

DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 09. 001

考虑主客观响应能力的电动汽车聚合潜力评估

Evaluation on the convergence potential of electric vehicles considering their
subjective and objective responsiveness

梁艳¹, 郭立¹, 张丹¹, 刘智琦¹, 胡郁彬², 周霞^{3*}, 魏聪³, 单宇³
LIANG Yan¹, GUO Li¹, ZHANG Dan¹, LIU Zhiqi¹, HU Yubin²,
ZHOU Xia^{3*}, WEI Cong³, SHAN Yu³

(1. 国网乌鲁木齐供电公司, 乌鲁木齐 830011; 2. 国电南瑞科技股份有限公司 电网安全稳定控制技术分公司, 南京 211106; 3. 南京邮电大学 自动化学院 人工智能学院, 南京 210023)
(1.State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830011, China; 2.State Grid Nanrui Technology Company Limited Power Grid Safety and Stability Control Technology Branch, Nanjing 211106, China;
3.College of Automation/College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

摘要: 随着电动汽车(EV)负荷大规模接入电网,配电网的规划与运营迎来了新的挑战。研究电动汽车负荷充放电有序控制及统一调度,以实现规模化EV辅助配电网削峰填谷有重要的现实意义。首先,针对目前EV大量接入所引起的配电网超载问题,从电网侧和用户侧两方面出发,提出一种考虑主客观响应能力的EV聚合潜力评估方法;接着,结合 k -means聚类算法与轮廓系数法对EV进行分类,在保证EV运行流动性的前提下,提升大规模EV接入时模型的求解效率;最后,运用层次分析法与熵权法结合的综合赋权法得到权重集,采用秩和比综合评价方法得到EV需求响应聚合潜力评估结果。仿真结果验证了所提评估方法的有效性与优越性,为EV统一调度提供了新思路,对保障电网安全稳定运行具有工程实用价值。

关键词: 电动汽车; 电网; 削峰填谷; 需求侧响应; 量化评估; 聚类算法; 层次分析法; 熵权法; 秩和比综合评价方法
中图分类号: TK 01⁹; TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2023)09-0001-10

Abstract: Planning and operation of distribution networks become increasingly challenging with the large-scale grid connection of electric vehicles (EVs). Studying the orderly control and unified scheduling of EV charging and discharging can facilitate peak load regulation assisted by the load of substantial EVs. In response to the distribution network overload caused by the extensive grid-connection of EVs, a potential evaluation method for electric vehicle aggregation considering subjective and objective response capabilities of the grid side and the user side is proposed. Then, EVs are classified by the k -means clustering algorithm and contour coefficient method, which improves the efficiency of the model solving when massive EVs are connected to the grid under the premise of sufficient operational fluidity of EVs. Finally, the weight set is obtained by the comprehensive weighting method combining the analytic hierarchy process and entropy weight method, and the aggregation potential evaluation result of electric vehicle demand response is obtained by the rank-sum ratio(RSR) comprehensive evaluation method. The simulation results validate the effectiveness and superiority of the proposed evaluation method, providing a new approach for the unified scheduling of EVs, and having engineering value for ensuring the safe and stable operation of the power grid.

Keywords: electric vehicle; power grid; peak load shaving; demand side response; quantitative evaluation; clustering algorithm; analytic hierarchy process; entropy weight method ;RSR comprehensive evaluation method

0 引言

随着智能电网建设的推进以及需求响应、能效

管理等技术的发展与应用,商业中央空调、电动汽车(Electric Vehicle, EV)、分布式储能等可中断、可调节的用户侧多元负荷快速增长并形成了新的可调度资源。其中,EV负荷由于其优秀的环保性、负载可调等特点,在节能、减排、需求响应等领域展现出巨大的优势而受到广泛重视^[1-2]。EV负荷的实时

基金项目:国家自然科学基金项目(61933005)
National Natural Science Foundation of China(61933005)

控制是解决大规模 EV 接入引起配电网严重超负荷问题的重要途径之一。在满足电网需求的前提下,如何降低对 EV 负荷的调度次数,提高调度效率,降低调度成本,对进一步开展 EV 发展规划有着重要意义^[3-4]。

国内外学者针对大规模 EV 可调度潜力难以量化的问题,在 EV 负荷聚合潜力评估方面展开了一定研究。文献[5-6]在 EV 入网(Vehicle to Grid, V2G)框架下建立了集群 EV 分时电价下的有序化充电模型,为规模化 EV 参与电网有功控制提供了技术基础。为进一步量化 EV 对电网的有功备用量,文献[7]提出了“可调度能力”的概念,考虑 EV 自身的电池损耗、可放电能力和用户的信用度等因素,建立了 EV 的用户侧可调度能力评价体系。在此基础上,文献[8]提出了一种快速充电桩需求响应潜力的模糊评价和实时调控优化模型。上述 2 种评估方法仅从车辆和用户行为特性出发,未考虑电网侧需求,在基本负荷的差异以及适应性方面稍有欠缺。此外,价格激励限制对 EV 充电行为的指导作用有限,因此,有必要将激励限制与充放电限制相结合,以实现 EV 充放电行为的优化,从而提升潜力评估的合理性。

目前,针对集群 EV 聚合潜力综合评估方法的研究相对较少。文献[9-10]运用层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)和熵权法确定准则层和指标层权重,与层次递推的模糊综合评价方法相结合,对快充网对各主体的影响进行量化并展开全面评估。文献[11-13]分别利用优劣解距离法、秩和比法以及模糊综合评价法建立配电网评估模型。但以上研究评价方法单一,造成评估结果的主客观权重不均衡。综合权重法将 AHP 的客观性和熵权法的主观性相结合,可以保证设置权重时同时兼顾主客观两方面。

本文在已有研究的基础上,提出一种考虑主客观响应能力的 EV 聚合潜力评估方法及指标体系。该指标体系结合 EV 参与电网有功控制的多重属性,兼顾电网侧及用户侧。使用基于 k -means 聚类算法的 EV 群体分类方法,在保证 EV 运行流动性的前提下,提升大规模 EV 接入时模型的求解效率。运用 AHP 与熵权法相结合的综合赋权法得到权重集,通过秩和比综合评价方法得到评价结果。

