

辅助负荷削峰的电动出租车V2G协同策略与效益分析

任峰^{1,2}, 向月¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川成都 610065; 2. 四川西昌电力股份有限公司, 四川西昌 615000)

摘要:随着电动出租车规模化增长,其对电网的影响不断增大。为了充分利用电动出租车行驶轨迹与电网供电区域的耦合关系,加强电动出租车与电网间的协作,改善电力系统运行的安全性和经济性,提出了一种在用电高峰时段辅助负荷削峰的电动出租车车网互动(V2G)协同策略。首先,采用K-means算法将电动出租车的行驶区域与电网的供电区域进行耦合,找到供电区域内最适合调用的电动出租车;然后,基于需求响应电价,构建电动出租车在常规运营模式和V2G模式共同作用下的收益模型;最后,计算电动出租车车主的收益、响应参与度以及电动出租车对行驶区域内电网的削峰效果。基于Python的仿真结果表明,相较于原有运营方式,电动出租车车主在常规运营模式和V2G模式的共同作用下,能获得更好的收益和额外的休息时间,同时也能对其活跃区域内的电网负荷有较好的削峰效果。

关键词:V2G; 电动出租车; K-means 算法; 行驶区域分区; 需求响应; 经济效益; 削峰

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112004

0 引言

随着对环境的重视程度越来越高,绿色出行受到越来越多的关注,以电动汽车(EV)为代表的新能源汽车得到了大力发展。随着EV保有量的不断增加,EV长期储存了超过50%的电能,不利于能源的利用。而在车网互动(V2G)技术的支持下,EV不仅能够提高能源利用率^[1],还能为电网提供一定的辅助服务,提高电网的稳定性^[2]。2020年4月15日,国家电网有限公司华北分部在国内首次将V2G充电桩资源正式纳入华北电力调峰辅助服务市场并正式结算。基于V2G技术,EV可由单一充电形态拓展为充电、放电2种形态,从而参与电网的实时调控和调峰辅助服务^[3]。由于社会各界对电力的需求越来越多,会造成用电高峰时段电网的安全性下降,将EV作为移动式储能元件在特定的时段、地点对电网放电进行调峰^[4],成为“快闪调峰电厂”,有助于提升电网的安全性。2020年11月,国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》^[5]中指出,加强新能源汽车与电网能量互动,鼓励地方开展V2G示范应用。为此,本文以纯电动出租车为研究对象,对电动出租车这类特殊集群以V2G模式参与电网协同削峰及其效益进行分析。

目前,已有较多关于V2G经济效益及V2G对电网削峰平谷响应能力的研究:文献^[6]提出了单辆EV

的V2G模型,基于此对EV集群的V2G响应能力进行评估,探索了EV参与电网运行的可行性;文献^[7]分析了峰谷分时电价对EV充电过程的影响;文献^[8]在文献^[7]的基础上,考虑了不同深度放电情况对EV电池寿命的影响,从单辆EV的V2G响应机制推广到EV集群。上述研究表明只有量大、集中、充放电可控的EV参与V2G才能发挥更大的价值,特别是在一些微电网局部区域内可发挥重要的作用^[9]。但在目前没有充放电价格机制引导的情况下,EV用户只会根据EV需求随机充电。文献^[10]提出只有在市场能对EV用户进行有效经济补偿时,EV用户才会参与辅助服务市场。但单辆EV难以主动响应市场,往往只能通过第三方平台^[11]实现“抱团”响应。

上述研究均指出V2G不是单一EV所能承担的,同时也提出电价因素是影响V2G的重要指标。在目前低碳出行的大背景下,各城市内的电动出租车数量日渐增长,同时城市用电负荷需求越来越高,关于如何能召集电动出租车集群,在V2G技术的支持下,与相适应的电网协同参与削峰的问题尚未得到解决。为此,本文结合城市出租车的运行轨迹数据,找到供电区域内最适合调用的电动出租车集群;基于需求响应电价,进行V2G协同负荷削峰策略与效益分析,以此分析电动出租车的经济效益及其对行驶区域内电网的削峰效果。

1 电动出租车的行驶轨迹分区

电动出租车行驶在城市区域内的所有道路上,且行驶轨迹具有一定的规律性。对于城市规模较大的地区而言,电动出租车车主会习惯性地选择熟悉的地区行驶,除非接单收益很大,否则不会行驶到过远的区域。通过对行驶轨迹进行分析,可以得到各

收稿日期:2021-04-13;修回日期:2021-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807127,5211153006);四川省科技计划项目(2020YFSY0037)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807127,5211153006) and the Science and Technology Plan Program of Sichuan Province(2020YFSY0037)

电动出租车经常行驶的区域。

在目前处于运营状态的电动出租车上装设全球定位系统(GPS)^[12],间隔一定的时间采集1组经度、纬度数据。 K -means算法是一种简单的迭代型聚类算法,采用距离作为相似性指标,电动出租车的行驶轨迹与其不谋而合,本文考虑从已采集的经度、纬度数据中,剥离出合适的数据进行 K -means^[13]聚类,从而发现给定的电动出租车位置数据可聚类为 K 个类别,且每个类别的聚类中心是根据各类别中电动出租车经度、纬度数据的均值得到,为此各类别可用聚类中心进行描述。对于一个给定的数据集 X ,选取欧氏距离作为相似性指标,以最小化各类别的聚类平方和为聚类目标,确定各聚类类别和聚类中心。

