

计及车主充能意愿差异性的氢电混动汽车集群灵活性潜力评估

王秋杰^{1,2}, 刘观辉^{1,2}, 谭洪^{1,2}, 翁汉琨^{1,2}, 李振兴^{1,2}, 陈涛³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 东南大学电气工程学院, 南京 210018)

摘要: 氢电混动汽车(fuel-cell hybrid electric vehicles, FCHEV)的出现有效促进了能源-交通系统的绿色低碳转型。现阶段关于FCHEV的研究主要集中在能量管理和控制策略上, 较少关注灵活性潜力评估方面, 为此, 提出了一种计及车主充能意愿差异性的FCHEV集群灵活性潜力评估方法。首先, 建立城市交通路网模型模拟FCHEV的出行特征, 进而建立单体FCHEV充能模型; 其次, 利用改进层次分析法并结合熵权法建立车主充能意愿综合评价体系, 并综合考虑禀赋效应和环保意识对车主响应意愿度的影响; 最后, 建立FCHEV集群灵活性潜力评估模型, 求解得出潜力评估结果。仿真结果表明, 所提方法在评估过程中能够合理刻画车主充能意愿的差异性, 并有效提高集群参与优化调度时系统的灵活性。

关键词: 氢电混动汽车; 充能意愿综合评价体系; 灵活性潜力评估; 改进层次分析法; 熵权法

Flexibility Potential Assessment of Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle Clusters Considering the Difference of Owners' Charging Willingness

WANG Qiujie^{1,2}, LIU Guanhuai^{1,2}, TAN Hong^{1,2}, WENG Hanli^{1,2}, LI Zhenxing^{1,2}, CHEN Tao³

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: The emergence of fuel-cell hybrid electric vehicles (FCHEV) has effectively promoted the green and low-carbon transformation of the energy-transportation system. At present, the research on FCHEV mainly focuses on energy management and control strategies, with little attention paid to the assessment of flexibility potential. Therefore, a FCHEV cluster flexibility potential assessment method that takes into account difference of owners' willingness to charge is proposed. Firstly, an urban transportation network model is established to simulate the travel characteristics of FCHEV, and then a single FCHEV charging model is established; Secondly, the analytic hierarchy process is improved and combined with the entropy weight method to establish a comprehensive evaluation system for vehicle owners' willingness to charge, and the impact of endowment effects and environmental awareness on electric vehicle owners' willingness is comprehensively considered to respond. Finally, an FCHEV cluster flexibility potential assessment model is established and solved for the potential evaluation results. The simulation results show that the proposed method can reasonably characterize the differences in vehicle owners' willingness to charge during the assessment process, and effectively improve the flexibility of the system when the cluster participates in optimization scheduling.

Key words: fuel-cell hybrid electric vehicles; comprehensive evaluation system of charging willingness; flexibility potential assessment; improved analytic hierarchy process; entropy weight method

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307109); 湖北省自然科学基金创新发展联合基金项目(2024AFD362)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52307109); the Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund Project of Hubei Province(2024AFD362).

0 引言

为实现“双碳”目标,我国正在积极推进能源侧的低碳化转型,以光伏和风电为代表的分布式新能源发展迅速^[1-4]。但随着新能源并网规模的持续增大,电力系统的新能源消纳问题变得日趋严峻且系统调峰困难问题凸显^[5-6]。为降低调峰和消纳过程的成本,现有研究将用户侧灵活性资源作为电力系统调峰和新能源消纳的重要资源。因此,用户侧灵活性资源的灵活性潜力评估对保证其参与电力系统调峰和新能源消纳过程的有效性而言显得尤为重要。