1 EV 参与电网有功控制框架

综合可调度潜力约束模型由 EV 客观响应能力约束模型和 EV 用户主观响应评估模型构成,包含电网侧与用户侧两部分。根据 EV 的不同充电行为

进行群体划分,通过模糊综合评价法对 EV 可调度潜力进行量化评估。

EV 参与电网有功控制框架涉及电网调度中心、EV 负荷聚合商、EV 充电站和 EV 用户 4 个部分^[14-15],如图 1 所示。聚合商作为电网调度中心与用户和充电站之间的媒介,可以实现 EV 负荷的分布式调度和管理,是 EV 参与电网有功控制的核心。聚合商一方面对配电网提供需求响应(Demand Response, DR)服务,另一方面对 EV 提供充电服务,同时对参与 DR 的 EV 用户给予基于动态电价的激励奖励。假设 EV 充电站具有自主处理信息的能力,收到 EV 负荷聚合商传达的用户充电需求调度计划后,可对 EV 用户的充放电功率进行调控并为不同类型的 EV 负荷制定不同的充放电计划。

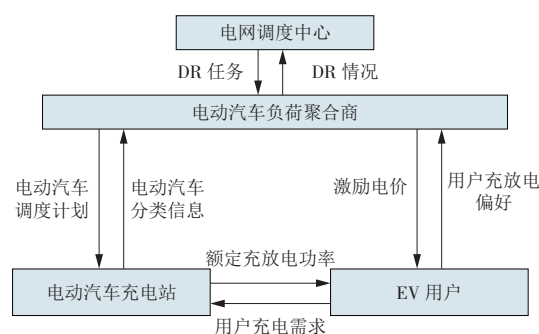


图 1 EV 参与电网有功控制框架

Fig. 1 Active power control framework with the participation of EVs

本文所建立的集群 EV 需求响应聚合潜力评估指标体系从电网侧与用户侧出发,包含 6 个评价指标,具体如图 2 所示。现有评价方法大多为模糊综合评价法或优劣解距离法,无法兼顾电网侧与用户侧主客观因素,因此本文采用综合赋权法,利用熵权法和 AHP 对各项指标进行综合赋权,从而获得兼顾主客观性的评价结果。

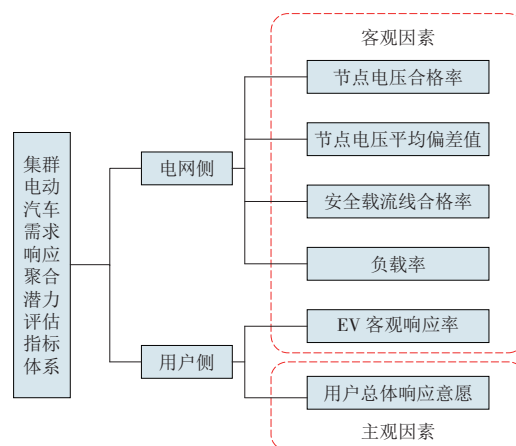


图 2 考虑主客观响应能力的 EV 聚合潜力评估

Fig. 2 Evaluation on electric vehicle aggregation potential considering subjective and objective response capabilities

2 考虑主客观因素的EV响应潜力

EV的响应潜力受多个因素影响,为了构建一个精确的EV潜力评估模型,本文以EV的充放电模型为基础,分别构建考虑电网与EV负荷安全性的EV客观响应能力约束模型和综合考虑电价、充电需求等因素的用户主观响应意愿评价模型,使用AHP和熵权法组合求取综合权重,利用模糊综合评价法对用户的充放电响应潜力进行量化评估。

2.1 EV客观响应能力约束模型

EV客观响应能力是指在充电过程中所能达到的最大响应功率,受电网侧安全约束和电池安全约束等因素的制约。电网侧安全约束主要为电网运行的安全性和合理性,电池安全约束主要考虑充放电时的初始电量与额定充放电功率之间的关系,两类约束具有时变性且可由充放电功率边界来确定。

2.1.1 电网侧安全性约束模型

电网侧安全性主要考虑节点电压功率达标、电压偏压不越线以及安全载流合格等方面^[16-17]。

(1)节点电压合格率 $R_{N,i,t}$ 。节点电压合格率为配电网某一时刻某一节点电压幅值的概率分布,以节点 i 为例, t 时刻 $R_{N,i,t}$ 的计算方法如下

$$R_{N,i,t} = F_{N,j,t}(U_{\max}) - F_{N,j,t}(U_{\min}), \quad (1)$$

式中: $F_{N,j,t}(\cdot)$ 为 t 时刻节点 i 电压幅值的概率分布函数; $U_{\max}$ 为合格电压的上限; $U_{\min}$ 为合格电压的下限。

(2)电压平均偏差 $\bar{R}_{i,t}$ 。节点电压平均偏差为该节点电压与线路根节点电压的差值,其中包含最低电压、最高电压差值。

$$\begin{cases} R_{i,t}^{\text{up}} = U_{i,t}^{\text{up}} - U_{\text{ref}} \\ R_{i,t}^{\text{down}} = U_{\text{ref}} - U_{i,t}^{\text{down}} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\bar{R}_{i,t} = \frac{R_{i,t}^{\text{up}} + R_{i,t}^{\text{down}}}{2}, \quad (3)$$

式中: $R_{i,t}^{\text{up}}, R_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的电压上升和跌落偏离指数; $\bar{R}_{i,t}$ 为平均电压偏差; $U_{i,t}^{\text{up}}, U_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的电压在该节点概率分布置信区间 I 的上界和下界; U_{ref} 为线路根节点电压。

(3)安全载流线合格率 T_1 的计算公式为

$$T_1 = \frac{L_{\text{out}}}{L} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: L_{out}, L 分别为配电网中超出最大电流安全运行区间的线路数和线路总数。

负载率 T_2 的计算公式为

$$T_2 = \frac{P_v}{P_{\max}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: $P_v, P_{\max}$ 分别为配电网中短时平均负荷及产生的最大负荷。