给定训练集如式(1)所示。

$$(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) \quad \mathbf{x}_i \in \mathbf{R}_n \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为电动出租车 i 的经纬度向量; N 为电动出租车的数量; \mathbf{R}_n 为2维向量(经度、纬度), n 为2维向量的数量。随机选取 K 个聚类中心,结合最小二乘法和拉格朗日原理,聚类中心为对应类别中各数据点的平均值,同时为了使算法能够收敛,在迭代过程中应使最终的聚类中心 J 的位置尽可能不变,则有:

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i - \mathbf{u}_k\|^2 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_k \in \mathbf{R}_n$ 为随机选取的第 k 个聚类中心。

初始聚类中心的选取对最终的聚类结果会产生影响,因此本文通过多次选取聚类中心进行迭代,同时与变电站供电区进行匹配,寻求电动出租车与具有削峰需求的变电站相耦合的最优解。

2 需求响应下电动出租车集群参与削峰

2.1 现有电动出租车的基本情况

根据现有出租车的运行习惯及EV电池容量可知,目前各城市的电动出租车续航里程普遍多于400 km;2019年广州市投入1500辆某全新车型作为电动出租车^[14],其电池续航里程为410 km;2020年成都所采用电动出租车^[15]的最大续航里程为450 km。根据当前EV的续航里程表现,一天一充基本能满足其出行需求,且随着EV的发展,续航里程会越来越长,未来完全能做到一天一充。考虑到白天均为有电驱动的情况,对于EV作为高度灵活的移动储能单元参与负荷调节时,可参考文献[16]中的参与方式和激励措施。但若EV的放电功率过大,则会加速电池寿命缩减^[8],用户将不愿意以V2G的方式进行放电;若放电功率过小,则会影响削峰效果。因此,需考虑EV放电功率与电池容量(车型)相匹配。

2.2 电动出租车集群的分组安排

为了使更多的车辆有时间思考是否参与削峰,

同时也为电网提供调整运行方式的时间,通过电网内部进行削峰负荷测算后,提前24 h对外发布削峰需求,由聚合商进行车辆分配和调用。同时为了避免某时段有过多的电动出租车参与,且一天中有2个用电高峰时段,本文将电动出租车集群分为Team A和Team B,其运营模式如图1所示。

时段	Team A	Team B
07:00—11:00	接单	接单
11:00—13:00	进行V2G削峰服务	接单
13:00—14:00	就地充电	接单
14:00—15:00	接单	接单
15:00—16:00	接单	就地充电
16:00—18:00	接单	进行V2G削峰服务
18:00—20:00	接单	接单

图1 电动出租车的运营模式

Fig.1 Operation mode of electric taxis

通过分组参与,能避免任意用电高峰时段大部分电动出租车前往参与调度放电,使城市内用于居民出行的出租车数量骤减。本文规定Team A和Team B的电动出租车在一天内最多只能响应1次,使每个用电高峰时段内都有一定数量的电动出租车满足居民的出行需求,同时当前各种网约车的加入,使得在调度电动出租车进行削峰的过程中,居民的出行需求能够得到满足,有效保障交通网的正常运行。由于居民在夜间的出行需求较少,且不具有特别明显的规律,本文方案并未考虑夜间电力低谷时段的运行情况。

根据目前电动出租车的电池容量情况,电动出租车在用电高峰时段(2 h)之后需进行就地充电,考虑环境空间的最优利用率,在安装充电桩的停车位安装V2G反向放电设备,能有效提高空间利用率。

目前,各厂家充电桩的充电功率在逐步增大,但是大规模电动出租车批量充电也会给电网的安全运行带来隐患。为了避免V2G后就地充电引起新一轮的用电高峰问题,可以采用充电功率可变的充电桩,假设 $[0, 20)$ min内的充电功率为 P_1 , $[20, 40)$ min内充电功率上升为 P_2 , $[40, 60)$ min内充电功率上升为 P_3 (P_3 为充电桩的峰值充电功率),则充电桩的平均充电功率 P_{var} 如式(3)所示,其值小于日常快充的充电功率,能有效降低该时段内负荷的增长速度。

$$P_{var} = (P_1 + P_2 + P_3) / 3 < P_3 \quad (3)$$

未来随着EV的发展,车载电池容量逐步增加,EV放电后可能不再需要就地充电,这样能够更加有效地避免产生新的用电高峰。

2.3 V2G对车辆剩余电量的影响

V2G削峰收益对电动出租车的常规行驶接单有很大的影响。若V2G综合费用很高,则对车主会有

很强的吸引力,车主会尽可能少地接单以留存更多的电量参与V2G,这样就有悖于出租车的本职工作。为了避免类似事件的发生,可以采用以下限制方式:①限制电动出租车参与V2G放电前的最大剩余电量 U ,避免车主留存过多的电量;②由于单辆电动出租车难以主动响应市场,往往只能通过第三方平台^[11]实现“抱团”响应,规定电动出租车通过聚合商参与V2G;③每辆电动出租车的放电量由聚合商进行代理安排。则可调用电量可分为以下2种情况:

1)情况1,聚合商与电网确定削峰总量后,安排每辆参与电动出租车的最大放电量 U_{ass} ;

2)情况2,电动出租车从行驶到放电时刻,留存的剩余可调用电量 $U_{\text{rated}} - 15\% U_{\text{rated}} - 100 x_t (U_{\text{rated}}/L_{\text{sta}})$ 。