现有研究中,已有部分学者对电动汽车和空调等灵活性资源参与电力系统调峰和新能源消纳的灵活性潜力评估进行了相关研究^[7-12]。如文献[7]结合电动汽车用户的客观响应能力和主观响应意愿,进而建立了用户响应潜力评估模型。文献[8]利用四象限法对影响需求响应潜力的可调节能力和响应度等重要因素进行分析,进而评估电动汽车充电负荷的响应潜力。文献[9]结合小区住户的充电行为特性,利用数学解析法对住宅小区电动汽车有序充电潜力进行了定量评估。为便于空调负荷参与系统调度,文献[10]综合考虑用户热舒适度、意愿度及可控度等多重因素,进而建立了空调负荷聚合响应潜力评估模型。为克服居民空调负荷的差异化,文献[11]通过建立居民热舒适指标进而计算不同居民空调负荷集群的调控潜力。文献[12]考虑了需求响应后反弹效应对电网的影响,进而提出一种考虑反弹效应的空调负荷可调潜力评估方法。上述文献主要针对用能方式单一的需求侧负荷进行灵活性潜力评估。

随着氢能的广泛应用,一种可同时使用氢能和电能的氢电混动汽车应运而生^[13]。作为一种用能方式灵活的新能源汽车,FCHEV可实现由氢能向电能的转换,并可有效促进能源-交通系统的深度融合和绿色低碳转型^[14]。同时也因FCHEV具有用能方式灵活的特点,故其可作为未来电力系统调峰和新能源消纳的新途径。FCHEV逐渐成为了近几年的研究热点:1)一些学者关注FCHEV能量管理的相关研究,如文献[15]建立了燃料电池的退化模型,有效提高了FCHEV运行过程的经济性。为实现安全行驶和优化功耗的目标,文献[16]提出了一

种基于改进粒子群算法的FCHEV队列分层优化控制策略。文献[17]提出优化自动驾驶FCHEV的车速轨迹和能源管理策略以最大限度地减少能源消耗。2)一部分学者关注FCHEV参与优化调度方面,如文献[18]通过构建多区域综合能源系统运营商与FCHEV之间氢价补贴-充能响应的主从博弈模型,优化得出了不同场景下的最优氢价补贴。为充分挖掘FCHEV对提高电力系统灵活性和推动碳减排的积极作用,文献[19]建立了考虑电碳耦合的能源交通融合系统优化调度模型。文献[20]针对威胁电网安全稳定运行的拥堵和过载问题,提出了一种基于FCHEV的跨能源系统最优调度框架。

综上,现阶段关于FCHEV的研究主要停留在能量管理和控制策略上,较少有学者关注灵活性潜力评估方面。对FCHEV集群进行灵活性潜力评估,难点在于:1)能否对FCHEV充能模型进行精确建模;2)如何有效克服因不同车主自身情况各不相同,导致其充能意愿存在一定差异性的问题;3)如何合理刻画车主参与响应时在响应意愿度上的差异。

针对上述问题,本文提出一种计及车主充能意愿差异性的FCHEV集群灵活性潜力评估方法。首先,为统一衡量车内电、氢储量,以等效里程模型为基础对FCHEV充能模型进行精确建模。其次,改进层次分析法并结合熵权法,建立车主充能意愿综合评价体系并得出相应的评价指标,以刻画潜力评估过程中车主充能意愿的差异性。最后,综合考虑车主禀赋效应和环保意识对其响应意愿度的影响,提出车主积极响应偏向程度因子以反映车主在响应意愿度上的差异性。通过所建立的车主充能意愿综合评价体系和积极响应偏向程度因子可有效克服FCHEV车主差异性对潜力评估过程造成的困难,保证所提评估方法的有效性。

1 单体FCHEV充能负荷模型

在对FCHEV集群进行灵活性潜力评估之前,需建立可合理刻画FCHEV充能特性的单体FCHEV充能模型,同时作为一种连接能源-交通系统的新载体,需基于其行驶特性进行充能建模。