2.1.2 电池安全性约束模型

电池安全性主要考虑电池使用寿命安全约束、充放电电量约束以及充电桩功率约束等^[18]。

(1)电池使用寿命安全约束。在EV参与DR的过程中,受外部温度、湿度、行驶环境等因素的影响,EV的电量会发生变化,因此,要确保EV电池的使用寿命,必须满足电池的安全电量限制,即

$$\begin{cases} S_{\text{OC}, \min} \leq S_{\text{OC}}(i, t) + S_{\text{DR}}(i, t) \leq S_{\text{OC}, \max} \\ -P_d \leq P(i, t) \leq P_c \\ t_a \leq t \leq t_l \end{cases}, \quad (6)$$

$$S_{\text{DR}}(i, t) = \begin{cases} \frac{\eta_c P(i, t) \Delta t}{C_0} & P(i, t) > 0 \\ \frac{P(i, t) \Delta t}{C_0} & P(i, t) \leq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $S_{\text{OC}}(i, t)$ 为 t 时刻用户 i 的荷电状态(State of Charge, SOC); $S_{\text{DR}}(i, t)$ 为 t 时刻用户 i 以响应功率 $P(i, t)$ 充、放电引起的SOC变化量; $S_{\text{OC}, \max}, S_{\text{OC}, \min}$ 分别为EV电池的SOC上、下限; P_c, P_d 分别为EV的额定充、放电功率; t_a, t_l 分别为用户 i 的到达时间和预期离开时间; η_c 为EV充电时的充电效率; C_0 为EV电池容量。

(2)充放电电量约束。由于EV入网剩余电量具有随机性,EV参与DR的过程中可以自主选择进行充放电响应。若选择充电响应,在满足出行需求的前提下,EV电量在离站前须达到初始期望电量;若选择放电响应,也须满足电池电量要求,过低的电量会影响EV使用。参与DR的过程中, $S_{\text{DR}}(i, t)$ 引起的SOC变化量约束如下。

充电响应

$$S_{\text{OC}, \max} \geq S_{\text{OC}}(i, t) + S_{\text{DR}}(i, t) \geq S_{\text{ex}}(i), \quad (8)$$

放电响应

$$S_{\text{OC}}(i, t) + S_{\text{DR}}(i, t) \geq S_{\text{OC}, \min}, \quad (9)$$

式中: $S_{\text{ex}}(i)$ 为用户 i 的期望充电电量。

(3)充电桩功率约束。EV充电基础设施是EV发展的重要保证,因此应该建立相应的标准,对EV的充电行为进行统一,2010年我国政府统一了EV充电标准^[19]。EV充电模式可以划分为慢速充电、常规充电和快速充电,见表1。其中,慢速充电与常规充电采用交流充电,而快速充电采用直流充电。从需求分布看,慢速充电和常规充电主要集中在居民小区、工作区等地方的停车场,而快速充电主要集中在高速公路服务区等需要应急充电的地方。

由于充电桩的额定功率对EV的响应能力有很大影响,本文考虑一种将EV电量与充(放)电相联系的约束:EV进站剩余电量越高,给予的初始充电功率越小,初始放电功率越大;EV进站剩余电量越

表 1 EV 充电模式
Table 1 EV charging modes

充电模式	额定电压/V	额定电流/A	适用场所
慢速充电	单相 220	16	小区
	单相 220	32	
常规充电	三相 380	32	商场、停车场
	三相 380	63	
快速充电	600	300	高速公路服务区

低,给予的初始充电功率越大,初始放电功率越小。随着 EV 电量的升高,充电功率随之下降;当 EV 电量降低时,放电功率下降。具体约束如下

$$P_c(i, t) = \frac{1 - S_{oc}(i, t)}{C_0} P_r(i, t), \quad (10)$$

$$P_d(i, t) = \frac{S_{oc}(i, t)}{C_0} P_r(i, t), \quad (11)$$

$$P_{\min}(i, t) \leq P_r(i, t) \leq P_{\max}(i, t), \quad (12)$$

式中: $P_c(i, t)$ 为充电功率; $P_d(i, t)$ 为放电功率; $P_r(i, t)$ 为 t 时刻用户 i 的额定充(放)电功率; $P_{\min}(i, t)$, $P_{\max}(i, t)$ 分别为 t 时刻用户 i 的最小充(放)电功率和最大充(放)电功率。

t 时刻用户 i 的客观响应能力 $P_{re}(i, t)$ 为

$$P_{re}(i, t) = P_{na}(i, t) - P_{\min}(i, t), \quad (13)$$

$$P_{na}(i, t) = \begin{cases} 0 & S_{oc}(i, t) \geq S_{ex}(i) \\ P_c(i, t) & S_{oc}(i, t) < S_{ex}(i) \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $P_{na}(i, t)$ 为不参与 DR 过程时的自然充电功率。

当存在放电响应能力的用户,即 $P_{\min}(i, t) < 0$ 时,其响应潜力为

$$P_{c, re}(i, t) = P_{na}(i, t), \quad (15)$$

$$P_{d, re}(i, t) = \eta |P_{\min}(i, t)|, \quad (16)$$

式中: $P_{c, re}(i, t)$, $P_{d, re}(i, t)$ 分别为 t 时刻用户 i 的充、放电响应潜力,两者之和即为总的客观响应能力 $P_{re}(i, t)$ 。

2.2 EV 用户主观响应评估模型

对 EV 用户来说,是否参加 DR 取决于他们的主观意愿,因此, EV 响应潜力既取决于外部客观能力,也取决于用户的主观意愿。基于此,本文提出一种考虑用户行为因素的 EV 用户主观响应评估方法。

EV 的主观响应水平主要受激励电价和用户当前剩余电量引起的充(放)电需求的影响。根据消费者心理模型,对使用者而言,价格具有最低可感知差异阈值^[20-21]。当激励电价处于阈值范围内时,用户对激励电价不敏感,基本无响应或响应非常小;超出阈值范围后,用户开始响应,随着激励电价的提高,用户响应程度逐步增强,当激励电价达到一定程度时,用户响应程度不再提升,即到达响应饱和区。然而,在相同的激励条件下,用户的响应

意愿并非一成不变,而是受多种因素影响且存在一定的波动性。因此,对于相同激励水平下的用户意愿,可以设定正面响应和负面响应 2 种情形,将这 2 种情形的响应率平均值作为用户的总体响应意愿。此外,考虑到用户在同一激励下对充、放电响应的接受程度不同,本文采用了不同的响应率模型,以反映不同用户的充放电行为。具体而言,本文将用户的充放电响应率分成几个部分,每个部分对应一个响应率,如图 3 所示。图中: p 为 EV 负荷聚合商对 EV 用户参与 DR 响应的激励价格; η_c 和 η_d 分别为用户的充、放电响应率; $\eta_{c, \max}$ 和 $\eta_{d, \max}$ 分别为用户最大充、放电响应率; $p_{c, \min}$ 为用户充电激励响应临界值,当激励电价高于该值时,用户的充电响应总是大于 0; p_{d1} 为用户放电最小激励值; $p_{d, \min}$ 为用户放电激励响应临界值,当激励电价高于该值时,用户的充电响应总是大于 0; $p_{c, \max}$ 为用户的充电饱和激励电价,当激励电价达到该值时,用户的充电响应率维持 $\eta_{c, \max}$ 不变; $p_{d, \max}$ 为用户的放电饱和激励电价,激励电价达到该值时,用户放电响应率维持 $\eta_{d, \max}$ 不变; $\eta_{c, op}(p)$ 和 $\eta_{c, pe}(p)$ 分别为用户充电正面响应率和负面响应率。