则可调用电量 U_{ad} 的计算式为:

$$U_{\text{ad}} = \begin{cases} U_{\text{ass}} & \text{情况1} \\ U_{\text{rated}} - 15\% U_{\text{rated}} - 100 x_t (U_{\text{rated}}/L_{\text{sta}}) & \text{情况2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{rated} 为电池的额定容量; x_t 为车辆从满电或者补充电量后,行驶到 t 时段时电动出租车的平均行驶里程; L_{sta} 为最大行驶里程; $15\% U_{\text{rated}}$ 为保护电动出租车电池设置的最低保护电量^[17]。

考虑车载电池容量,为了在V2G放电后能满足后续电动出租车的接单运营,规定V2G放电后进行就地充电的最小电量(或放电前的最小充电电量) U_c 为:

$$U_c = U_{\text{ad}} - 100 x_{t,\text{ave}} (U_{\text{rated}}/L_{\text{sta}}) \quad (5)$$

式中: $x_{t,\text{ave}}$ 为充放电时间内,在常规运营模式下的平均行驶里程。

为了使电网能更精确地进行负荷调整,对于愿意参与V2G放电的电动出租车而言,应对其电量进行约束(由于单一电动出租车不便于管理,电量约束由聚合商代为管理)。

1)强约束(V2G放电前最大行驶里程为 $x_{t,\text{max}}$):接受参与第二天放电的电动出租车需要保证其第二天的放电量,以获得高额的服务费;约定的最大放电量,考虑调峰时间为2h,所以设置2h的最大放电量为2倍放电功率对应的电量。

2)弱约束(V2G放电前最大行驶里程为 $x_{t,i}$):对于接受参与第二天放电的电动出租车,无需保证其第二天规定的最大放电量,但需保证最低放电量 $U_{\text{rated}} - 15\% U_{\text{rated}} - 100 x_{t,i} (U_{\text{rated}}/L_{\text{sta}})$ 。

相较于强约束,弱约束下车主对行驶里程及接单有更充足的选择,但是V2G削峰收益相对较低,设此时的V2G削峰收益为强约束下的某一比例。

2.4 电动出租车V2G削峰收益

电动出租车的主要收益来源为接单,只有当削峰收益大于充电支出与损耗费用时,其才会参与放电。V2G模式下使电动出租车的日收益 M 最大化的目标函数为:

$$\max M = \sum_{t=1}^T R(t) + C_{\text{dis}} - C_{\text{cha}} - k_{\text{DOD}} \quad (6)$$

$$R(t) = m_{\text{ave}} \quad (7)$$

$$C_{\text{dis}} = U_{\text{ad}} p_{\text{dis}} \quad (8)$$

$$C_{\text{cha}} = U_c p_{\text{cha}} \quad (9)$$

式中: T 为时段总数,本文中取值为24; $R(t)$ 为 t 时段段的平均接单收益; C_{dis} 为V2G削峰收益; C_{cha} 为额外电量的充电支出; k_{DOD} 为单次快速放电损耗费用; m_{ave} 为单位时段的平均接单收益; p_{dis} 为放电电价、服务费和需求响应补偿电价之和; p_{cha} 为充电电价。

根据文献[18]提出的V2G电池损耗费用,定义电池的放电深度 D_{DOD} 为:

$$D_{\text{DOD}} = S_{\text{soc1}} - S_{\text{soc2}} \quad (10)$$

式中: S_{soc1} 、 S_{soc2} 分别为放电前、后的电池容量。

电池的循环寿命与工作方式密切相关,放电深度越大,则循环寿命越短,放电深度与循环寿命之间的关系曲线被称为电池的放电特性曲线。文献[18]通过曲线拟合得到某型号锂电池在经典模型下的放电特性曲线为:

$$L = L(D_{\text{DOD}}) \quad (11)$$

式中: L 为电池在 D_{DOD} 下的循环寿命。

电池的总放电量 L_{ET} 、单位放电量的平均成本 k_b^{DOD} 和单次快速放电损耗费用 k_{DOD} 取决于电池的放电深度,可分别表示为^[8]:

$$L_{\text{ET}} = L E_s D_{\text{DOD}} \quad (12)$$

$$k_b^{\text{DOD}} = C_{\text{bat}}/L_{\text{ET}} \quad (13)$$

$$k_{\text{DOD}} = C_{\text{bat}}/L \quad (14)$$

式中: C_{bat} 为电池的购电成本; E_s 为电池容量。

考虑到活跃在不同区域的电动出租车以V2G模式进行放电的单价相同,但其在不同约束条件下的放电量所带来的收益会不同,因此车主会有不同的参与度。本文定义电动出租车车主的参与度 β 为:

$$\beta = (C_{\text{V2G}} + C_{\text{business},t})/C'_{\text{business}} \quad (15)$$

式中: C_{V2G} 为V2G净收益, $C_{\text{V2G}} = C_{\text{dis}} - C_{\text{cha}} - k_{\text{DOD}}$; $C_{\text{business},t}$ 为V2G模式下剩余时间的接单收益; C'_{business} 为常规运营模式的接单收益。若 $\beta \geq 1$,则表示车主愿意参与V2G;若 $\beta < 1$,则表示车主不愿意参与V2G。

对于电动出租车车主而言,如果其参与V2G削峰,则还能获得额外的休息时间 T_{test} ,如式(16)所示。

$$T_{\text{test}} = U_{\text{ad}}/P_{\text{rated}} + U_c/P_{\text{var}} \quad (16)$$

