

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.246003

大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述

侯慧^{1,2}, 何梓姻^{1,2}, 侯婷婷³, 方仍存³, 杨天蒙⁴, 唐金锐^{1,2}, 石英^{1,2}

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518000; 3. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 4. 国家电网有限公司东北分部, 辽宁 沈阳 110180)

摘要: 大量电动汽车的接入为电网带来了新的挑战与机遇, 电动汽车作为具有负荷与储能双重属性的特殊灵活性资源, 车网互动过程中需要实施调度方案及需求响应策略对其进行引导。针对现有问题, 全面综述了相关研究。首先, 为综述电动汽车有序充放电模型, 基于用户出行习惯探讨了电动汽车聚类方法, 并得出了考虑特征变量聚类可有效提高聚类模型精确度的结论。其次, 梳理了现有的需求响应策略, 通过权衡协调各类需求响应策略, 能有效激发用户调度潜力。然后, 基于策略研究, 从数据与机理两类评估角度总结了如何提高需求响应评估精度。最后对未来研究做出展望: 未来电网侧可聚焦峰谷时段细化研究、聚合商侧可针对不同用户聚类建立更适宜的调度策略、未来仍需探寻多市场主体有效商业模式等。

关键词: 电动汽车; 车网互动; 用户出行习惯; 需求响应策略; 潜力评估

A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid

HOU Hui^{1,2}, HE Ziyin^{1,2}, HOU Tingting³, FANG Rengcun³, YANG Tianmeng⁴, TANG Jinrui^{1,2}, SHI Ying^{1,2}

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Shenzhen Research Institute, Wuhan University of Technology, Shenzhen 518000, China; 3. Economics and Technology Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 4. Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110180, China)

Abstract: Electric vehicles (EV) have brought new challenges and opportunities to the power grid. EV is a special flexible resource with both load and energy storage properties. It is imperative to implement scheduling schemes and demand response (DR) scheduling strategies in the interaction process of vehicle to grid. Given the existing problems, relevant research is reviewed comprehensively. First, to review the orderly charging and discharging model of EV, the clustering methods are discussed based on the user's travel habits, drawing the conclusion that it can effectively improve the accuracy of the model considering the characteristic variables clustering. Second, the existing DR strategies are reviewed. By balancing and coordinating various DR strategies, the scheduling potential of users can be effectively stimulated. Third, based on DR strategies, it summarizes how to improve the accuracy of DR evaluation from the perspectives of data and mechanism. Finally, future research is prospected: the power grid can focus on research on peak-valley period refinement, the aggregators should set up more appropriate strategies for different clusters, and the market players need effective business models in future.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177110).

Key words: electric vehicle; vehicle to grid; users' travel habits; demand response strategy; potential evaluation

0 引言

在“双碳”目标下, 建设清洁、低碳、高效的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177110); 深圳市科技计划项目资助(JCYJ20210324131409026); 国网湖北省电网公司项目资助(521538220005)

能源体系, 需要充分利用负荷侧灵活资源如虚拟储能、电动汽车等^[1-2]。研究表明, 电动汽车(electric vehicle, EV)相较于传统燃油汽车, 在能源利用效率和碳减排领域更具优越性, 且具有较强碳减排潜力^[3-4]。预计至2030年, 中国EV保有量将达到8300万辆^[5], 然而, 来自市场电价及负荷侧的多重不确定性加剧了电力系统的波动性及供需不平衡隐患,

亟需探索“双碳”目标下车网互动技术，以实现对用户充放电行为的引导与调度^[6]，提升电力系统运行稳定性，同时有效促进新能源消纳，优化电力资源分配。

在此背景下，本文综述了大规模车网互动的有序充放电模型、需求响应策略及潜力评估等方面研究。首先，总结 EV 有序充放电模型，从用户出行习惯出发，综述了现有研究中 EV 聚类方法。然后，梳理已有需求响应策略，包括考虑需求响应弹性系数与实时电价波动的价格型需求响应策略、考虑静态或动态激励的激励型需求响应策略及两者结合的混合型需求响应策略。在此基础上，从数据评估与机理评估两个角度总结了现有关于需求响应潜力评估研究。最后对未来研究进行了展望。

1 整体综述框架

本文整体综述框架如图 1 所示，首先从用户出行习惯与 EV 聚类方法两方面进行总结，以此作为需求响应策略制定基础。用户出行习惯包括但不限于出行时间、出行频率、出行距离等，对于需求响应策略的制定至关重要。通过对用户出行习惯进行分析，可以了解用户在不同时间段的用电需求，从而制定出更加精准的需求响应策略。同时，EV 的聚类方法也是制定需求响应策略的重要参考。通过

分析不同 EV 用电特性，对 EV 集群进行聚类，从而制定出更加符合实际情况的需求响应策略。

然后综述价格型、激励型与混合型需求响应策略。价格型需求响应策略主要通过调整电价引导用户调整用电行为，从而实现需求响应。激励型需求响应策略则是通过提供经济激励，如补贴、奖励等，鼓励用户参与需求响应。混合型需求响应策略则是将价格型和激励型策略相结合，综合运用多种手段来实现需求响应。

最后为评估需求响应潜力，总结了数据评估与机理评估两类典型评估方法。数据评估方法不关注被评估对象的内在响应机理，而是通过建立影响因素与需求响应潜力之间的映射模型来进行潜力评估，主要通过收集和分析历史数据，对数据质量要求较高。机理评估方法则是从被评估对象的响应特性、机理模型角度出发，通过构建机理模型建立需求响应潜力评估模型。机理评估方法不要求数据质量，但易出现误差。数据评估与机理评估方法对需求响应潜力进行评估，从而为制定出更精准、更有效的需求响应策略提供参照依据。这两种评估方法各有优劣，可以根据实际情况选择合适的评估方法。未来研究中也结合两类评估方法，通过数据-机理联合评估方法精准量化 EV 需求响应潜力。