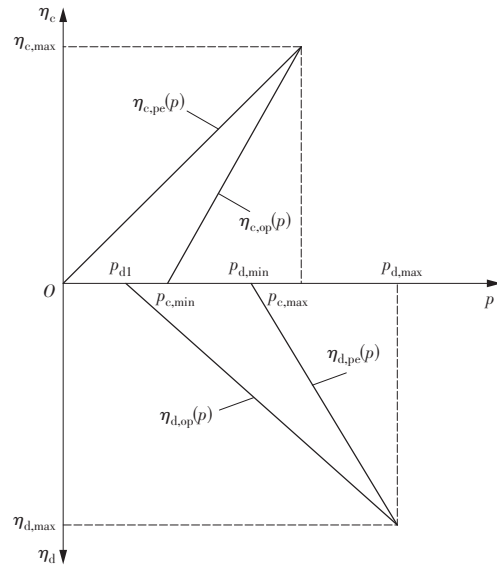


图 3 EV 用户受激励电价的主观响应率模型

Fig. 3 Subjective response rate model for the EVs motivated by electricity prices

$$\eta_{c, op}(p) = \begin{cases} \eta_{c, \max} \frac{p}{p_{c, \max}} & 0 \leq p \leq p_{c, \max} \\ \eta_{c, \max} & p > p_{c, \max} \end{cases}, \quad (17)$$

$$\eta_{c, pe}(p) = \begin{cases} 0 & p < p_{c, \min} \\ \frac{p - p_{c, \min}}{p_{c, \max} - p_{c, \min}} \eta_{c, \max} & p_{c, \min} \leq p \leq p_{c, \max} \\ \eta_{c, \max} & p > p_{c, \max} \end{cases} \quad (18)$$

则用户的总体充电响应率为

$$\eta_c(p) = \frac{\eta_{c,op}(p) + \eta_{c,pe}(p)}{2} \quad (19)$$

$\eta_{d,op}(p)$ 和 $\eta_{d,pe}(p)$ 分别为用户放电正面响应和放电负面响应率。

$$\eta_{d,op}(p) = \begin{cases} 0 & p < p_{d1} \\ \frac{p - p_{d1}}{p_{c,max} - p_{d1}} \eta_{d,max} & p_{d1} \leq p \leq p_{d,max} \\ \eta_{d,max} & p > p_{d,max} \end{cases} \quad (20)$$

$$\eta_{d,pe}(p) = \begin{cases} 0 & p < p_{d,min} \\ \frac{p - p_{d,min}}{p_{c,max} - p_{d,min}} \eta_{d,max} & p_{d,min} \leq p \leq p_{d,max} \\ \eta_{d,max} & p > p_{d,max} \end{cases} \quad (21)$$

则用户的总体放电响应率为

$$\eta_d(p) = \frac{\eta_{d,op}(p) + \eta_{d,pe}(p)}{2} \quad (22)$$

结合用户主观充电响应率和主观放电响应率计算EV用户主观充放电响应潜力

$$\eta(p) = \eta_c(p) + \eta_d(p) \quad (23)$$

2.3 基于k-means算法的EV群体分类方法

以EV在流动行为上的相似性为基础,使用k-means聚类算法从EV的入网时间、离网时间和进站初始剩余电量入手对群体进行划分。将对单辆EV的评估转化为对具有相同出行行为车辆的评估,对EV出行规律进行全面可调度性评价,以减少计算工作量。

k-means聚类算法是通过计算每个元素到随机选择簇中心的“距离”来将所有元素分成k个簇,其结果取决于数据的精确度和簇数量的选择。具体原理如下。

给定EV样本 $W = [W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n]$, W_i 为包含EV的入网时间、离网时间和进站初始剩余电量3个维度的序列。初始化j个EV群体的聚类中心 $\{C_1, C_2, \dots, C_j\}$,然后计算每个序列到每一个聚类中心的欧式距离,计算方式如下

$$d(W_i, C_t) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (W_{ij} - C_{tj})^2} \quad (24)$$

式中: W_i 为第i个EV充电行为序列; C_t 为第t个聚类中心; W_{ij} 为第i个EV的第j个指标; C_{tj} 为第i个聚类中心的第j个指标。

为了快速找到最优的分类群数,获得更好的聚类效果,在使用k-means聚类算法的基础上引入轮廓系数法确定合适的k值。轮廓系数法是通过比较分类群之间的相似度和个体之间的差异来确定最合适的分类群数,通过计算每个样本轮廓系数的均值可以更加合理地评估分类群数。具体定义如下

$$\sum_{i \in n} s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max[a(i), b(i)]} / n, \quad (25)$$

$$s(i) = \begin{cases} 1 - \frac{a(i)}{b(i)} & a(i) < b(i) \\ 0 & a(i) = b(i) \\ \frac{b(i)}{a(i)} - 1 & a(i) > b(i) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $a(i)$ 为样本i到同一类中其他样本的平均距离, $a(i)$ 越小,说明样本i与同类中其他样本的距离越近,即越相似; $b(i)$ 为样本i到其他类别的所有样本的平均距离,表明样本i与其他类之间的不相似度, $b(i)$ 越大说明样本i与其他类之间距离越远,即越不相似。

$s(i)$ 介于 $[-1, 1]$ 之间,越接近1说明 $b(i)$ 越大 $a(i)$ 越小,类别内部越相似,类别之间越不相似;越接近0说明类别内部和类别之间的距离差不多,分界线很不明显,样本可以分配到任一类别中;越接近-1说明类别之间越相似,类别内部反而不相似。