式中: P_{rated} 为智能充电桩的额定放电功率。

当参与V2G放电的车辆数量增加时,可以对电网提供更多的电能,单位时段的放电量 W 为:

$$W = \frac{[U_{\text{rated}} - 15\% U_{\text{rated}} - 100 x_{t,\text{max}/f} (U_{\text{rated}}/L_{\text{sta}})] z}{m} \quad (17)$$

式中: $x_{t,\text{max}/f}$ 为强/弱约束下的行驶里程; z 为参与V2G放电的车辆数量; m 为削峰小时数。

2.5 协同策略

电动出租车以V2G模式与电网协同进行削峰的流程见图附录A图A1。电网内部进行削峰负荷测算后,提前24 h对外发布削峰需求;利用K-means算法对电动出租车按行驶轨迹习惯进行分类,找出该区域内的电动出租车并对其发布激励,并指明第二天所要前往的地点(某商场停车场或某车站停车场),车主根据自身的行驶习惯,可选择不参与V2G削峰或选择在强/弱约束下参与V2G削峰以获取相应的收益。基于上述方法可吸引更多的电动出租车参与削峰,可得到电动出租车集群单位时段的削峰电量,进而可以得到对电网的削峰量,基于此电力调度人员可以更好地安排第二天电网的运行方式。

3 算例分析

3.1 基础数据

以成都市出租车的运行轨迹为参考数据,对某天出租车轨迹数据进行聚类,结果如附录A图A2所示。基于该结果,电动出租车可就近提供V2G放电服务。电动出租车采用吉利几何A型轿车,基础参数如附录A表A1所示,并设其V2G放电功率为20 kW,基准耗电量为0.15 kW·h/km。由图A2可知,为了更好地调用电动出租车进行削峰,除了需要进行经济方面激励外,还应该从各车辆的行驶习惯进行考虑。根据城市固有的分区可知,每一个区域对应一个供电公司,而各供电公司又相对独立,因此尽可能以各个供电区域范围的中心作为聚类中心 J ,根据式(1)和式(2)以及成都市电动出租车集群的GPS数据,对电动出租车进行分类,便于各区域供电公司调用。根据2019年11月28日成都市发布的《成都市中心城区巡游出租汽车区域融合改革实施方案》^[19]可知,出租车长期以来存在收取跨区费用或者以各种借口为由拒绝前往其他区域的现象,导致其运行轨迹常年处于特定区域及该区域附近,从而为区域内电网削峰提供了充足的车辆条件。

根据赶集网^[20]发布的成都地区出租车车主的平均工资,设置单位时段平均接单收益为12.78元/h;根据成都出租车网发布的2019年出租汽车燃油消耗数据^[21],成都市直属地区车辆的日均行驶里程为357.91 km,每小时平均行驶里程 $x_{r,ave} = 22.7$ km。

假设强约束下需保证削峰时间为2 h,电动出租车的最大削峰电量为40 kW·h,而弱约束下最大削峰电量为20 kW·h。设弱约束下1 kW·h削峰电量的收益为强约束下的80%。对于放电后立即充电的电动出租车而言,选用充电功率可变式充电桩,且为了避免造成新的用电高峰,设[0,20) min内的充电功率为20 kW,[20,40) min内充电功率上升为40 kW,[40,60) min内充电功率继续上升为60 kW。

考虑成都地区的电价^[22]和电动出租车在需求响应电价下参与削峰的补偿单价作为电网侧的输入参数。目前上海、江苏等省市因地制宜地开展了需求响应试点,四川省目前暂未开展,故本文参考已有地区的实际削峰需求响应补偿单价2.4元/(kW·h)(提前24 h方式通知参与响应)^[16]进行算例仿真分析。

3.2 单辆电动出租车V2G削峰收益仿真

对电动出租车的行驶轨迹习惯数据进行分析处理,取附录A图A2中某区域内的电动出租车(部分车辆的经度、纬度数据如附录A表A2所示),并参照图1中Team A的运营时段进行调度,仿真结果如表1所示。由表可知:对于该区域内的电动出租车而言,车主在强约束V2G模式下的参与度 $\beta \geq 1$,收益(210.23元)大于常规运营模式下的收益;车主在弱约束V2G模式下的参与度 $\beta < 1$,收益小于常规运营模式下的收益。

表1 电动出租车在不同模式下的收益与参与度
Table 1 Benefits and participation degree of electric taxis under different modes

模式	收益/元	参与度
V2G模式	强约束	210.23
	弱约束	199.60
常规运营模式	204.40	1.00

由于附录A图A2是根据实际城市区域中心点作为聚类中心进行分类所得结果,在供电区域内调度其电动出租车,更适合与该区域的供电公司进行协同削峰,削峰放电电量及损耗费用结果如表2所示。由表可知:无论是在强约束还是弱约束下,都能够利用电动出租车的剩余电量进行削峰,强、弱约束下的放电电量分别为40、20 kW·h;随着放电电量的增加,损耗费用也相应增加,强、弱约束下的损耗费用分别为38.30、20.08元,随着放电深度的增加,V2G削峰收益增加,但损耗费用也在增加。