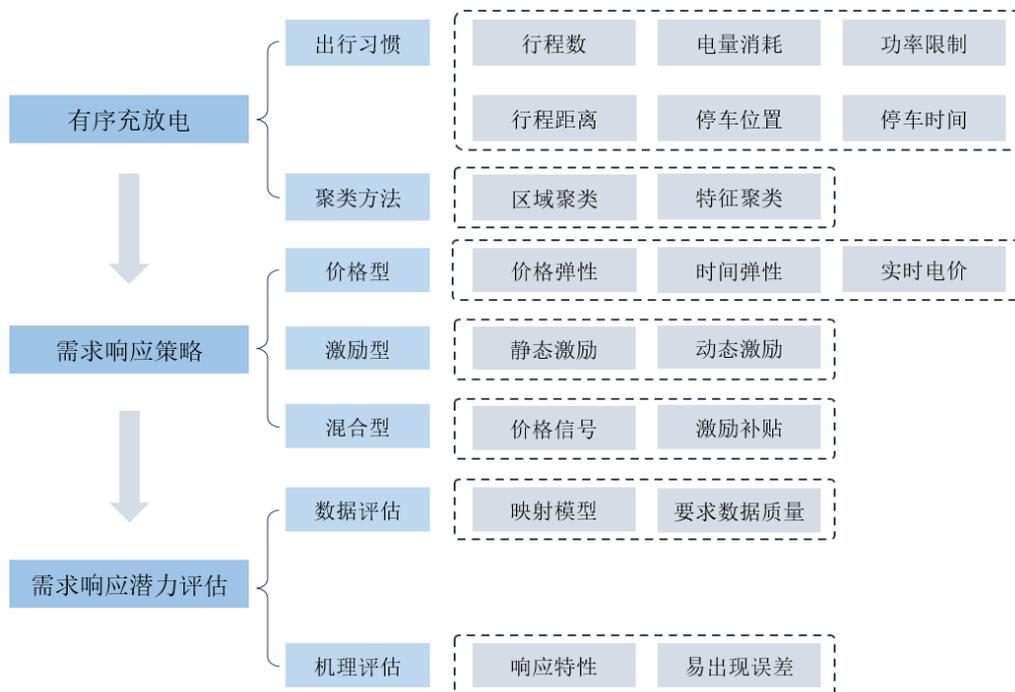


图 1 综述框架图

Fig. 1 Review framework

2 EV 有序充放电模型

2.1 用户出行习惯分析

EV 行为主要包括出行、停车与充放电活动等, 其充电需求很大程度上取决于行程数、行程距离、电量消耗及充电基础设施可用性(包括停车位置、允许最大充放电功率和预期停车时间等)。这些对于 EV 充放电负荷建模至关重要, 大多数研究基于用户行为分析 EV 用户充放电时空分布状态, 并对充放电负荷进行统计或预测。文献[7]考虑荷电状态及停放时间状态等参数, 综合电价因素, 构建了基于 EV 充电负荷时空预测模型。文献[8-9]根据北京市私家 EV 历史车联网数据, 针对 EV 充电不确定性, 引入出行链的概念, 将 EV 充电过程构建成整体, 考虑 EV 充电行为的多种潜在影响因素, 基于显著影响因素对出行链进行建模与预测。文献[10]为分析用户个体行为偏好, 建立用户出行-充电行为与城市时空特征关联模型, 实现了用户充电需求预测。文献[11]提出一种考虑 EV 充电需求时空分布特性的充电站规划方法, 以用户真实出行数据与道路交通数据为载体, 建立道路选择的双层模型模拟其出行过程, 更贴近用户的实际出行过程。在此基础上, 部分研究不仅仅局限于充电需求分析, 而是通过分析出行路径上的充电站电价及道路交通情况等, 构建道路简化及路径规划模型^[12-14], 实现实时 EV 最优路径规划。以上研究大多依托大数据技术, 分析车辆时空轨迹、手机基站信号、充电记录等, 对用户行为、充放电负荷进行预测与引导。

EV 充放电模型可进一步细化为时空状态、荷电状态及用户心理等特征模型, 基于以上特征量对 EV 聚类, 进而预测整体负荷情况。

2.2 EV 聚类方法

目前 EV 聚类方法主要包括两类, 即以自然分布区域聚类^[15-16]与以个体行为特征进行集群聚类^[17-18]。自然分布区域聚类方法相对简单, 文献[15]提出一种考虑天气与交通的负荷时空剖面聚类方法, 利用蒙特卡洛方法对时间序列数据采样并生成区域日充电负荷分布曲线。但该聚类方法较笼统, 更适于短时间尺度。文献[16]则着眼长时间尺度, 提出一种改进的 K 均值聚类算法, 直接将区域内车辆划分为不同聚类, 但区域聚类在分区边界模糊情况下划分结果准确度不高, 且不能有效表征用户实际需求对负荷状态影响。相较之下, 以个体行为特征进行集群聚类, 更能表征用户对负荷的影响程度。文献[17]根据实际调查数据, 从 EV 个体行为特征出发, 使用正态概率分布函数来描述集群充放电时间与行驶

距离, 以此进行集群聚类, 但用以量化个体行为状态的特征量相对较少, 划分精度有限。文献[18]采用改进模糊 C 均值聚类算法对不同出行链下 EV 时空特性进行聚类分析, 利用时间、出行状态及荷电状态等特征变量对出行链时空特征指标建模。以个体行为特征进行集群聚类主要基于 EV 出行习惯、充放电需求及荷电状态等特征变量进行聚类, 可有效提高聚类划分精度, 实现大规模 EV 合理分类, 从而更好地参与需求响应。

3 需求响应策略

现有关于制定车网互动需求响应策略研究多是从价格型与激励型两类单一型需求响应策略出发^[19]。价格型主要基于峰谷分时电价政策制定, 然后通过考虑不同需求弹性或设立浮动电价进行优化。激励型则更新颖宽泛, 为参与调度客户提供固定或时变激励, 可调度性更强, 激励手段包括但不限于分级服务、充电补贴等^[20]。