2.4 EV参与电网有功控制潜力计算方法

2.4.1 数据预处理

对初始数据进行无量纲处理:对于正向指标 Y_{ij}^{pe} ,指标值越大越好,采用式(27)进行处理;对于负向指标 Y_{ij}^{op} ,指标值越小越好,采用式(28)进行处理。

$$Y_{ij}^{pe} = \frac{W_{ij} - \min(W_j)}{\max(W_j) - \min(W_j)}, \quad (27)$$

$$Y_{ij}^{op} = \frac{\max(W_j) - W_{ij}}{\max(W_j) - \min(W_j)}, \quad (28)$$

式中: W_{ij} 为第i个评价对象的第j个EV响应DR实时调控能力的评估指标, $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$; $\max(W_j)$, $\min(W_j)$ 分别为同一评价指标下不同对象的最大与最小值,无量纲化处理后得到评判指标矩阵Y。

2.4.2 客观权重计算方法

熵权法按照各指标传递给决策者的信息量大小来分配权重,是一种客观的赋权法。当某项评价指标在系统中所起作用较小时,其信息熵权较小,相较于其他指标对决策产生的影响也较小。熵权法计算权重的具体步骤如下。

(1)对评判指标矩阵Y进行标准化处理,针对传统熵权法存在 $p_{ij} = 0$,导致 $\ln p_{ij}$ 无意义的情况,本文采用式(29)进行标准化处理。

$$p_{ij} = \frac{y_{ij} + 0.1}{\sum_{j=1}^m (y_{ij} + 0.1)}, \quad (29)$$

式中: y_{ij} 为无量纲化处理后得到的正向评判指标和

负向评判指标。

(2) 分别求取各 EV 响应 DR 实时调控能力评价指标的信息熵 E 。

$$E_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (30)$$

(3) 使用式(31)计算每个 EV 响应 DR 实时调控能力评价指标的信息熵权重 ω_j , 得到评价指标客观权重 $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_m]$ 。

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^m E_j} \quad (j = 1, 2, \cdots, m) \quad (31)$$

2.4.3 主观权重计算方法

AHP 是一种能够合理地将定性与定量决策结合起来的主观赋权法。该方法根据专家主观经验以及评估需求将评判因素组成判断矩阵, 用以计算权重。采用 AHP 计算 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标的主观权重, 其计算步骤如下。

(1) 建立判断矩阵。对 EV 响应 DR 实时调控能力的评估指标重要性两两进行比较, 根据专家意见使用表 2 所示的九标度法对指标打分, 构造判断矩阵 A 。

表 2 九标度法各标度意义

Table 2 Paraphrasing for the scales of the nine-scale scoring method

标度	标度意义
1	a_i 与 a_j 同等重要
3	a_i 较 a_j 稍微重要
5	a_i 较 a_j 相当重要
7	a_i 较 a_j 强烈重要
9	a_i 较 a_j 极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻判断的中间值
$a_{ij} = 1/a_{ji}$	倒数

(2) 计算 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标。对判断矩阵 A 进行按列归一化处理, 使用算术平均法求权重, 获得 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标主观权重 θ 。

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_i &= \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}^*}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij}^*} \\ a_{ij}^* &= \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^m a_{ij}} \end{aligned} \right. \quad (32)$$

式中: m 为判断矩阵阶数即 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标个数; a_{ij} 为判断矩阵 A 中第 i 行第 j 列专家评分; a_{ij}^* 为 a_{ij} 对应位置归一化后的值; θ_i 为第 i 个

EV 响应 DR 实时调控能力的评估指标主观权重。

(3) 计算排序权向量并进行一致性检验。首先计算最大特征值 $\lambda_{\max}$; 然后计算 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标判断矩阵一致性指标 I_c , 通过查表获得判断矩阵的平均一致性指标 I_R ; 最后根据 I_c 与 I_R 计算一致性比率 R_c 。

$$\left\{ \begin{aligned} R_c &= \frac{I_c}{I_R} \\ I_c &= \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ \lambda_{\max} &= \sum_{i=1}^n \frac{(A\theta)_i}{n\theta_i} \end{aligned} \right. \quad (33)$$

若计算得到的一致性比率满足 $R_c < 0.1$, 则判断矩阵通过一致性检验, 判断矩阵 A 与主观权重向量 θ 合理, 否则需要重新对 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标进行评分, 构造新的判断矩阵 A , 直到通过一致性检验。

2.4.4 综合权重计算方法

针对熵权法客观性过强使得评估指标在反映 EV 响应 DR 实时调控能力不够贴合实际以及 AHP 主观性过强缺乏客观依据的问题, 结合熵权法以及 AHP 计算 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标综合权重 λ 。

$$\lambda = \left[\frac{\theta_1 \omega_1}{\sum_{j=1}^m \theta_j \omega_j} \quad \frac{\theta_2 \omega_2}{\sum_{j=1}^m \theta_j \omega_j} \quad \cdots \quad \frac{\theta_n \omega_n}{\sum_{j=1}^m \theta_j \omega_j} \right] \quad (34)$$

2.4.5 秩和比综合评价方法

首先对正向指标以及负向指标分别进行从小到大和从大到小的序号编秩, 若存在相等数值, 则赋予相同序号。正向指标 R_{ij}^{op} 和负向指标 R_{ij}^{pe} 编秩方法分别如式(35)和(36)所示。

$$R_{ij}^{\text{op}} = 1 + (n - 1) \frac{(W_{ij} - \min(W_{1j}, W_{nj}, \cdots, W_{nj}))}{(\max(W_{1j}, W_{nj}, \cdots, W_{nj}) - \min(W_{1j}, W_{nj}, \cdots, W_{nj}))} \quad (35)$$

$$R_{ij}^{\text{pe}} = 1 + (n - 1) \frac{(\max(W_{1j}, W_{nj}, \cdots, W_{nj}) - W_{ij})}{(\max(W_{1j}, W_{nj}, \cdots, W_{nj}) - \min(W_{1j}, W_{nj}, \cdots, W_{nj}))} \quad (36)$$

式中: R_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个指标的秩, 即为编秩后的正向指标以及负向指标。

再结合综合权重计算加权秩和比。

$$R_{\text{WRS}, i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \lambda_j R_{ij} \quad (37)$$