表2 电动出租车的放电电量和损耗费用
Table 2 Discharging energy and loss cost of electric taxis

约束	放电电量/(kW·h)	损耗费用/元
强约束	40	38.30
弱约束	20	20.08

对于电动出租车车主而言,其在常规运营模式下很难有相对稳定的休息时间,而在V2G技术的支持下,电动出租车车主只要参与V2G,均可获得一定的休息时间,结果如表3所示。由表3可知:V2G技术能为电动出租车车主提供休息时间,强约束下车主一共能获得2.96 h的休息时间,弱约束条件下车主一共能获得1.75 h的休息时间。

Team B所调度的电动出租车是与Team A运行

表 3 电动出租车车主获得的休息时间

Table 3 Rest time of electric taxi owners

约束	车主获得的休息时间/h	
	放电	充电
强约束	2.00	0.96
弱约束	1.00	0.75

在同一区域的车辆,以确保能与该区域电网进行需求响应下最便捷的削峰。在目前车辆电池容量的条件下,对 Team B 经济效益的计算有别于 Team A。在放电前,Team B 的剩余电量已经不多,因此 Team B 会先进行充电,再进行放电,且同样以强、弱约束方式进行。调度 Team A、Team B 时的结果对比如表 4 所示。

表 4 调度 Team A、Team B 时的结果对比

Table 4 Result comparison between scheduling

Team A and scheduling Team B

组别	约束	收益/元	损耗费用/元	休息时间/h	
				充电	放电
Team A	强约束	210.23	38.30	0.96	2.00
	弱约束	200.94	20.08	0.75	1.00
Team B	强约束	210.23	38.30	2.00	0.96
	弱约束	200.94	20.08	1.00	0.75

由表 4 可知,调度 Team B 的效果与调度 Team A 的效果相同。如果 2 组的收益有较大的差距,就可能造成电动出租车车主集中在某个调度时段进行放电,进而影响电网的削峰效果以及城市交通网络运营状态。通过仿真计算同一时段的调度过程可知,在需求响应补偿电价为 2.4 元/(kW·h)的条件下,只有采用强约束 V2G 模式,车主才能获得比常规运营模式更多的收益;在弱约束 V2G 模式下,车主仅能获得额外的休息时间,收益相比于常规运营模式有所下降。

3.3 不同需求响应补偿电价的灵敏度分析

考虑不同地区的需求响应补偿电价存在差异,通过设置不同的需求响应补偿电价探讨其对电动出租车调度策略的影响。在基础算例的基础上,设置需求响应补偿电价为 2.0、2.6、3.0 元/(kW·h),基于 Team A 的运营时段对该区域内的电动出租车进行调度,所得结果如表 5 所示。

由表 5 可知:需求响应补偿电价直接影响收益,

表 5 不同需求响应补偿电价下的收益和参与度

Table 5 Benefits and participation degree with different demand response compensation prices

需求响应 补偿电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	收益/元			损耗费用/元		参与度	
	强约束 V2G 模式	弱约束 V2G 模式	常规运营 模式	强约束 V2G 模式	弱约束 V2G 模式	强约束 V2G 模式	弱约束 V2G 模式
2.0	186.23	191.60	204.40	38.30	20.08	0.95	0.94
2.6	218.23	203.60	204.40	38.30	20.08	1.07	1.00
3.0	234.23	211.60	204.40	38.30	20.08	1.15	1.04

但不会影响损耗费用;随着需求响应补偿电价增大,V2G 模式下车主的收益随着增大。在强约束条件下,当需求响应补偿电价为 2.0 元/(kW·h)时,车主的收益低于常规运营模式,车主可能不会选择进行放电;当需求响应补偿电价为 2.6 元/(kW·h)时,车主可能选择不参与或者以弱约束条件进行 V2G,因为弱约束条件下其收益约等于常规运营模式下的收益;当需求响应补偿电价为 3.0 元/(kW·h)时,无论是在强约束条件下还是弱约束条件下,车主都将获得多于常规运营模式的收益,且在强约束条件下的收益远高于常规运营收益,车主可能更愿意参与 V2G 削峰放电。上述结果表明需求响应补偿电价是影响电动出租车以 V2G 模式进行削峰放电的重要因素。

3.4 电动出租车参与削峰对负荷削减的效果

根据图 1 所示电动出租车的运营模式,以及成都出租车网发布的 2019 年出租汽车燃油消耗数据^[21],折算平均每小时行驶里程下单一车辆的电量变化曲线如图 2 所示。



图 2 电动出租车的电量变化曲线

Fig.2 Electricity change curves of electric taxis

当电动出租车的电池容量为 51.9 kW·h 时,匹配的放电功率为 20 kW,若要在中午用电高峰时段进行最大限度的电量调度,就必须限制车辆的行驶里程。由图 2 可知:V2G 模式下的 Team A 在 07:00 之后限制了行驶里程,相较于常规运营模式,其电量下降趋势有所减缓;11:00—13:00 时段为 Team A 车辆的放电时段。对于 V2G 模式下的 Team B 而言,其在被调度前的电量变化趋势与常规运营模式下车辆的变化趋势相同,在目标调度时刻 18:00 之前,需要先进行一定电量的充电,这样才能满足 18:00—19:00 时段的削峰调度电量需求。

当该区域电网有削峰需求时,通过对长期行驶

在该区域的电动出租车进行激励,在强约束条件下各调度 Team A 和 Team B 的 200 辆电动出租车为该区域某变电站(主接线图见附录 A 图 A3)提供削峰服务,在用电高峰时段削峰前、后的负荷对比如图 3 所示。