1.1 城市交通路网模型

作为电、氢负荷的重要载体,FCHEV的出行过程会受到交通信息的影响,其充电、加氢行为也

影响着电网运行的经济性和安全性。采用图论分析法对城市交通路网进行建模^[21-22], 如图 1 所示。

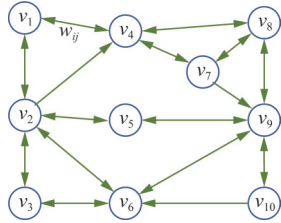


图 1 城市交通路网拓扑结构

Fig. 1 Topology of urban traffic road network

在图 1 中, 双向箭头表示双向道, 单向箭头表示单行道, 路网拓扑数学模型描述如式(1)所示。

$$\begin{cases} G = (V, E, U, W) \\ V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\} \\ E = \{v_{ij} | v_i \in V, v_j \in V, i \neq j\} \\ U = \{t | t = 1, 2, \dots, T\} \\ W = \{w'_{ij} | v_{ij} \in E, t \in U\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G 为交通路网; V 为图 G 中所有节点的集合; E 为图 G 中所有路段的集合; U 为划分的时间段的集合, 将全天分为 T 个时间段; W 为图 G 中反映各个道路实际交通路况的路段权值的集合; v_i 表示节点 i 所处节点; v_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的路段; w'_{ij} 为 t 时刻节点 i 与节点 j 之间的道路路阻; n 为交通路网中所有节点的总数。

其中, 路段权值 W 受多种因素的影响。针对城市交通路网的实际交通状况, 引入时间-流量模型进行建模分析。在城市路网中, 路口交叉节点多设置信号灯进行管控, 车辆行驶既受到路段阻抗影响, 又在交叉节点产生时间延误。因此, 城市道路路阻可表示为:

$$w'_{ij} = N'_i + L'_{ij} \quad (2)$$

式中: w'_{ij} 为 t 时刻节点 i 与节点 j 之间的道路路阻; N'_i 为 t 时刻节点 i 的节点阻抗; L'_{ij} 为 t 时刻节点 i 与节点 j 之间的路段阻抗。

依据城市交通状况划分标准, 饱和度评价指标 u 为: 畅通 ($0 < u < 0.6$)、缓行 ($0.6 < u < 0.8$)、拥挤 ($0.8 < u < 1.0$) 以及严重拥堵 ($1.0 < u < 2.0$)。道路交叉口和路段通行能力不同, 可以得到不同饱和度对应的路段阻抗和节点阻抗模型, 进而得到城市道路路阻模型^[23-24]。

1) 节点阻抗模型

$$N'_i =$$

$$\begin{cases} N'_i = \frac{9}{10} \left[\frac{h(1-\delta)^2}{2(1-\delta u)} + \frac{u^2}{2r(1-u)} \right], 0 < u \leq 0.6 \\ N'_i = \frac{h(1-\delta)^2}{2(1-\delta u)} + \frac{1.5(u-0.6)}{1-u} u, u > 0.6 \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 为路段饱和度评价指标, 其值等于路段交通流量与通行能力的比值; h 为信号周期; δ 为绿信比; r 为路段车辆到达率; N'_i 、 N'_i 分别为 u 处于 0~0.6 之间、大于 0.6 时节点 i 的节点阻抗。

2) 路段阻抗模型

$$L'_{ij} = \begin{cases} L'_{ij} = t_0(1 + \alpha(u)^\beta), & 0 < u \leq 1.0 \\ L'_{ij} = t_0(1 + \alpha(2-u)^\beta), & 1.0 < u \leq 2.0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_0 为路段零流量的时刻; α 、 β 为路段阻抗影响因子; L'_{ij} 、 L'_{ij} 分别为 u 处于 0~1.0、1.0~2.0 之间时节点 i 与节点 j 之间的路段阻抗。

3) 道路路阻模型

$$w'_{ij} = \begin{cases} L'_{ij} + N'_i, & 0 < u \leq 0.6 \\ L'_{ij} + N'_i, & 0.6 < u \leq 0.8 \\ L'_{ij} + N'_i, & 0.8 < u \leq 1.0 \\ L'_{ij} + N'_i, & 1.0 < u \leq 2.0 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 单体 FCHEV 充能建模

