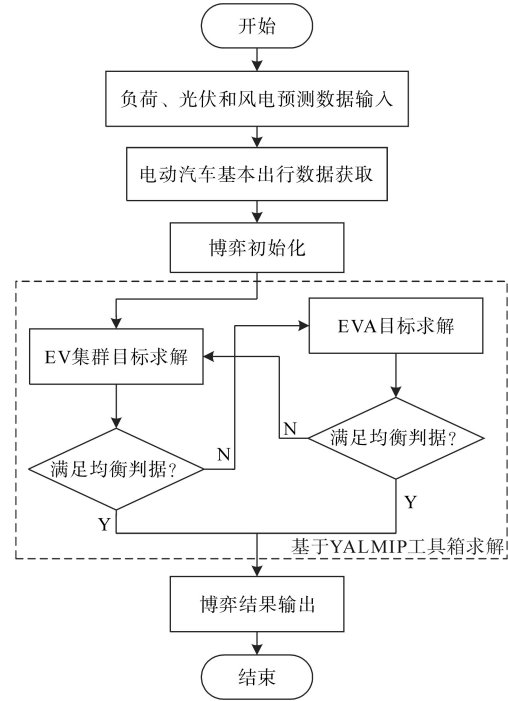


图2 模型求解流程

Fig.2 Model solving process

3 仿真算例

3.1 基础数据

本文以并网型微电网为研究场景, 其中 EVA 基于预测技术获得微网负荷、光伏和风电数据如图 3 所示。可以看出, 微网负荷存在两个高峰时段, 分别处于 13:00~16:00 和 17:00~21:00 时段; 光伏出力集中在白天出力, 但其出力还不足以完全匹配负荷需求; 风电出力集中在夜间, 出力大于负荷需求。即该微网地区存在供需不平衡的情况, 可再生能源的就地消纳出现障碍。因此需要寻求其他的灵活性资源来就地消纳该部分不平衡功率。

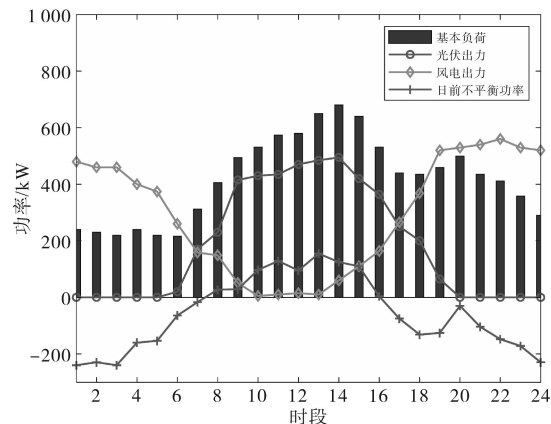


图3 负荷、光伏和风电数据

Fig.3 Load, photovoltaic and wind power data

需要说明的是,该模型的有效性依赖于EVA对微网次日负荷、光伏和风电出力的预期精度。通常而言,预测不准确度将会影响EVA和EVC博弈策略的制订,进而影响可再生能源的就地消纳水平。但是,预测手段作为EVC的功能之一,随着负荷预测技术的进步,预测不准确度的影响将会进一步降低。此外,由于预测不准确度带来的微网系统不平衡功率将在实时市场动态消纳。

假设该微网地区的电动汽车数量为64辆,并将电动汽车划分为两大类:第一类寻求在商业园区停车场并网,且其入网荷电状态较大、离网需求较小,在利益驱使下有可能参与放电获得收益;第二类寻求在住宅小区停车场并网,且其入网荷电状态较小、离网需求较大,希望在低电价时段参与充电降低成本。单辆电动汽车的基础参数如下:额定容量 $55\text{ kW}\cdot\text{h}$,SOC下限0.2,额定功率 8 kW ,百公里耗电量 $24\text{ kW}\cdot\text{h}$,充放电效率92%,突发预留行程 90 km ,SOC上限1.0。

上层配电网的分时售购电价是固定下来的:采用全天一致的售电价,均为 $0.36\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;购电价采用峰谷平时电价,分别为 $1.20\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $0.61\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和 $0.85\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