3.1 价格型需求响应策略

价格型需求响应策略主要基于峰谷分时电价政策制定, 以期实现峰-谷、峰-平等时段负荷转移, 缓解电网侧负荷压力, 同时为电网侧、聚合商侧以及 EV 用户侧都带来更大的便利与经济效益。

3.1.1 价格弹性系数

部分研究直接基于现有政策制定调度策略^[21-23], 大多则在此基础上考虑价格与时间两种需求弹性影响, 对既有策略进行优化以最大限度激发 EV 用户调度潜力。

在经济学理论中, 价格往往是影响消费者购买行为的主要因素。部分研究考虑电价对 EV 用户充电行为的影响, 以价格弹性系数 ε 表示电价变动引起电量需求量的相对变动^[24-26]。在价格弹性的引导下, 用户改变用电时段, 实现调峰作用。以 1 天为分析周期, 1 h 为分析时段, 当用户的充电电价发生改变时, 用户的充电行为不仅受到本时段的充电价格影响, 还受到其他时段的充电价格影响, 故分别使用自弹性系数 ε_{ii} 和互弹性系数 ε_{ij} 来表示电价的影响, 分别如式(1)和式(2)所示。

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta q_i / q_i}{\Delta \pi_i / \pi_i} \quad i = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta q_i / q_i}{\Delta \pi_j / \pi_j} \quad j = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中: q_i 、 π_i 分别为 i 时段负荷、电价基准值; π_j 为 j 时段电价基准值; T 为分析时段; Δq_i 、 $\Delta \pi_i$ 、 $\Delta \pi_j$

分别为负荷变化量、电价在 i 时段和 j 时段的变化量。

3.1.2 需求弹性系数

当聚合商采用固定收费价格时, 时间分布会影响充电行为^[27], 故可在不改变原有分时电价基础上, 对充电时段进行优化。即同时考虑时间弹性, 在原有价格弹性基础上, 考虑负荷需求削减、负荷需求转移等情况, 并对峰谷平时段重新划分, 在保证电网稳定运行的同时, 尽可能减少 EV 用户的充电成本。

多数研究计及聚类算法对峰谷平时段重新划分^[28-30], 文献[28]提出一种基于模糊聚类的最优周期划分迭代方法, 通过分析季度负荷数据划分时段, 每个月选取一个典型日, 将季度 3 个典型日负荷数据分组, 设定模糊判断依据, 计算每个时刻的峰值隶属度与相应的移动变量之间的最大相似度来确定时段划分边界。文献[31]充分捕捉了 EV 充电需求对充电价格及充电时段的弹性, 提出了一种需求弹性动态定价机制, 同样对区域内峰谷平时段重新划分, 使充电平台提供充电服务的长期利润最大化。文献[32]则提出一种最大化 EV 聚合商利润的充电站选址及定价方案, 在保证市场均衡前提下进行充电站选址规划, 引入了网络层面的用户需求弹性。重新划分时段方式可有效评估需求弹性, 但考虑到便利性与可持续性, 其时间尺度一般较长。

部分研究则同时考虑价格弹性与时间弹性, 将两类弹性有机组合, 以便更精准地评估需求弹性。引入需求弹性系数 $e^{[33]}$, 分别使用自需求弹性系数 e_{ii} 和混合弹性系数 e_{ij} 来表示电价的影响。其中, 自需求弹性表示负荷削减情况, 混合弹性表示负荷转移情况, 分别如式(3)和式(4)所示。

$$e_{ii} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta \pi_i / \pi_i} \quad (3)$$

$$e_{ij} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta \pi_j / \pi_j} \quad (4)$$

式中: P_i 为 i 时段负荷需求量; ΔP_i 为 i 时段负荷需求变化量。

3.1.3 实时电价

除了在分时电价基础上计及用户需求直接构造需求弹性系数, 聚合商也可根据区域用电特性在原有分时电价基础上设立实时更新的浮动电价, 即设立实时电价^[34-36]对 EV 充电进行调度。

实时电价同样考虑价格与时间的影响, 不同于构造需求弹性系数的形式, 实时电价直接针对不同时刻负荷制定不同用电价格, 用户依据电价将自身用电需求合理分配至不同时段。实时电价包括标准电价

与浮动电价两部分, 标准电价由发改委等相关部门制定, 浮动电价由配电网节点电压决定, 文献[35]以相对电压水平和绝对电压水平作为浮动电价的影响因子, 充电站 j 在 t 时刻的实时电价 $c_{j,t}$ 可表示为

$$c_{j,t} = c_0 + (ah_1 + bh_2)c_0 \quad (5)$$

式中: c_0 为标准电价; a 、 b 分别为相对电压水平与绝对电压水平权重因子; h_1 、 h_2 分别为相对电压水平与绝对电压水平。

目前关于价格型需求响应策略的研究基本是在既有分时电价基础上进行优化, 兼顾了电网侧及用户侧等多方利益。然而, 现有研究仍有局限性。一方面, 基于分时电价的优化模型往往假设用户对价格的敏感度是固定的, 忽略了用户个体差异性。另一方面, 现有研究较少考虑可再生能源的不确定性对价格型需求响应策略的影响。未来研究可以进一步探索如何在考虑这些因素的基础上优化价格型需求响应策略, 以实现电力系统可持续发展。

3.2 激励型需求响应策略

激励型需求响应策略通过制定激励经济补偿、服务等级分类与奖励机制等方式激励 EV 用户参与调度。这些激励方式各不相同, 从激励信号更新频率角度可以分为静态激励与动态激励^[37]。根据具体需求与调度情况, 可以采取不同激励方式引导 EV 用户参与调度^[38]。