式中: $R_{\text{WRS}, i}$ 为第 i 个评价对象加权秩和比; λ_j 为第 i 个评价对象的第 j 个指标的综合权重。

本文方法的总体流程如图 4 所示。

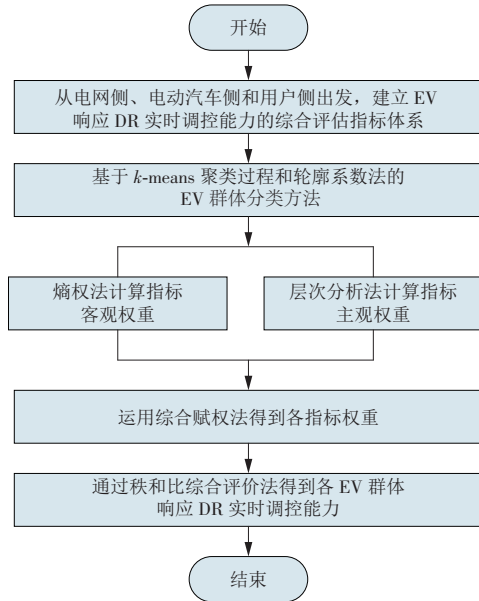


图4 EV响应潜力评估流程

Fig. 4 Evaluation on the EV response capability

3 算例分析

3.1 参数设置

本文针对我国华东地区某城市某区实际案例进行分析,该地区核心段主要由2条8 kV线路供电,分别来自2个不同的110 kV变电站。其中,8 kV线路1主干线路长4.3 km,供电区域主要为工商业区;8 kV线路2主干线路长2.5 km,供电区域类型主要为居民区与其他类型区域,共计28个节点。以当地EV日负荷数据为例,对零散EV充电行为数据进行处理,用户接入电网的初始电量服从 $N(0.2, 1)$ 的正态分布,用户期望充电电量服从 $N(0.6, 1)$ 的正态分布; $p_{c, \min}, p_{c, \max}$ 分别取1.5, 3.5元/(kW·h); $p_{d1}, p_{d, \min}, p_{d, \max}$ 分别为0.5, 2.0, 4.0元/(kW·h)^[22-23]; $\eta_{c, \max}, \eta_{d, \max}$ 均为1(标么值);时间间隔为1 h,统计各个时间段的负荷值(如图5所示)并提取出本文需要的参数。设定该区域EV额定充放电功率为5 kW,最大充放电效率为95%。

3.2 EV分类结果

选取5 000辆EV,得到零散EV的入网时间分布、离网时间分布以及起始SOC值等充电负荷数据。EV入网和离网时间分布如图6所示。

基于k-means聚类过程结合轮廓系数法,根据EV负荷特性参数的分布特点将零散EV划分为4类群体,其分类聚集效果如图7所示。图7中红色点为程序所选的聚类中心,将EV按照其入网时间分布、离网时间分布、起始SOC值分为3类,分别计算不同群体EV的响应DR实时调控能力。

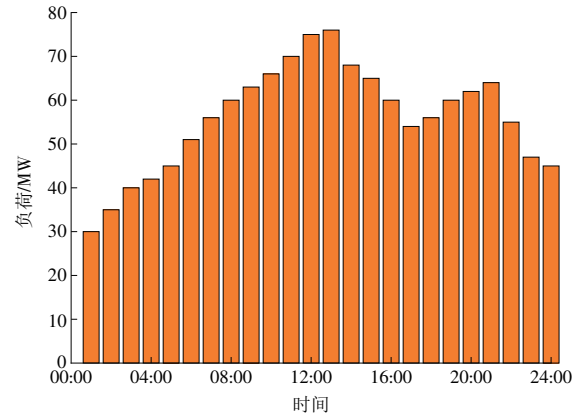


图5 EV日负荷数据

Fig. 5 Daily load of EVs

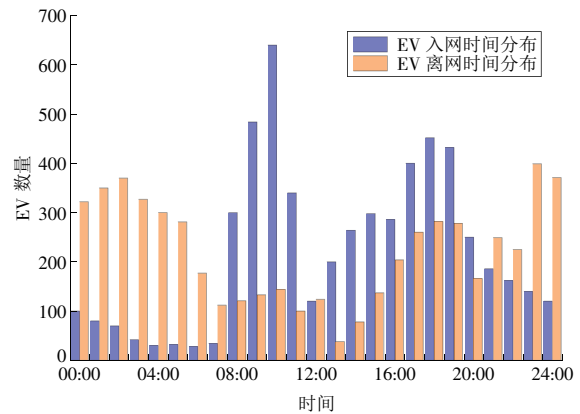


图6 EV入网及离网时间分布

Fig. 6 Grid connection and disconnection time of EVs

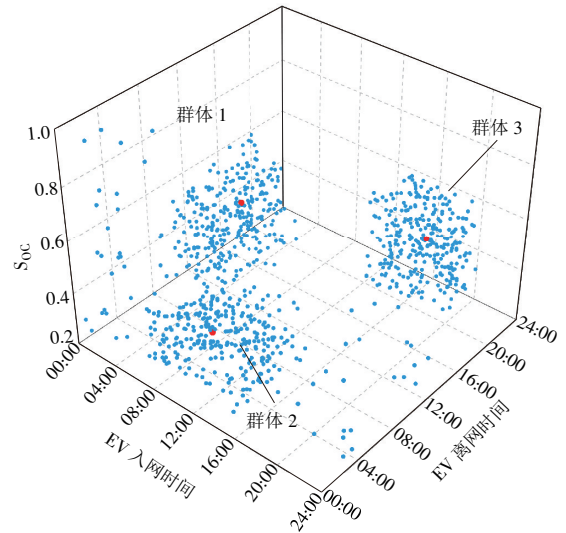


图7 EV充电行为参数聚类

Fig. 7 Clustering of EVs according to their charging behaviors

3.3 指标计算结果分析

本文从电网侧和用户侧出发,选取节点电压合格率、节点电压平均偏差、安全载流线合格率、负载率、EV客观响应能力和用户总体响应意愿6项评价指标,对上述3类EV群体进行仿真试验,以3类群体的聚类中心指标值分别计算EV客观响应能力和用户总体响应意愿,可以有效减少模型求解时间。

节点电压合格率用于评价 EV 接入配电网后各线路上每个充电站节点是否存在电压越限问题。分别将 3 类群体接入配电网后,测试每个节点的电压合格率,电压合格率上、下限分别取 1.1,0.9(标么值)。节点电压偏差指标表示该节点电压与线路根节点电压的差值。分别将 3 类群体接入配电网,测试每个节点的节点电压偏差,不同充电群体的差别较小,偏差较大的时段主要集中在 10:00—12:00 负荷水平较高的时段。安全载流线合格率为不同 EV 群体接入配电网后,配电网中超出网络中最大电流安全运行区间的线路数占线路总数的比例。负载率为不同 EV 群体接入配电网后,配电网中短时平均负荷占 EV 接入后产生的最大负荷峰值的比例。各群体评估指标计算结果见表 3。