柴油机基本参数如下:额定发电功率为 30 kW ;爬坡限制为 10 kW/h ;耗量系数 $c_1=0.002$, $c_2=0.025$, $c_3=0.5$;维护成本为 $0.0645\text{ 元}/\text{kW}$;柴油价格为 $5.3\text{ 元}/\text{L}$ 。

电池储能基本参数如下:额定容量为 $80\text{ kW}\cdot\text{h}$;额定功率为 20 kW ;SOC上下限分别为1.0和0.2;充放电效率为90%;单位平方功率维护成本为 $0.0002\text{ 元}/\text{kW}^2$ 。

3.2 结果分析

基于Matlab平台的YALMIP工具箱对模型进行分布式互动求解,所提集群划分方法将64辆电动汽车划分为34个EV集群,有效降低了优化维度,模型经过9次互动实现均衡。在经济性方面,EVA通过参与电动汽车汇聚复用过程实现经济获利921.43元,电动汽车群体的充放电成本从934.29元(不参与汇聚过程)下降至819.79元。

图4为博弈均衡后的EV集群、柴油机、电池储能、EVA与上层配电网交互功率的决策结果。可以看到,EV集群主要集中在18:00~06:00时段进行充电和集中在08:00~17:00时段进行放电,符合电动汽车的出行规律,有效消纳系统的日前不平衡功率;柴油机和电池储能为EVA配置的辅

助资源,旨在发挥分布式电动汽车储能汇聚后的辅助作用,均以小额功率出力,有效促进了可再生能源就地消纳;此外,EVA会将系统的多余电能出售给上层配电网实现经济利益的提升。

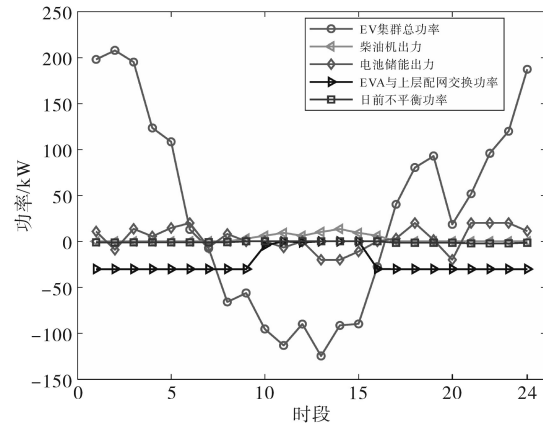


图4 参与方功率博弈结果

Fig.4 Participant power game results

图5为EV集群的出力情况。第一类EV集中在商业园区停车场放电,同时某些时段存在充电操作,说明EV在并网期间进行了灵活的充放电行为,实现了白天多余负荷的消纳;第二类EV集中在住宅小区停车场充电,实现夜间多余风电的消纳。结果符合电动汽车的出行规律,能有效吸收系统的不平衡功率。

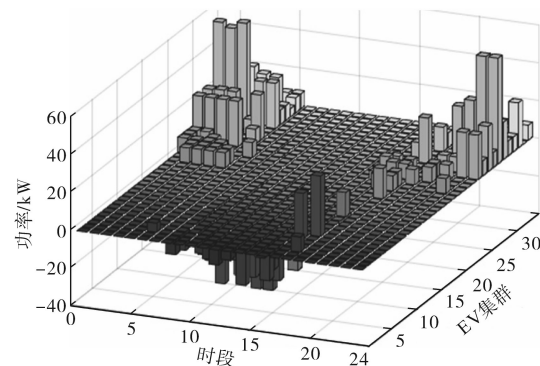


图5 EV集群充放电功率分布

Fig.5 EV cluster charging and discharging power distribution

图6为EVA的电价博弈结果,可以看到EVA制订的电价均处于上层配电网的售购电价区间内,且购电价大于售电价,符合预期,避免了EV集群直接参与上层配电网互动。为探究电动汽车不参与汇聚过程与参与汇聚过程的差异性,对64辆电动汽车参与无序充电过程进行了分析。在该过程下,电动汽车缺少利益驱动,通常一接入电网就以最大功率参与充电,以最快速度满足出行需求。对比分布式电动汽车储能是否参与汇聚对微网系统日前不平衡功率的影响,如图7所示。