1.2.1 车辆行驶特性

为模拟 FCHEV 的出行特性, 引入起止(origin-destination, OD)矩阵方法进行分析, OD 起止概率矩阵如式(6)所示。

$$\xi'_{ij} = \frac{c'_{ij}}{\sum_{j=1}^M c'_{ij}}, (1 < i, j < n, i \neq j) \quad (6)$$

式中: ξ'_{ij} 、 c'_{ij} 分别为 t 时段交通节点 i 到节点 j 之间的出行概率和车辆通行量; M 为与节点 i 相邻的节点的集合; n 为交通路网中所有节点的数量。

在得到 FCHEV 起止 OD 矩阵的基础上, 采用实时 Dijkstra 算法搜寻 OD 间最短路线, 如式(7)~(8)所示。

$$Y'_{ij} = \sum_{v_{ij} \in E} [v_{ij} w'_{ij}] \quad (7)$$

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & v_{ij} \in p(i) \\ 0, & v_{ij} \notin p(i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_{ij} 为道路边权, $v_{ij}=1$ 表示在实际行驶路径 $p(i)$, $v_{ij}=0$ 表示不在实际行驶路径 $p(i)$; E 为城市交

通路网中所有路段的集合。

1.2.2 等效里程模型

为统一衡量FCHEV内的电池能量和氢气质量,将里程作为重要的参考指标^[14],对FCHEV内电池能量和氢气质量进行建模。经简化后FCHEV的里程表达式如式(9)所示。

$$R_{i,t} = \frac{E_{i,t}^B}{\eta_B(M_{\text{veb}} + C)} + \frac{M_{i,t}^H}{\eta_H(M_{\text{veb}} + C)} \quad (9)$$

式中: $R_{i,t}$ 为第 i 辆 FCHEV 在 t 时刻的等效里程; $E_{i,t}^B$ 、 $M_{i,t}^H$ 分别为第 i 辆 FCHEV 在 t 时刻的储电量和存储氢气的质量; η_B 、 η_H 分别为 FCHEV 的电能消耗效率以及氢能消耗效率; M_{veb} 为 FCHEV 不含电池组的车辆质量; C 为常数项,其值在分母中占比很小。

式(9)可进一步简化,故FCHEV的等效可行驶里程可表示为:

$$R_{i,t} = S_{\text{OE},i,t} E_i^{\text{max}} \xi_{\text{E-R}} + S_{\text{OH},i,t} M_i^{\text{max}} \xi_{\text{M-R}} \quad (10)$$

式中: $S_{\text{OE},i,t}$ 、 $S_{\text{OH},i,t}$ 分别为第 i 辆 FCHEV 在 t 时刻的电、氢储能状态值; $\xi_{\text{E-R}}$ 、 $\xi_{\text{M-R}}$ 分别为 FCHEV 电池容量、氢质量与等效里程的转换系数,其中 $\xi_{\text{E-R}} = 1/\eta_B(M_{\text{veb}} + C)$, $\xi_{\text{M-R}} = 1/\eta_H(M_{\text{veb}} + C)$; E_i^{max} 、 M_i^{max} 分别为第 i 辆 FCHEV 内电池、储氢罐的最大容量, $S_{\text{OE},i,t} E_i^{\text{max}} = E_{i,t}^B$, $S_{\text{OH},i,t} M_i^{\text{max}} = M_{i,t}^H$ 。