3.2.1 静态激励

静态激励更新频率相对较低, 一般在较长时间尺度上进行调整^[39]。这种激励方式通常适用于长期调度计划, 例如制定月度或季度的激励计划。静态激励可以根据用户参与程度与贡献度确定相应经济补偿或奖励机制, 以鼓励用户在特定时间段提供或减少电力需求。静态激励的经济补偿大多直接以充电补贴^[40]形式实现, 文献[41]构建了支持 EV 参与辅助服务市场的双重激励机制, 主要以充电补贴的形式来完成对用户的激励。静态激励计划在较长时间内保持不变, 易于实施, EV 用户车主可以直观地将其视为安排充电计划的参考。

3.2.2 动态激励

动态激励可以根据实时负荷情况、新能源出力状态及市场价格等因素进行调整^[42]。通过频繁更新激励信号以响应短期市场与系统信息, 鼓励 EV 车主更积极地参与调度, 为电网提供柔性服务, 通常在较短时间尺度上进行调整, 适用于实时或近实时的电力调度需求。为了体现 EV 用户在不同时段参与系统削峰的差异性, 聚合商通常对 EV 用户进行服务等级分类, 并设定相应奖励机制。根据 EV 用户参与辅助服务的质量, 聚合商需要制定不同等级

的补偿价格。文献[43]根据 EV 用户在不同时段参与系统削峰的差异性设定了削峰补偿系数, 根据削峰补偿程度对用户进行分类。针对不同类别用户, 制定不同充电价格, 可以有效实现激励。文献[44]对于签订受控合约的用户, 通过评估各种合约方案的潜在价值后对用户类别进行划分, 给予差异性充电折扣费率。文献[28]在制定 EV 激励策略时, 考虑系统负荷情况与电价水平, 若 EV 用户在电网负荷波动较大时参与削峰, 则能提高经济效益。故引入削峰补偿系数 K , K 与削峰需求量系数 K_0 和 EV 用户参与度系数 K_{EV} 有关, 可表示为

$$\begin{cases} K = K_0 K_{EV} \\ K_{EVA} = \frac{P_n}{P_{av}} \zeta \\ K_{EV} = k_{EV} k_{EVb} \\ P_n = P_t - P_{av} \\ k_{EVb} = \frac{N}{N_0} \times 100\% \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$k_{EV} = \begin{cases} 1.100, 0 \leq k_{EVb} \leq 85\% \\ 1.205, 85\% < k_{EVb} \leq 100\% \end{cases}$$

式中: K_{EVA} 为聚合商对用户的激励系数; P_n 为系统负荷待削减量; P_{av} 为负荷平均削减量; P_t 为时段 t 负荷待削减量; ζ 为削峰需求量价格补偿系数; k_{EV} 为 EV 用户可调度潜力; k_{EVb} 为 EV 用户的参与度; N 为响应时段 t 的 EV 用户数量; N_0 为 EV 用户总数量。

相比于用户仅从峰谷电价差获取收益的方式, 参与削峰的策略不仅满足了系统自身削峰需求, 而且增大了 EV 用户获取收益的空间, 进而提高了 EV 用户参与调度积极性。但尽管动态激励更易于控制, 但与静态激励相比, 它们缺乏简单性和一致性, 为了做出最佳决策来最大化利益, EV 用户必须不断更新市场信息。

现有研究多直接以经济补贴方式实现激励^[45-48], 但考虑到长期回报, 需要对激励措施进行更长尺度、更深层次的考虑。未来的时间跨度越长, 可能会吸引到的用户越多, 因此设定激励措施时应充分考虑到这一点。现有研究关于激励型需求响应策略中具体激励手段见表 1。

针对激励价格而言, 聚合商需要考虑多种因素的影响合理制定^[46]。一方面, 用户是否同意参与调度取决于到达目标充电站所花费的时间、电量等成本以及聚合商给出的激励是否能使用户满意, 因此

表 1 激励手段

Table 1 Motivating measure

激励信号	静态激励	动态激励
激励形式	经济补偿	服务等级分类与奖励机制
直观性	强	一般
可控性	一般	强
长期回报价值	一般	强
评估依据	调度响应程度	削峰差异程度、调度潜在价值
参考文献	[40-41, 45-48]	[21, 28, 43-44]

在用户申报最终的响应意愿前, 聚合商需先为用户提供合适充电站地址及最佳行驶路线, 并给出基本激励价格引导用户选择是否参与。另一方面, 制定用户激励也应当考虑到不确定因素可能引起的用户实际响应情况差异, 并给予用户一定的自主选择权利, 以提升用户参与积极性。

目前大多研究都是直接以经济补贴形式实现激励, 若综合考虑路况、距离、成本与收益等因素对用户心理的影响, 设计更多针对特定类别用户的激励形式, 则能有效激发 EV 用户调度潜力。

3.3 混合型需求响应策略

混合型需求响应策略核心是利用市场机制引导用户改变传统充电习惯, 满足系统运行需求, 主要为价格型与激励型两种模式有机结合。

在实际中, 激励型需求响应策略参与者的用电行为会不可避免地受到电价影响。部分地区居民端也已存在居民峰谷电价机制^[49-50], 因此有必要将电价与激励机制相结合, 激发用户调度积极性。文献[51]考虑决策变量与参数不确定性, 提出一种基于价格的混合需求响应。文献[52]考虑了激励价格和电价对实际响应的影响, 从多个方面对住宅用户的需求响应潜力进行综合评估。文献[53]提出一种考虑用户响应特性的混合需求响应优化策略, 实现多响应场景兼容性与连续时段的耦合优化。文献[54]则提出一种考虑多方利益的混合需求响应优化策略, 将分时电价与激励补贴策略进行融合, 聚合商需要权衡两种响应策略所带来的影响。文献[55]提出了一种考虑多方主体的混合需求响应机制, 包括电网侧、聚合商侧与 EV 用户侧。与传统的基于价格或基于激励的方法不同, 这种混合机制将实时定价与实时激励相结合, 能实现电网向聚合商提供激励, 同时聚合商也能设定最优实时价格供用户选择。