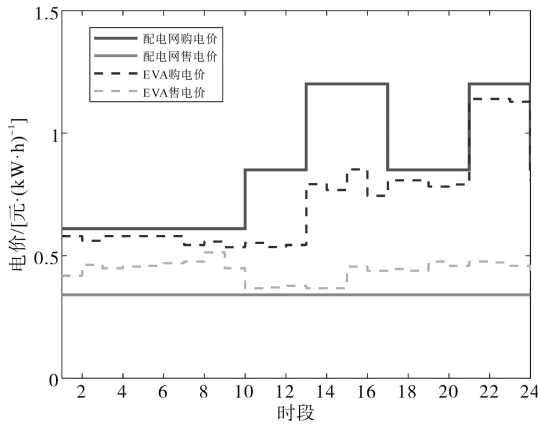


图6 EVA电价博弈结果

Fig.6 EVA electricity price game results

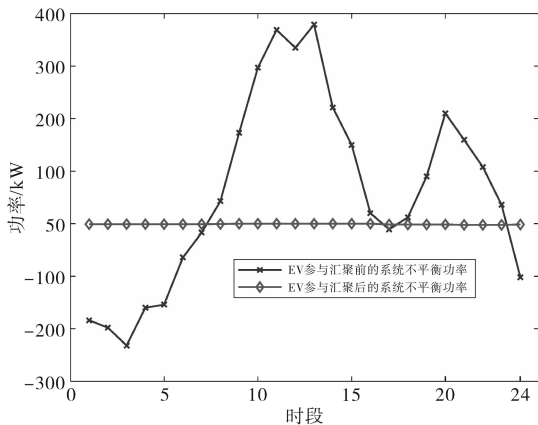


图7 EV参与汇聚前后系统日前不平衡功率对比

Fig.7 Comparison of unbalanced power of the system before and after EV participation in the convergence

综上所述可以看出,电动汽车在没有参与汇聚前进行无序充电,将导致微网系统的日前不平衡功率进一步增大。在EVA参与电力市场后,通过电价机制对分布式电动汽车储能进行汇聚,使得系统的日前不平衡功率接近于0,这一部分很小的不平衡量将在实时市场加以消纳。

4 结论

本文提出一种基于主从博弈的分布式储能汇聚方法。该方法充分考虑电动汽车作为交通工具的本能,遵从电动汽车出行意愿,建立了电动汽车聚合商与分布式电动汽车集群之间的汇聚互动模型。进一步结合YALMIP工具箱提出一种分布式互动算法对问题进行求解,兼顾电动汽车的自主性和智能性,避免了电动汽车用户信息的泄露。

仿真结果表明:所提方法可以同时实现博弈参与者经济效益提高和促进可再生能源就地消纳,验证了分布式电动汽车储能汇聚模型的可行

性和有效性。下一步研究方向可关注于电动汽车消费者的有限理性特征对汇聚过程的影响。

参考文献

- [1] 郭敏晓,杨宏伟. 围绕“碳中和”愿景 能源与环境领域将呈现六方面的变化趋势“十三五”能源与环境形势及“十四五”展望[J]. 中国能源,2021,43(3):19-23,58.
GUO Minxiao, YANG Hongwei. Focusing on the vision of "carbon neutrality", the energy and environment field will show six trends in the energy and environment situation during the 13th Five-Year Plan and the outlook for the 14th Five-Year Plan[J]. China Energy, 2021, 43(3): 19-23, 58.
- [2] 赵剑波,王蕾. “十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 中国能源,2021,43(5):17-21.
ZHAO Jianbo, WANG Lei. "The 14th Five-Year Plan" to build a new power system with new energy as the main body[J]. China Energy, 2021, 43(5): 17-21.
- [3] TAN K M, RAMACHANDARAMURTHY V K, YONG J Y. Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53(JANa): 720-732.
- [4] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. A review of power market research for high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [5] 胡棚焱,谭泽富,邱刚,等. 电动汽车发展综述[J]. 电气应用, 2018,37(20):79-85.
HU Kuiqiu, TAN Zefu, QIU Gang, et al. Overview of the development of electric vehicles[J]. Electrical Application, 2018, 37(20): 79-85.
- [6] 靳文涛,牛萌,吕洪章,等. 客户侧分布式储能汇聚潜力评估方法[J]. 电力建设,2019,40(4):34-41.
JIN Wentao, NIU Meng, LÜ Hongzhang, et al. Evaluation method for the accumulation potential of distributed energy storage on the client side[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 34-41.
- [7] 陈丽丹,张尧,FIGUEIREDO A. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):177-191.
CHEN Lidan, ZHANG Yao, FIGUEIREDO A. Overview of research on electric vehicle charge and discharge load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 177-191.
- [8] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):43-49,58.
LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of auxiliary services provided by electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 43-49, 58.
- [9] 靳文涛. 分布式储能汇聚协调控制策略研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2018.