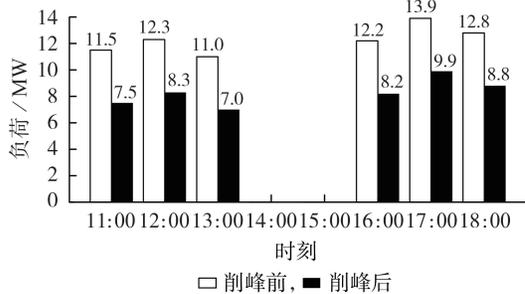


图3 电动出租车参与削峰前、后的负荷对比

Fig.3 Comparison of load between before and after participation of electric taxis in peak load shifting

由图 3 可知,通过在特定的时段调度一定量的电动出租车参与削峰可以对变电站负荷进行削减,进而缓解主变负荷压力。新能源汽车正在大力发展,特别是续航和充放电技术正逐步发展成熟,未来城市区域内的所有出租车可能全部采用电动出租车。由图 3 可以看出,随着电动出租车数量的增加,利用 V2G 技术参与电网削峰可提高电网运行的安全性。基于成都市现有出租车保有量进行估计,未来约有 10 000 辆电动出租车加入绿色出行,此时调度 25%~35% 的电动出租车以 V2G 模式参与削峰服务能够调节约 37 500~52 500 kW·h 的负荷,可以预见 EV 的发展以及 V2G 技术的成熟将对当地电力系统的安全稳定性起到一定的积极作用。

4 结论

本文对电动出租车参与削峰的潜在价值及车辆参与的可行性进行了分析,同时对成都地区出租车的行驶习惯数据进行分析,对电动出租车这类特殊集群以 V2G 模式与电网进行协同削峰进行了建模。通过仿真分析可得到如下结论:

1) 借助出租车的历史行驶轨迹与电网供电区域相耦合的关系,找到供电区域内最适合调用的电动出租车,为调用车辆以 V2G 模式参与削峰提供地理位置优势的前提条件;

2) 结合 V2G 技术和需求响应激励,能有效地刺激部分车辆进行 V2G 削峰,且以 V2G 模式参与削峰的电动出租车能获得额外的休息时间;

3) 随着电动出租车数量的增加,利用 V2G 技术对电网进行削峰能提高电网的安全稳定性。

综上所述,目前许多城市已经开启纯电绿色公共交通模式,随着 EV 购车成本的降低以及车载电池

容量的增大,V2G 削峰的可行性及其放电功率将逐渐增大,对电网削峰的效果也会更加明显。同时得益于车载电池容量的增加,电动出租车在参与 V2G 削峰后的剩余电量仍能满足后序的接单运营需求,其将不再进行电量补充,能获得更大的收益。借助于 V2G 技术进行削峰,不仅能增加电动出租车车主的收入并使其获得额外的休息时间,还能为电力系统提供削峰增量服务。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周天沛,孙伟. 基于微网的电动汽车与电网互动技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):98-104,117.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Electric vehicle-to-grid technology based on microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(3):98-104,117.
- [2] 周椿奇,向月,张新,等. V2G 辅助服务调节潜力与经济性分析:以上海地区为例[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):135-141.
ZHOU Chunqi, XIANG Yue, ZHANG Xin, et al. Potential regulation ability and economy analysis of auxiliary service by V2G: taking Shanghai area for an example[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(8):135-141.
- [3] 中国能源网. 华北将 V2G 充电桩资源正式纳入电力调峰辅助服务市场并结算[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-12-04]. http://www.cnenergy.org/cсны/202004/t20200423_762491.html.
- [4] 王毅,陈进,麻秀,等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):77-85.
WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(5):77-85.
- [5] 新华社. 新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)[EB/OL]. (2020-11-02)[2020-12-04]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/02/content_5556762.htm.
- [6] 项顶,宋永华,胡泽春,等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):15-25.
XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(31):15-25.
- [7] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):24-29.
ZHANG Zhenfu, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(2):24-29.
- [8] 张书盈,孙英云. 考虑分时电价和电池损耗的电动汽车集群 V2G 响应成本分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(11):39-46.
ZHANG Shuying, SUN Yingyun. Analysis for V2G response cost of EV aggregator considering time-of-use tariffs and battery wear[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017,29(11):39-46.
- [9] 张明锐,李路遥,杜志超,等. 考虑电动汽车能量管理的微网分布式电源选址定容[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):46-54.
ZHANG Mingrui, LI Luyao, DU Zhichao, et al. Microgrid DG siting and sizing with consideration of EV energy management[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(7):46-54.
- [10] 徐从启,高瑞林,贾桂芝,等. 考虑分时电价电动汽车负荷的微电网优化调度[J]. 电气工程学报,2017,12(11):12-20.
XU Congqi, GAO Ruilin, JIA Guizhi, et al. Scheduling of mi-