目前大多研究基于价格信号展开, 因为激励补贴程度难以把控, 在保证电网侧、聚合商侧及用户侧经济效益的同时激发用户调度潜力是项具有挑战

性的研究。用户调度潜力是需求响应策略实施过程中重要的影响因素，前文提及激励型需求响应可调度性较价格型需求响应更强，即相对更能激发用户调度潜力。通过权衡混合型需求响应策略的具体激励程度，能最大限度激发用户调度潜力，为参与电力市场主体提供决策参考，实现多方利益最大化。

4 需求响应潜力评估

聚合商通常需要对规模化 EV 接入相应充电桩后充放电行为进行整合控制，在此过程中 EV 调度潜力被定义为需求响应潜力^[56]，需求响应潜力评估结果通常可用于电力市场交易决策中，以降低决策风险^[57]。常见评估方法分为数据评估与机理评估两类。

4.1 数据评估

数据评估方法不关注被评估对象的内在响应机理，而是通过建立影响因素与需求响应潜力之间的映射模型来进行潜力评估。文献[58]根据全国家庭出行调查，提出一种基于主要活动事件的 EV 需求响应潜力评估方法，统筹兼顾 EV 时空分布特性。文献[59]提出基于闵可夫斯基求和与数据驱动的需求潜力计算方法，通过叠加单个 EV 决策空间对集群进行建模。文献[60]基于三角隶属度函数量化 EV 与空调集群需求响应潜力。文献[61]基于 EV 电池安全电量、EV 充电需求、充电桩额定功率等限制建立用户客观响应能力约束模型，结合客观响应能力与主观响应意愿建立用户响应潜力评估模型。

然而这些数据评估模型多属于黑箱式模型，即通过映射模型评估需求响应潜力，对数据质量要求较高，需要大量数据支撑以保证评估精确性。

4.2 机理评估

机理评估方法从被评估对象的响应特性、机理模型角度出发，建立需求响应潜力评估模型。

目前典型机理驱动的需求响应潜力评估方法是需求弹性系数法，即 3.1.2 节中相关内容。文献[62]提出了一种基于粒子群优化的考虑需求弹性响应的电动汽车充放电两阶段优化策略，以临界值评估响应潜力。文献[63]采用需求价格弹性系数法评估了某配电台区的需求响应潜力，并探究了激励大小与需求响应潜力之间的关系。文献[64]基于价格需求响应策略对某区域电网在不同电力市场情景下的需求响应潜力进行评估。文献[65]基于需求价格弹性系数法建立了在分时电价场景下居民用户需求响应潜力评估模型。文献[66]基于分位数回归和带有惩罚的 B 样条算法提出了概率价格弹性模型，并利用居民和工业用户数据进行验证。在经济学理论中，价格是影响消费者的主要因素，故大多研究考虑价

格与时间两种需求弹性影响，旨在最大限度还原需求响应潜力评估过程内在联系。

机理评估可应用于所有类型用户，但评估结果过于依赖弹性系数，且并没有考虑实际负荷特性约束，可能会引起较大的评估误差。

4.3 需求响应潜力评估方法

本文检索近三年国内外文献中有关 EV 需求响应潜力评估文献，选取典型文献分析 EV 聚类及需求响应潜力评估方法见表 2。

表 2 EV 聚类及需求响应潜力评估方法
Table 2 EV clustering and demand response potential evaluation method

文献	聚类方法	特征指标	评估方法
[60]	区域网聚类	起始荷电状态、激励价格	数据评估
[67]	区域网聚类	出行特征参数、电量特征参数、时间特征参数	机理评估
[68]	区域网聚类	响应时间、SOC 指标、激励价格、调度时间尺度	数据评估
[69]	K-means 聚类	价格弹性、时间偏好弹性、时间差距弹性	机理评估
[70]	K-means 聚类	电价敏感度、用户电量焦虑度、起始荷电状态、补偿电价	机理评估
[71]	密度空间聚类和改进的自组织映射聚类组合的双层聚类方法	可充电容量、可充电功率、可放容量、可放电功率	数据评估
[72]	K-means 聚类	节点电压合格率、节点电压平均偏差值、安全载流线合格率、负载率、EV 客观响应率、用户总体响应意愿	机理评估

综上，数据评估对数据质量要求较高，机理评估模型较为复杂，评估误差相对较大。未来研究中可结合两者模型，通过数据-机理联合评估方法精准量化 EV 需求响应潜力，为 EV 大规模接入后聚合商等主体参与电力市场提供决策参考。

5 结论与展望

本文综述了大规模车网互动需求响应策略及需求响应潜力评估等方面的研究。针对电力市场主体多元化发展趋势，有必要厘清多种需求响应策略协调统一的可能性，提高需求响应潜力评估精确性，合理提升用户侧响应潜力并实现电网侧和聚合商侧的效益最大化。未来对于这方面的研究还可关注以下几个问题：

- 1) 针对电网侧，应完善日前与实时市场优化流

程,根据区域电网负荷水平及当地EV用户出行习惯划分更细致的峰谷时段,并缩短实时电价更新周期以保证车网互动相关市场主体获得最大效益;

2)针对聚合商侧,制定需求响应策略时,应考虑不同性质的充电周期与季节、天气等情况对分流充电政策的影响,根据诸多方面的差异性对用户进行详细分类,针对不同用户类别建立更适宜的调度策略;

3)针对用户侧,需加强用户心理影响权重,结合当地电价和用户个人需求,以最大化用户需求响应潜力;

4)针对电力市场,EV作为灵活分布式储能,同样具备提供辅助服务的潜力,可以创造额外市场效益,大规模EV参与能源市场与辅助服务市场研究更需要有效需求响应潜力评估方法与商业运营模式,电网侧与聚合商侧才能更针对性地进行市场决策。