1.2.3 单体FCHEV充能模型

现有研究一般将纯电动汽车看作虚拟储能进行充能建模,而FCHEV因其用能方式灵活的特点,在对其进行充能建模时,需考虑车内电、氢能实时变化,为此,将FCHEV看作一种特殊的虚拟储能进行车内电、氢能源的充能建模^[18-20],如式(11)——(17)所示。

$$S_{\text{OE},i,t} = S_{\text{OE},i,t-1} + \eta_{\text{ch}} P_{i,t-1}^{\text{cha}} / E_i^{\text{max}}, t \in [t_{\text{arr}}, t_{\text{dep}}] \quad (11)$$

$$S_{\text{OH},i,t} = S_{\text{OH},i,t-1} + m_{i,t-1}^H / M_i^{\text{max}}, t \in [t_{\text{arr}}, t_{\text{dep}}] \quad (12)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{cha}} \leq P_i^{\text{cha,max}} \quad (13)$$

$$0 \leq m_{i,t}^H \leq m_i^{\text{H,max}} \quad (14)$$

$$R_{i,t_{\text{dep}}} \geq R_i^{\text{der}} \quad (15)$$

$$R_{i,t_{\text{dep}}} - R_{i,t_{\text{arr}}} = \Delta R_i = \Delta R_{\text{E},i} + \Delta R_{\text{H},i} \quad (16)$$

$$\Delta R_{\text{E},i} = \zeta_{\text{E},i} \Delta R_i, \Delta R_{\text{H},i} = \zeta_{\text{H},i} \Delta R_i \quad (17)$$

式中: η_{ch} 为 FCHEV 内电池的库伦效率; $P_{i,t-1}^{\text{cha}}$ 、 $m_{i,t-1}^H$ 分别为第 i 辆 FCHEV 在 $t-1$ 时刻的充电功率、加氢量; $P_i^{\text{cha,max}}$ 、 $m_i^{\text{H,max}}$ 分别为第 i 辆 FCHEV 充电功率、加氢量的最大值; $R_{i,t_{\text{arr}}}$ 、 $R_{i,t_{\text{dep}}}$ 分别为第 i 辆

FCHEV 到达、离开充能站时的等效里程; R_i^{der} 为第 i 辆 FCHEV 车主的期望等效里程; t_{arr} 、 t_{dep} 分别为 FCHEV 到达、离开充能站的时刻; ΔR_i 为第 i 辆 FCHEV 在充能站经过充电加氢后的总等效里程变化值; $\Delta R_{\text{E},i}$ 、 $\Delta R_{\text{H},i}$ 分别为第 i 辆 FCHEV 等效里程变化值中等效电里程、等效氢里程的变化值; $\zeta_{\text{E},i}$ 、 $\zeta_{\text{H},i}$ 分别为 FCHEV 车主 i 通过充电、加氢方式对应的等效里程变化值占总等效里程变化值的比例。

式(11)——(12)分别为FCHEV内实时的电、氢储量;式(13)——(14)分别限制了FCHEV单位时间内的充电功率和加氢量;式(15)保证了每辆FCHEV离开充能站时车内能量可行驶里程都达到了期望等效里程;式(16)——(17)分别为FCHEV经过充能后等效里程变化值中等效电、氢里程的占比。

2 车主充能意愿综合评价体系

由于FCHEV具有用能方式灵活的特性,故不同车主的充能行为决策具有一定的差异性。为合理刻画FCHEV车主充能行为的差异性,需深入探究各种因素对车主充能行为决策造成的影响。

2.1 车主充能意愿评价指标

从行为心理学角度出发,“充能成本”、“充能时长”、“碳减排意识”以及“充能安全性”4个评价指标是影响FCHEV车主充能行为的主要因素,如图2所示。

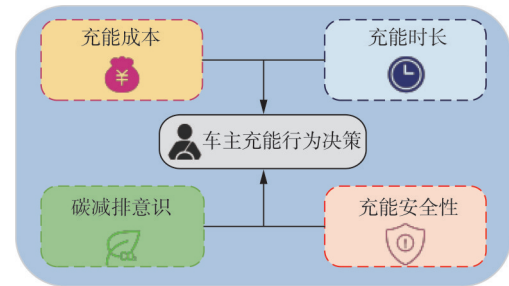


图2 车主充能行为决策

Fig. 2 Vehicle charging behavior decision

2.1.1 充能成本

由于FCHEV充电和加氢的能源单价差异较大,行驶相同的里程,氢燃料电池汽车所需加氢成本约为纯电汽车所需充电成本的5~10倍。为此,FCHEV车主在面临充能选择时需考虑到“充能成本”这一重要指标,如式(18)所示。