- cro-grid considering electrical vehicles of time-of-use tariffs [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(11): 12-20.
- [11] 曾博,白婧萌,张玉莹,等. 基于价值链分析的电动汽车充电商业运营模式综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 21-27, 34.
- ZENG Bo, BAI Jingmeng, ZHANG Yuying, et al. Comprehensive evaluation of commercial operation mode for electric vehicle charging based on value-chain analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 21-27, 34.
- [12] 张红,王晓明,过秀成,等. 出租车GPS轨迹大数据在智能交通中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(1): 109-114.
- ZHANG Hong, WANG Xiaoming, GUO Xiucheng, et al. Application of taxi GPS big trajectory data in intelligent traffic system[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(1): 109-114.
- [13] 韩雅雯. kmeans 聚类算法的改进及其在信息检索系统中的应用[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- HAN Yawen. Improvement of kmeans clustering algorithm and its application in information retrieval system[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [14] 太平洋汽车网. 广汽新能源交付1500辆传祺GE3纯电动出租车[EB/OL]. (2019-05-10)[2020-12-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1633143593051836323&wfr=spider&for=pc>.
- [15] 搜狐. 吉利速度: 吉利拿下成都电动出租车大单首批10000辆[EB/OL]. (2019-06-21)[2020-12-04]. https://www.sohu.com/a/322120909_115831.
- [16] 自然资源保护协会. 电动汽车与电网互动的商业前景——上海市需求响应试点案例[EB/OL]. [2020-12-04]. <http://www.nrde.cn/information/informationinfo?id=250&cook=2>.
- [17] 搜狐. 电动汽车剩多少电量比较合适?[EB/OL]. (2019-09-26)[2020-12-04]. https://www.sohu.com/a/343603534_99897765.
- [18] 陈丽娟,秦萌,顾少平,等. 计及电池损耗的电动公交车参与V2G的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.
- CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.
- [19] 交通运输局. 成都市中心城区巡游出租汽车区域融合改革方案发布中心城区“11+2”区域实行统一运价[EB/OL]. (2019-11-27)[2020-12-04]. <http://city.newssc.org/system/20191127/002806563.htm>.
- [20] 赶集网. 成都出租车司机工资分布图[EB/OL]. [2020-12-04]. http://cd.ganji.com/gz_zpczesiji/.
- [21] 成都出租车网. 2019年度出租汽车燃油消耗数据公示[EB/OL]. (2020-05-11)[2020-12-04]. <http://www.cdtaxi.cn/hynews/202005/9407.html>.
- [22] 四川省发改委. 四川电网2020—2022年输配电价和销售电价公布[EB/OL]. (2020-12-02)[2020-12-04]. <http://news.bjx.com.cn/html/20201202/1119562.shtml>.

作者简介:



任峰

任峰(1991—),男,四川西昌人,助理工程师,硕士研究生,主要研究方向为智能电网与电动汽车交互(E-mail: 563933951@qq.com);

向月(1987—),男,重庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为智能电网与电动汽车交互(E-mail: xiang@scu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

V2G coordinated strategy and benefit analysis of electric taxis to assist peak load shifting

REN Feng^{1,2}, XIANG Yue¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Xichang Electric Power Co., Ltd., Xichang 615000, China)

Abstract: With the large-scale growth of electric taxis, their influence on the power grid is increasing. In order to make full use of the coupling relationship between electric taxis' driving track and power supply area of power grid, strengthen the cooperation between electric taxis and power grid, and improve the safety and economy of power system operation, a V2G (Vehicle to Grid) coordinated strategy of electric taxis is proposed to assist peak load shifting during peak periods. Firstly, *K*-means algorithm is used to coupling the driving zone of electric taxis with the power supply area of power grid, so as to find the most suitable electric taxis for scheduling in the power supply area. Then, based on the demand response electricity price, the income model of electric taxis under the combined action of conventional operation mode and V2G mode is constructed. Finally, the income and response participation degree of electric taxi owners and the peak load shifting effect of electric taxis on the power grid in the driving zone are calculated. Simulative results based on Python show that compared with the original operation mode, under the combined action of the conventional operation mode and V2G mode, electric taxi owners can obtain better revenue and extra rest time, and also have better peak load shifting effect on power grid load in their active areas.

Key words: V2G; electric taxis; *K*-means algorithm; partition of driving zone; demand response; economic benefits; peak load shifting