参考文献

- [1] 郭明星,吕冉,费斐,等.考虑电动汽车和需求响应的电-热-水多能耦合系统经济调度[J].中国电力,2022,55(12):105-111.
GUO Mingxing, LÜ Ran, FEI Fei, et al. Economic scheduling of electric-heat-water multi-energy coupling systems considering electric vehicles and demand response[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 105-111.
- [2] 陶梦林,王致杰,付晓琳,等.基于区块链的电动汽车充电桩共享平台策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):143-151.
TAO Menglin, WANG Zhijie, FU Xiaolin, et al. Research on sharing platform of EV charging piles based on block chain[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 143-151.
- [3] 于霄宇,纪正森,嵇灵,等.双碳目标下我国电动汽车碳减排贡献潜力分析[J].智慧电力,2024,52(2):25-31,39.
YU Xiaoyu, JI Zhengsen, JI Ling, et al. Analysis on carbon emission reduction potential of electric vehicles in China under goal of carbon neutrality and carbon peaking[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 25-31, 39.
- [4] 蒋玮,单沫文,邓一帆,等.虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市场的优化调度策略[J].电力工程技术,2023,42(4):13-22,240.
JIANG Wei, SHAN Mowen, DENG Yifan, et al. Optimization strategy for aggregating electric vehicles through VPP to participate in the carbon market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 13-22, 240.
- [5] 新华网.我国新能源汽车保有量达1620万辆[EB/OL].(2023-07-08).http://www.news.cn/2023-07/08/c_1129738879.htm.
- Xinhuanet. China has 16.2 million renewable energy vehicles[EB/OL].(2023-07-08).http://www.news.cn/2023-07/08/c_1129738879.htm.
- [6] 叶宇剑,袁泉,汤奕.面向双碳目标的交通网-电网耦合网络中电动汽车负荷低碳优化方法[J].中国电力,2023,56(5):72-79.
YE Yujian, YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle charging demand low carbon optimization in traffic-grid coupling networks towards "dual carbon" goal[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 72-79.
- [7] 李含玉,杜兆斌,陈丽丹,等.基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J].电力系统自动化,2019,43(21):88-96.
LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 88-96.
- [8] 于海洋,张路,任毅龙.基于出行链的电动汽车充电行为影响因素分析[J].北京航空航天大学学报,2019,45(9):1732-1740.
YU Haiyang, ZHANG Lu, REN Yilong. Influential factors analysis of electric vehicle charging behavior based on trip chain[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1732-1740.
- [9] 王宜立,张蓉馨,杨再鹤,等.基于双向出行链的电动汽车平抑电网波动策略[J].电力工程技术,2023,42(4):50-60.
WANG Yili, ZHANG Rongxin, YANG Zaihe, et al. Stabilizing power fluctuation strategy based on two-way travel chain of electric vehicle[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 50-60.
- [10] 盛裕杰,郭庆来,刘梦洁,等.多源数据融合的用户充电行为分析与充电设施规划实践[J].电力系统自动化,2022,46(12):151-162.
SHENG Yujie, GUO Qinglai, LIU Mengjie, et al. User charging behavior analysis and charging facility planning practice based on multi-source data fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 151-162.
- [11] 张美霞,徐立成,杨秀,等.基于电动汽车充电需求时空分布特性的充电站规划研究[J].电网技术,2022,27(4):1-14.
ZHANG Meixia, XU Licheng, YANG Xiu, et al. Planning of charging stations based on spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicle charging demand[J]. Power System Technology, 2022, 27(4): 1-14.
- [12] 林卉,周一辰,李永刚,等.基于电动汽车两阶段充电站分配的聚合商定价方法[J].电力系统保护与控制,

- 2023, 51(21): 44-56.
- LIN Hui, ZHOU Yichen, LI Yonggang, et al. Aggregator pricing methodology based on two-stage charging station allocation for electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 44-56.
- [13] DIAZ-CACHINERO P, MUÑOZ-HERNANDEZ J I, CONTRERAS J. Integrated operational planning model, considering optimal delivery routing, incentives and electric vehicle aggregated demand management[J]. *Applied Energy*, 2021, 304: 117698.
- [14] 张美霞, 张倩倩, 杨秀, 等. 基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 51-63.
- ZHANG Meixia, ZHANG Qianqian, YANG Xiu, et al. Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 51-63.
- [15] YAN J, ZHANG J, LIU Y, et al. EV charging load simulation and forecasting considering traffic jam and weather to support the integration of renewables and EVs[J]. *Renewable Energy*, 2020, 159: 623-641.
- [16] REZAEIMOZAFAR M, ESKANDARI M, SAVKIN A. A self-optimizing scheduling model for large-scale EV fleets in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(12): 8177-8188.
- [17] VENEGAS F G, PETIT M, PEREZ Y. Active integration of electric vehicles into distribution grids: barriers and frameworks for flexibility services[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 145: 111060.
- [18] 金永天, 谢俊, 周翠玉, 等. 基于 IFCM 算法的电动汽车群聚合调峰方法[J/OL]. *高电压技术*: 1-12[2023-12-18]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230320>.
- JIN Yongtian, XIE Jun, ZHOU Cuiyu, et al. A peak-regulating method of aggregating electric vehicle groups based on improved FCM algorithm[J/OL]. *High Voltage Engineering*: 1-12[2023-12-18]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230320>.
- [19] 范晋衡, 刘琦颖, 曲大鹏, 等. 考虑 EV 用户响应特性的激励型 DR 的削峰效果和各方需求分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(6): 138-149.
- FAN Jinheng, LIU Qiying, QU Dapeng, et al. Analysis on peak shaving effect and needs of all parties based on incentive demand response considering response characteristics of EV users[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(6): 138-149.
- [20] 代贤忠, 韩新阳, 靳晓凌. 需求响应参与电力平衡的成本效益评估方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(10): 170-177.
- DAI Xianzhong, HAN Xinyang, JIN Xiaoling. Cost-benefit assessment method for demand response participating in power balance[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 170-177.
- [21] 刘东奇, 张曦, 钱奕衡. 电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 84-93.
- LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng. Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 84-93.
- [22] SHARMA S, JAIN P. Integrated TOU price-based demand response and dynamic grid-to-vehicle charge scheduling of electric vehicle aggregator to support grid stability[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(1): 12160.
- [23] HUANG Z, FANG B, DENG J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55.
- [24] 高原, 杨贺钧, 郭凯军, 等. 考虑负荷季节特性的电价型需求响应最优定价策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(1): 55-63.
- GAO Yuan, YANG Hejun, GUO Kaijun, et al. Optimal pricing strategy of electricity price demand response considering seasonal characteristics of load[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(1): 55-63.
- [25] 欧名勇, 陈仲伟, 谭玉东, 等. 基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(5): 54-59.
- OU Mingyong, CHEN Zhongwei, TAN Yudong, et al. Optimization of electric vehicle charging load based on peak-to-valley time-of-use electricity price[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(5): 54-59.
- [26] 阎怀东, 马汝祥, 柳志航, 等. 计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 71-80.
- YAN Huaidong, MA Ruxiang, LIU Zhihang, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch of electric vehicle charging station considering demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 71-80.
- [27] SONG Y, SHANGGAUN L, LI G. Simulation analysis of flexible concession period contracts in electric vehicle charging infrastructure public-private-partnership (EVCI-PPP) projects based on time-of-use (TOU) charging price strategy[J]. *Energy*, 2021, 22(8): 120-128.
- [28] 罗建竹, 苏春. 基于用户行为和分时电价的充电定价策略优化[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 1109-1116.