$$x_1 = \begin{cases} e^{-c_s}, & 0 < c_s < c_s^{\text{Tr}} \\ e^{-c_s^{\text{Tr}}}, & c_s \geq c_s^{\text{Tr}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： x_1 为车主“充能成本”评价指标值； c_s 为车主充能达到期望等效里程所需的预期成本； c_s^{Tr} 为车主的充能成本心理阈值。其中，车主“充能成本”评价指标值越高，越偏向于充电； e 为车主的受教育水平。

2.1.2 充能时长

充电和加氢两种充能方式在充能时长上也有较大的差异，FCHEV加氢到“满氢”状态所需时间约为“充电”方式的1/36。集群内FCHEV车主的“充能时长”评价指标可由式(19)计算得出。

$$x_2 = \begin{cases} e^{-t_d}, & 0 < t_d < t_d^{\text{Tr}} \\ e^{-t_d^{\text{Tr}}}, & t_d \geq t_d^{\text{Tr}} \end{cases} \quad (19)$$

式中： x_2 为车主“充能时长”评价指标值； t_d 为车主充能达到期望等效里程所需的预期时长； t_d^{Tr} 为车主的充能时长心理阈值。其中，车主“充能时长”评价指标值越小，其到达充能站时更偏向于加氢。

2.1.3 碳减排意识

FCHEV车主的行为决策并不是完全理性的，会受其他社会意识的影响。其中，“碳减排意识”作为一种典型的社会意识，也影响着FCHEV车主的充能行为决策。车主“碳减排意识”越高，其在充能站更偏向于加氢。其中，车主的年龄、受教育水平以及政府环保政策激励强度是影响其“碳减排意识”最重要的3个因素，其具体关系如式(20)~(23)所示^[10, 25]。

$$x_3 = \lambda_e \lambda_a \lambda_i / \max(\lambda_e, \lambda_a, \lambda_i) \quad (20)$$

$$\lambda_e = \begin{cases} q_1, & 0 < e \leq \varepsilon_1 \\ q_2, & \varepsilon_1 < e \leq \varepsilon_2 \\ q_3, & \varepsilon_2 < e \leq \varepsilon_3 \end{cases} \quad (21)$$

$$\lambda_a = q_4 e^{-\frac{(a-\phi)^2}{2}} \quad (22)$$

$$\lambda_i = 1 - e^{-i} \quad (23)$$

式中： x_3 为车主“碳减排意识”评价指标值； λ_e 、 λ_a 、 λ_i 分别为车主受教育水平影响系数、年龄影响系数以及政府环保政策激励影响系数； ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为车主的受教育水平； ϕ 为车主年龄阈值，限制了集群内车主的最小年龄，其值取为18岁； a 、 i 分别为车主的年龄以及政府环保政策激励强度； $q_1=0.3$ 、 $q_2=0.5$ 、 $q_3=0.8$ ； q_4 为车主年龄函数 $e^{-\frac{(a-\phi)^2}{2}}$ 与年龄影响

系数之间的转换系数，其值取0.9。

2.1.4 充能安全性

因FCHEV即可使用电能又可使用氢能，而氢能在安全性方面需进行一番考量，故“充能安全性”也是影响FCHEV车主充能行为决策的重要因素。集群内FCHEV车主的“充能安全性”评价指标如式(24)所示。

$$x_4 = \begin{cases} q_5, & 0 < s_a < s_a^{\text{Tr}} \\ \frac{1}{1 + e^{-s_a}}, & s_a \geq s_a^{\text{Tr}} \end{cases} \quad (24)$$

式中： x_4 为车主“充能安全性”评价指标值； s_a 为车主“充能安全性”认可度，其值随着车内氢气量的增加而降低； s_a^{Tr} 为车主“充能安全性”认可度的心理阈值； $q_5=0.2$ 。其中，车主“充能安全性”评价指标值越小，其更偏向于充电。