表 3 各群体评估指标计算结果

Table 3 Calculated evaluation indicators of each group

指标	群体 1	群体 2	群体 3
$R_{N,i,t}/\%$	0.776	0.882	0.806
$\bar{R}_{i,t}$ (标么值)	0.08	0.05	0.06
$T_1/\%$	0.233	0.167	0.800
$T_2/\%$	0.967	0.857	0.733
$P_{re}(i,t)/kW$	30	21	35
$\eta(p)/kW$	15	32	27

为消除量纲对评价结果的影响,将上述指标试验数据进行标准化处理,标准化结果见表 4。

表 4 各群体评估指标标准化数据

Table 4 Standardized evaluation indicators of each group

指标层	群体 1	群体 2	群体 3
$R_{N,i,t}$	0	1.000	0.283
$\bar{R}_{i,t}$	1.000	0	0.330
T_1	0.101	0	1.000
T_2	1.000	0.618	0
$P_{re}(i,t)$	0.643	0	1.000
$\eta(p)$	0	1.000	0.710

分别计算各 EV 响应 DR 实时调控能力评价指标的信息熵,得到信息熵向量 E ,对 E 进行单位化处理,得到客观权重 ω 。

$$E = \begin{bmatrix} 0.8532 \\ 0.8641 \\ 0.8724 \\ 0.8554 \\ 0.8611 \\ 0.7428 \end{bmatrix}^T, \omega = \begin{bmatrix} 0.1623 \\ 0.1515 \\ 0.1325 \\ 0.1410 \\ 0.1842 \\ 0.2523 \end{bmatrix}^T。$$

专家对 EV 响应 DR 实时调控能力评价指标进行重要性评估,得到专家评分数据,见表 5。

进行求和归一化处理得到主观权重 θ ,通过式

表 5 专家九标度法评分结果

Table 5 Scores made by nine-scale scoring method from experts

评价指标	$R_{N,i,t}$	$\bar{R}_{i,t}$	T_1	T_2	$P_{re}(i,t)$	$\eta(p)$
$R_{N,i,t}$	1	3	5	6	3	1
$\bar{R}_{i,t}$	1/3	1	3	3	1	1/3
T_1	1/5	1/3	1	2	1/2	3
T_2	1/6	1/3	1/2	1	1/3	1
$P_{re}(i,t)$	1/3	1	2	3	1	2
$\eta(p)$	1	3	1/3	1	1/2	1

(34)求得综合权重 λ 。

$$\theta = \begin{bmatrix} 0.1723 \\ 0.1263 \\ 0.0912 \\ 0.0911 \\ 0.2277 \\ 0.2172 \end{bmatrix}^T, \lambda = \begin{bmatrix} 0.0808 \\ 0.1654 \\ 0.0847 \\ 0.1016 \\ 0.3121 \\ 0.2554 \end{bmatrix}^T。$$

由计算得到的 EV 响应 DR 实时调控能力评估指标的综合权重可见:EV 客观响应能力所占权重最高,达 0.3121,结合表 3 可以确定 EV 客观响应能力在 EV 响应 DR 实时调控过程中对其响应能力影响最大,因此,EV 客观响应能力是最需要解决的问题,在 EV 响应 DR 实时调控过程中建议优先考虑 EV 客观响应能力问题;同时,用户总体响应意愿的权重排在第 2 位,说明在满足客观条件的前提下,提升用户的主观意愿对 EV 响应 DR 实时调控能力具有重要影响。

最后利用秩和比法对 3 类 EV 群体的得分进行综合处理得到综合得分,见表 6。

表 6 各群体综合得分

Table 6 Comprehensive scores of different groups

项目	群体 1	群体 2	群体 3
得分	1.27	2.40	1.88
排名	3	1	2

从表 6 可见,群体 2 中 EV 响应 DR 实时调控能力最强,其次为群体 3,群体 1 的响应能力最低。

将本文所提方法与传统的优劣解距离法进行对比,对比结果如图 8 所示。尽管 2 种评价方法所得出的方案具体分数和波动都不一样,但总体的趋势是一样的,各方案的群体排名是一致的。

综上所述,EV 客观响应能力与用户整体响应意愿的提升,可以实现更好的 DR 调控效果,降低电网侧的供电压力,增加 EV 负荷聚合商的收益;同时,用户接受 DR 的实时调节,可以获得更大的收益,从而提高参与调度的积极性。因此,需要考虑更多的车网交互方式,以提高 DR 的执行效果,达到多方共赢的目的。

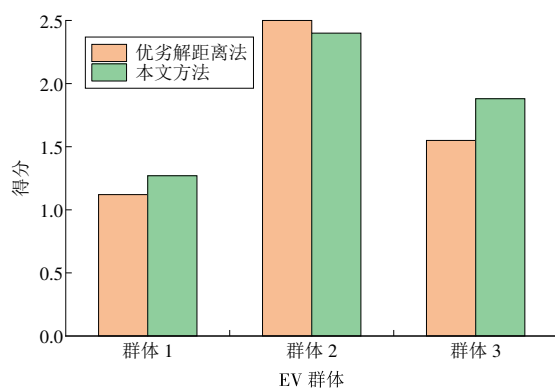


图8 各评价方法得分

Fig. 8 Score of each evaluation method

4 结论

为解决目前缺少电动汽车响应电网调节能力量化评估方法的问题,从电网侧和用户侧出发,提出一种考虑主客观响应能力的EV聚合潜力评估方法及指标体系。具体结论如下。

(1)在对模型进行求解时,考虑到EV移动性和计算量大的问题,利用 k -means聚类过程结合轮廓系数法,可降低评价模型对逐次计算所需的资源消耗,减少计算量的同时能对EV出行规律进行全面可调度的评价。

(2)由评价结果可知,综合考虑主观和客观因素来计算响应潜力并根据这些因素来确定激励电价,可以避免聚合商用不必要的激励成本来满足电网需求。在未来电力市场改革更加深入时,所提方法能够平衡用户和电网供应商双方利益的同时兼顾各方需求。

参考文献:

- [1]魏震波,张海涛,魏平桢,等.考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):1-10.
WEI Zhenbo, ZHANG Haitao, WEI Ping'an, et al. Two stage optimal dispatching of micro grid considering dynamic excitation demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 1-10.
- [2]李昊,季振亚,刘晓峰,等.基于综合可调度潜力评估的电动汽车优先调度策略[J].综合智慧能源,2022,44(11):1-11.
LI Hao, JI Zhenya, LIU Xiaofeng, et al. Priority scheduling strategy for electric vehicles based on comprehensive schedulable potential evaluation [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44 (11): 1-11.
- [3]胡泽春,邵成成,何方,等.电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J].电力系统自动化,2022,46(12):3-19.
HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Overview and prospects of facility planning and operation optimization for the coupling of power grid and transportation network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (12): 3-19.
- [4]南琦琦,穆云飞,董晓红,等.电动汽车快速充电网综合评估指标体系与方法[J].电力系统自动化,2020,44(1):83-91.
NAN Qiqi, MU Yunfei, DONG Xiaohong, et al. Comprehensive evaluation index system and method for electric vehicle fast charging network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (1): 83-91.
- [5]杜习超,刘永民,徐则诚,等.电动汽车随机负荷建模及对配电网节点电压分布的影响[J].电力自动化设备,2018,38(6):124-130.
DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 124-130.
- [6]杨晓东,任帅杰,张有兵,等.电动汽车可调度能力模型与日内优先调度策略[J].电力系统自动化,2017,41(2):84-93.
YANG Xiaodong, REN Shuaijie, ZHANG Youbing, et al. Electric vehicle dispatchability model and daily priority dispatching strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (2): 84-93.
- [7]徐智威,胡泽春,宋永华,等.基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3638-3646.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Ordered charging strategy for electric vehicle charging stations based on dynamic time of use tariff [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (22): 3638-3646.
- [8]杨景旭,李钦豪,张勇军,等.考虑电网需求匹配度的多EV聚合商需求响应削峰优化建模[J].电力自动化设备,2021,41(8):125-134.
YANG Jingxu, LI Qinhao, ZHANG Yongjun, et al. Optimal modeling of demand response peak shaving for multi EV aggregators considering grid demand matching [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (8): 125-134.
- [9]张帅,刘一欣,张宇轩,等.电动汽车接入对配电网运行特性影响的综合评估方法[J].浙江电力,2022,41(3):1-10.
ZHANG Shuai, LIU Yixin, ZHANG Yuxuan, et al. Comprehensive evaluation method for the impact of electric vehicle integration on the operational characteristics of distribution networks [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41 (3): 1-10.
- [10]陈卫,杨波,张兆云,等.计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J].电工技术学报,2014,29

- (8):27-35,45.
- CHEN Wei, YANG Bo, ZHANG Zhaoyun, et al. Evaluation and optimization of distribution network carrying capacity considering the connection of electric vehicle charging stations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 27-35, 45.
- [11] 任鹏, 李翀, 陶鹏, 等. 基于加权熵TOPSIS法的电网节点脆弱度评估[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 143-149.
- REN Peng, LI Chong, TAO Peng, et al. Vulnerability assessment of power grid nodes based on weighted entropy TOPSIS method [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 143-149.
- [12] 顾洁, 王春义, 牟宏, 等. 秩和比法在高压配电网项目评价中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 80-86.
- GU Jie, WANG Chunyi, MOU Hong, et al. Application of rank sum ratio method in high voltage distribution network project evaluation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 80-86.
- [13] 肖勇, 陆文升, 李云涛, 等. 城市配电网发展形态指标体系及其评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 62-71.
- XIAO Yong, LU Wensheng, LI Yuntao, et al. Research on the indicator system and evaluation method of urban distribution network development form [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 62-71.
- [14] YIN W, WEN T, ZHANG C. Cooperative optimal scheduling strategy of electric vehicles based on dynamic electricity price mechanism [J]. Energy, 2023, 263: 125627.
- [15] WANG K, WANG H, YANG J, et al. Electric vehicle clusters scheduling strategy considering real-time electricity prices based on deep reinforcement learning [J]. Energy Reports, 2022, 8: 695-703.
- [16] 郭豪杰, 崔双喜. 基于分时电价的电动汽车有序充电策略研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(10): 20-24.
- GUO Haojie, CUI Shuangxi. Research on ordered charging strategy for electric vehicles based on time of use tariff [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(10): 20-24.
- [17] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 63-71.
- CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Multi objective hierarchical optimization scheduling of new energy microgrids including electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (12): 63-71.
- [18] LI B, CHEN Y, WEI W, et al. Resilient restoration of distribution systems in coordination with electric bus scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12 (4): 3314-3325.
- [19] 电动汽车传导式充电接口: QC/T 841—2010[S].
- [20] 黄春辉, 朱自伟, 裘昕月, 等. 偏差考核下售电公司的电动汽车电价策略研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1258-1265.
- HUANG Chunhui, ZHU Ziwei, QIU Xinyue, et al. Study on the electric vehicle tariff strategy of electricity selling companies under deviation assessment [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38 (9): 1258-1265.
- [21] 王康平, 黄曲黎, 张兴科, 等. 考虑调峰成本的大规模电动汽车分群调度策略[J]. 综合智慧能源, 2022, 44 (11): 12-19.
- WANG Kangping, HUANG Qucan, ZHANG Xingke, et al. Strategy for large-scale electric vehicles cluster scheduling considering peak-shaving cost [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(11): 12-19.
- [22] 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. Optimization model for real-time regulation of electric vehicles based on fuzzy evaluation of demand response potential [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42 (10): 30-37.
- [23] 张永新, 闫鹏领, 朱国栋. 电动汽车充电站站网互动运行优化技术研究与实践[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 45-51.
- ZHANG Yongxin, YAN Pengling, ZHU Guodong. Research and practice on optimization technology for interactive operation of electric vehicle charging station network [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44 (6): 45-51.

(本文责编: 刘芳)

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-06-29
 上网日期: 2023-08-21; 附录网址: www.iienenergy.cn

作者简介:

梁艳(1982), 女, 高级工程师, 从事电力系统、新能源方面的研究, 249630932@qq.com;

周霞*(1978), 女, 高级工程师, 博士, 从事电力系统分析与控制等方面的研究, zhouxia@njsu.edu.cn。

*为通信作者。