- LUO Jianzhu, SU Chun. Optimization of charging pricing strategy based on user behavior and time-of-use tariffs[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6): 1109-1116.
- [29] 王杰, 唐菁敏, 刘思淼. 基于用户响应度的电动汽车有序充放电策略[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 31-36.
- WANG Jie, TANG Jingmin, LIU Simiao. Orderly charging and discharging strategy of electric vehicles based on user responsiveness[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(1): 31-36.
- [30] YANG H, ZHANG X, MA Y. Critical peak rebate strategy and application to demand response[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 357-370.
- [31] FAN G, YANG Z, JIN H, et al. Enabling optimal control under demand elasticity for electric vehicle charging systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 21(3): 955-970.
- [32] HUANG Y, KOCKELMAN K M. Electric vehicle charging station locations: elastic demand, station congestion, and network equilibrium[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 78: 102179.
- [33] 贡韞韵, 董海鹰, 马志程, 等. 考虑需求响应与光热电站参与的多源系统优化经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 140-149.
- YUN Yunyun, DONG Haiying, MA Zhicheng, et al. Optimization economic dispatch of a multi-source system considering the participation of demand response and concentrating solar power plant[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 140-149.
- [34] ALJOHANI T M, EBRAHIM A F, MOHAMMED O A. Dynamic real-time pricing mechanism for electric vehicles charging considering optimal microgrids energy management system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 5372-5381.
- [35] 吴芮, 周良松, 姚占东. 基于实时电价的电动汽车智能充电导航[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 131-138, 146.
- WU Rui, ZHOU Liangsong, YAO Zhandong. Intelligent charging navigation for electric vehicles based on real-time electricity price[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 131-138, 146.
- [36] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.
- CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [37] WANG H, JIA Y, SHI M, et al. A hybrid incentive program for managing electric vehicle charging flexibility[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(1): 476-488.
- [38] 黄莉, 周赣, 张娅楠, 等. 考虑贡献度的聚合商需求响应精准评估与动态激励决策[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 21-29.
- HUANG Li, ZHOU Gan, ZHANG Yanan, et al. Accurate evaluation and dynamic incentive decision of aggregators' demand response considering contribution degree[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 21-29.
- [39] CHEN R, FAN R, WANG D, et al. Effects of multiple incentives on electric vehicle charging infrastructure deployment in China: an evolutionary analysis in complex network[J]. Energy, 2023, 264: 125747.
- [40] 王俊杰, 贾雨龙, 米增强, 等. 基于双重激励机制的电动汽车备用服务策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 68-76.
- WANG Junjie, JIA Yulong, MI Zengqiang, et al. Reserve service strategy of electric vehicles based on double-incentive mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 68-76.
- [41] 常方宇, 黄梅, 张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2609-2615.
- CHANG Fangyu, HUANG Mei, ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2609-2615.
- [42] YANG H, XU Y, GUO Q. Dynamic incentive pricing on charging stations for real-time congestion management in distribution network: an adaptive model-based safe deep reinforcement learning method[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 15(2): 1100-1113.
- [43] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.
- WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.
- [44] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- [45] LU R, HONG S H. Incentive-based demand response for