(下转第89页)

- Gaozhao DC line insulators[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(3):672-676.
- [7] WARDMAN J. Influence of volcanic ash contamination on the flashover voltage of HVAC outdoor suspension insulators [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2019, 21(3): 1189-1197.
- [8] SALEM A. Factors and models of pollution flashover on high voltage outdoor insulators: Review[C]//in Proc. IEEE Conf. Energy Convers. (CENCON), 2017:241-246.
- [9] 吕玉坤,赵伟萍,庞广陆,等. 典型伞型瓷及复合绝缘子积污特性模拟研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 209-216.
- LÜ Yukun, ZHAO Weiping, PANG Guanglu, et al. Simulation of fouling characteristics of typical umbrella porcelain and composite insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1):209-216.
- [10] SALEM A A, ABD-RAHMAN R, KAMARUDIN M S, et al. Proposal of a dynamic numerical approach in predicting flash-over critical voltage[J]. Power Electron. Drive Syst., 2019, 10(2):602.
- [11] RICHARDS C N, RENOWDEN J D. Development of a remote
- insulator contamination monitoring system[J] IEEE Trans. Power Del., 1997, 12(1): 389-397.
- [12] LAS T. Impact of corona on the long-term performance of nonceramic insulators[J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2018, 11(5):913-915.
- [13] LIU Y, KONG X. Dynamic behavior of droplets and flashover characteristics for CFD and experimental analysis on SiR composites[J]. IEEE Access, 2019, 7:8095-8101.
- [14] 毕晓田,任昂,沈庆河,等. $\pm 660\text{kV}$ 银东线绝缘子串的自然积污特性研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(10):45-54.
- BI Xiaotian, REN Ang, SHEN Qinghe, et al. Study on natural fouling characteristics of $\pm 660\text{ kV}$ Yin-East line insulator string [J]. Insulation Materials, 2015, 48(10):45-54.
- [15] 卢明,刘泽辉,向玲,等. 不同电压等级下绝缘子积污特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1):186-191.
- LU Ming, LIU Zehui, XIANG Ling, et al. Research on fouling characteristics of insulator under different voltage grades[J]. Electric Porcelain Lightning Arrester, 2020(1):186-191.

收稿日期:2021-05-17

修改稿日期:2021-07-08

(上接第76页)

- JIN Wentao. Research on coordinated control strategy of distributed energy storage convergence[D]. China Electric Power Research Institute, 2018.
- [10] 杨晓东,张有兵,任帅杰,等. 含高渗透率光伏发电并网型微网中的电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18):15-23.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, REN Shuaijie, et al. Optimal dispatch method of electric vehicles in grid-connected microgrid with high penetration rate photovoltaic power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18):15-23.
- [11] 张高,王旭,蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11):48-55.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Coordinated dispatching of virtual power plants with electric vehicles based on master-slave game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):48-55.
- [12] 郝丽丽,王国栋,王辉,等. 考虑电动汽车入网辅助服务的配电网日前调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14):35-43.
- HAO Lili, WANG Guodong, WANG Hui, et al. Day-ahead dispatch strategy for distribution network considering auxiliary services of electric vehicles into the grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):35-43.
- [13] 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. Regional electricity market model for electric vehicles providing backup services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24):71-76.
- [14] LIU N, CHEN Q, LIU J, et al. A heuristic operation strategy for commercial building microgrids containing EVs and PV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2560-2570.

收稿日期:2021-09-26

修改稿日期:2021-10-15