附录 A

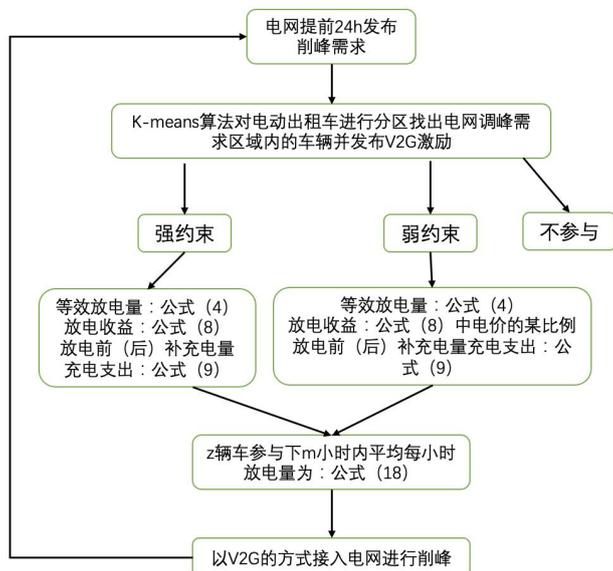


图 A1 电动出租车与电网协同进行削峰的流程图

Fig.A1 Flowchart of coordinated peak shaving by electric taxi and power grid

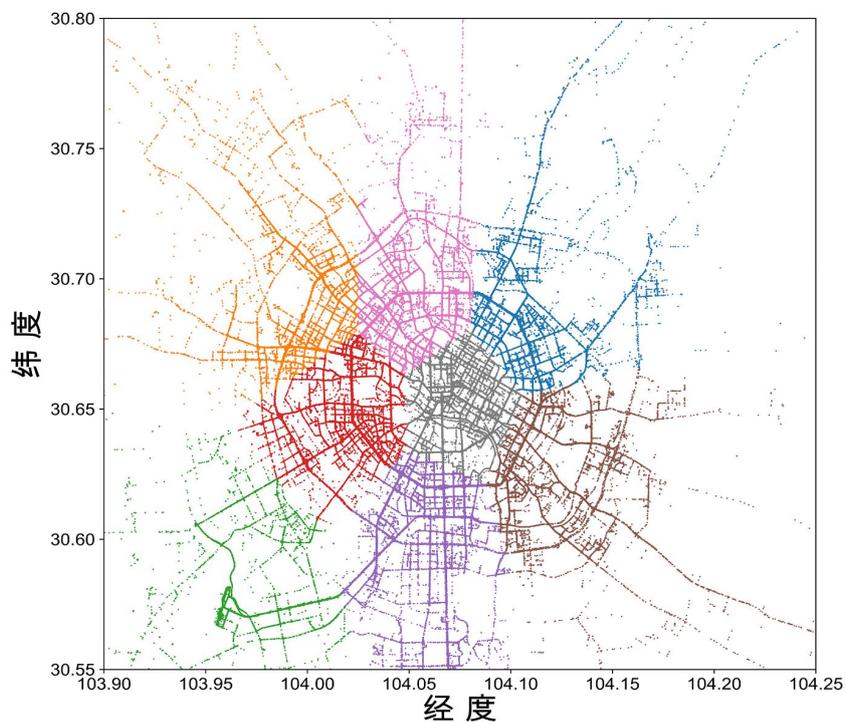


图 A2 出租车行驶轨迹聚类结果

Fig.A2 Clustering results of taxi trajectory

表 A1 电动出租车的参数

Table A1 Parameters of electric taxis

车型	官方指导价	官方续航里程	电池容量
吉利几何 A 标准续航版	15 万元/辆	458 km	51.9 kW·h

表 A2 某分区内部分车辆信息
Table A2 Information of part vehicles in a zone

车牌	经度/(°)	纬度/(°)	车牌	经度/(°)	纬度/(°)	车牌	经度/(°)	纬度/(°)
川 A-TA033	104.140943	30.632725	川 A-TA006	104.106	30.645435	川 A-TA007	104.108297	30.642264
	104.139142	30.635245		104.10504	30.645871		104.108284	30.642316
	104.138713	30.627752		104.103855	30.646431		104.108257	30.642292
	104.138436	30.63409		104.102683	30.646987		104.108243	30.642412
	104.137196	30.631396		104.101884	30.647358		104.108287	30.642322
	104.136827	30.629299		104.101194	30.647696		104.104935	30.634905
	104.13348	30.623693		104.100384	30.648059		104.106333	30.630691
	104.130212	30.618143		104.099354	30.648534		104.106763	30.637681
	104.123343	30.621989		104.098384	30.648965		104.108276	30.642269
	104.116248	30.621229		104.097314	30.64948		104.108274	30.64232
	104.108534	30.620967		104.096407	30.649904		104.108272	30.64232
	104.107045	30.638378		104.095559	30.649338		104.108234	30.64124
	104.10508	30.635068		104.09491	30.648183		104.108239	30.64222
	104.102302	30.623759		104.094269	30.64718		104.108212	30.642244
	104.099821	30.626782		104.093832	30.646479		104.108269	30.642234
	104.099311	30.626084		104.093575	30.646145		104.108265	30.642341
	104.098416	30.620759		104.093561	30.646153		104.108258	30.642651
	104.098229	30.621080		104.093338	30.645771		104.108229	30.642341
	104.098226	30.621064		104.092718	30.644778		104.108218	30.642271
	104.099821	30.632725		104.106000	30.645435		104.108297	30.642264
104.099311	30.635245	104.10504	30.645871	104.108284	30.642316			
104.098416	30.627752	104.103855	30.646431	104.108257	30.642292			
104.098229	30.634090	104.102683	30.646987	104.108243	30.642412			
104.098226	30.631396	104.101884	30.647358	104.108287	30.642322			

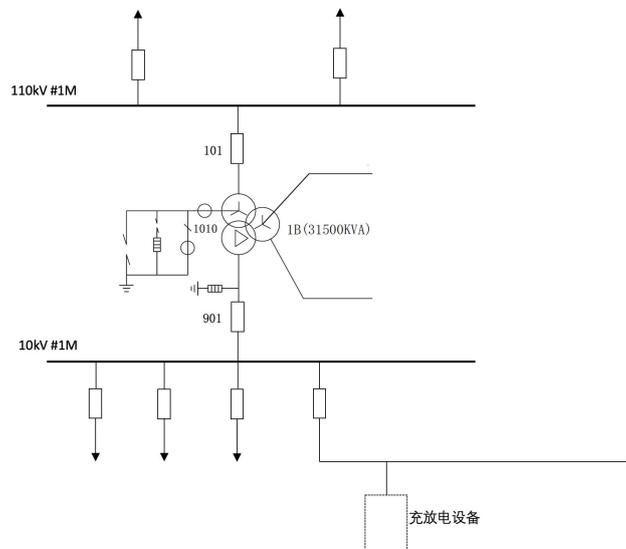


图 A3 变电站主接线图
Fig.A3 Main wiring diagram of substation