- smart grid with reinforcement learning and deep neural network[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 937-949.
- [46] VUELVAS J, RUIZ F, GRUOSSO G. Limiting gaming opportunities on incentive-based demand response programs[J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 668-681.
- [47] YU M, HONG S H, DING Y, et al. An incentive-based demand response (DR) model considering composited DR resources[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 66(2): 1488-1498.
- [48] 朱兰, 王坤, 唐陇军, 等. 考虑道路交通模型的电动汽车聚合商短时调度策略和响应激励设计[J]. *电网技术*, 2022, 46(7): 2699-2712.
- ZHU Lan, WANG Kun, TANG Longjun, et al. Electric vehicle aggregator dispatch strategy and response incentive mechanism based on road traffic model[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(7): 2699-2712.
- [49] 重庆市人民政府网. 重庆市发展和改革委员会关于建立重庆市居民分时电价机制有关情况的通告[EB/OL]. [2023-05-15]. https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202305/t20230516_11967786.html.
- Chongqing Municipal People's Government Network. Circular of Chongqing Development and Reform Commission on the establishment of time-of-use tariff mechanism for residents in Chongqing[EB/OL]. [2023-05-15]. https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202305/t20230516_11967786.html.
- [50] 山东省人民政府. 山东省发展和改革委员会关于完善居民分时电价政策的通知[EB/OL]. [2022-03-17]. http://www.zzctp.gov.cn/zwgk/xxgkml/qzbm/jjfzj/202203/t20220317_1404605.html.
- Shandong Provincial People's Government. Shandong Provincial Development and Reform Commission on improving the policy of residential time-of-use electricity price[EB/OL]. [2022-03-17]. http://www.zzctp.gov.cn/zwgk/xxgkml/qzbm/jjfzj/202203/t20220317_1404605.html.
- [51] MONFARED H J, GHASEMI A, LONI A, et al. A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid[J]. *Energy*, 2019, 185: 274-285.
- [52] WANG T, WANG J, ZHAO Y, et al. Multi-objective residential load dispatch based on comprehensive demand response potential and multi-dimensional user comfort[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 220: 109331.
- [53] 孙毅, 胡亚杰, 郑顺林, 等. 考虑用户响应特性的综合需求响应优化激励策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1402-1413.
- SUN Yi, HU Yajie, ZHENG Shunlin, et al. Integrated demand response optimization incentive strategy considering users' response characteristics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1402-1413.
- [54] 洪奕. 电动汽车用电数据挖掘及需求响应策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- HONG Yi. Research on electric vehicle charging data mining and demand response strategy[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [55] XU B, WANG J, GUO M, et al. A hybrid demand response mechanism based on real-time incentive and real-time pricing[J]. *Energy*, 2021, 231: 120-140.
- [56] 谭鸣骢, 王玲玲, 蒋传文, 等. 考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型[J]. *中国电力*, 2022, 55(10): 32-44.
- TAN Mingcong, WANG Lingling, JIANG Chuanwen, et al. Bi-level optimization model of demand response considering regulation potential of load aggregator[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 32-44.
- [57] 张亚朋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 94-103.
- ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 94-103.
- [58] 钱甜甜, 李亚平, 郭晓蕊, 等. 基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(23): 127-134.
- QIAN Tiantian, LI Yaping, GUO Xiaorui, et al. Calculation of electric vehicle charging power and evaluation of demand response potential based on spatial and temporal activity model[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(23): 127-134.
- [59] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁, 等. 考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(10): 86-96.
- ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining, et al. Two-stage market bidding strategy of charging station considering schedulable potential capacity of electric vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(10): 86-96.
- [60] 胡志勇, 郭雪丽, 王爽, 等. 考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 109-119.
- HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 109-119.
- [61] 周星月, 黄向敏, 张勇军, 等. 基于需求响应潜力模糊评估的电动汽车实时调控优化模型[J]. *电力自动化设*

- 备, 2022, 42(10): 30-37.
ZHOU Xingyue, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, et al. Real-time scheduling and optimization model of electric vehicles based on fuzzy evaluation of demand response potential[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 30-37.
- [62] ZHANG L, SUN C, CAI G, et al. Charging and discharging optimization strategy for electric vehicles considering elasticity demand response[J]. Etransportation, 2023, 18: 100262.
- [63] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Practical demand response potential evaluation of air-conditioning loads for aggregated customers[J]. Energy Reports, 2020, 6: 71-81.
- [64] 李亚平, 王珂, 郭晓蕊, 等. 基于多场景评估的区域电网需求响应潜力[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 1-7.
LI Yaping, WANG Ke, GUO Xiaorui, et al. Demand response potential based on multi-scenarios assessment in regional power system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 1-7.
- [65] 王媛, 周明. 居民用户对分时电价的响应潜力评价方法[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 48-54.
WANG Yuan, ZHOU Ming. Demand response potential evaluation method of time-of-use price for residential community[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 48-54.
- [66] BLOMGREN E M V, EBRAHIMY R, POURMOUSAVI KANI A, et al. Behind-the-meter energy flexibility modelling for aggregator operation with a focus on uncertainty[C] // 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), October 18-21, 2021, Espoo, Finland: 1-6.
- [67] 邓润琦, 向月, 黄媛, 等. 交通-配电网耦合下电动汽车集群可控裕度及优化运行策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4328-4337.
DENG Runqi, XIANG Yue, HUANG Yuan, et al. Dispatchable margin and optimal operation strategy of electric vehicle clusters in coupled transportation-distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4328-4337.
- [68] XU X, LI K, WANG F, et al. Evaluating multi-time scale response capability of EV aggregator considering users' willingness[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3366-3376.
- [69] ZHANG X, LIAO C, CHEN X, et al. Analysis of smart grid optimal scheduling considering the demand response of different EV owners[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2023.
- [70] 潘玲玲, 庄卫金, 赵奇, 等. 基于 MF-LSTM 的城市电动汽车集中充电负荷可调潜力评估[J]. 电气传动, 2023, 53(8): 59-69.
PAN Lingling, ZHUANG Weijin, ZHAO Qi, et al. Evaluation of adjustable potential of urban electric vehicle centralized charging load based on MF-LSTM[J]. Electric Drive, 2023, 53(8): 59-69.
- [71] 王杨洋, 茆美琴, 杨铖, 等. 面向多场景辅助服务的大规模电动汽车聚合可调度容量建模[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 103-115.
WANG Yangyang, MAO Meiqin, YANG Cheng, et al. Aggregated and schedulable capacity modeling of large-scale electric vehicles for multi-scenario auxiliary services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 103-115.
- [72] 梁艳, 郭立, 张丹, 等. 考虑主客观响应能力的电动汽车聚合潜力评估[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 1-10.
LIANG Yan, GUO Li, ZHANG Dan, et al. Evaluation on the convergence potential of electric vehicles considering their subjective and objective responsiveness[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 1-10.

收稿日期: 2023-08-19; 修回日期: 2024-03-22

作者简介:

侯 慧(1981—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统风险评估、能源互联网、电动汽车与电网互动等; E-mail: husthou@126.com

何梓姻(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动。E-mail: heziyin@whut.edu.cn

(编辑 张颖)