2.2 多指标综合权重确定

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵权法被广泛常应用于组合权重的计算^[26-28]。但传统AHP法适应性较差，本文对传统AHP法加以改进以提升主观权重计算时的适应性。同时，利用熵权法衡量指标的离散程度。基于此，将改进AHP法和熵权法组合形成综合权重，使得权重在不失主观性的前提下又兼具客观性，具体流程如下。

1) 改进层次分析法

采用改进AHP法计算FCHEV车主充能意愿评价指标的主观权重，通过标度构造法构建判断矩阵，所构建的判断矩阵均满足一致性检验。表1为标度值含义表。

表1 标度值含义

Tab. 1 Meanings of scale values

标度值	含义
1.0	2个指标同等重要
1.2	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 稍微重要
1.4	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 强烈重要
1.6	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 明显重要
1.8	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 绝对重要

首先，构建的判断矩阵需满足的条件为： $a_{ij} > 0$ ， $a_{ii}=1$ ， $a_{ij}=1/a_{ji}$ ， $a_{ij}=a_{ik}a_{kj}$ 。其中， a_{ij} 为第*i*项指标相对于第*j*项指标的标度值，标度值的含义如表1所示。

然后，设有*n*项指标 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，按照重要

程度递减的原则为所有的指标进行排序,并依据表1所给数据确定指标 x_i 和 x_{i+1} 之间的重要度关系记为 g_i ,可得到所有相邻指标之间的标度值。根据重要程度的传递性得到判断矩阵 $A=[a_{ij}]_{n \times n}$ 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & g_1 & \cdots & \prod_{i=1}^{n-1} g_i \\ 1/g_1 & 1 & \cdots & \prod_{i=2}^{n-1} g_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\prod_{i=1}^{n-1} g_i & 1/\prod_{i=2}^{n-1} g_i & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

最后,经式(20)计算可得各项指标的主观权重 w_j^1 为:

$$w_j^1 = (\prod_{i=1}^n a_{ij})^{1/n} / \sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n} \quad (26)$$

式中: a_{ij} 为判断矩阵 A 的元素,表示第 i 项指标相对于第 j 项指标的标度值; n 为评价指标的数量。

2) 熵权法

熵权法是从客观角度出发,通过观察数据的客观规律对指标进行赋权。本文利用熵权法计算FCHEV车主充能意愿评价指标的客观权重,具体步骤如下。

首先,确定每个FCHEV车主各项指标的评价矩阵。

$$X = [x_{i,j}]_{m \times n} \quad (27)$$

式中: m 为FCHEV车主的数量; n 为FCHEV车主充能意愿评价指标的数量; $x_{i,j}$ 为车主 i 第 j 项评价指标的值。

然后,由于每个评价指标的量纲不同,在进行计算之前需对各个指标对应的数据进行规范化处理。

正向指标的规范化处理:

$$x_{i,j}^s = \frac{x_{i,j} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (28)$$

负向指标的规范化处理:

$$x_{i,j}^s = \frac{\max(x_j) - x_{i,j}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (29)$$

式中 $x_{i,j}^s$ 为经过规范化处理后对应指标的值。

其次,计算各项评价指标的信息熵。信息熵可有效衡量指标的差异性,其值越大则代表离散程度越大。因此,利用信息熵可衡量评价指标对综合指标 k_{ij} 的权重。

$$k_{ij} = x_{i,j}^s / \sum_{i=1}^m x_{i,j}^s \quad (30)$$

$$r_j = -D \sum_{i=1}^m k_{ij} \ln k_{ij} \quad (31)$$

式中: r_j 为指标 j 的信息熵;当 k_{ij} 为0时, $k_{ij} \ln k_{ij} = 0$; $D=1/\ln m$ 。

最后,计算各项指标的客观权重,如式(32)所示。

$$w_j^2 = (1 - r_j) / \sum_{j=1}^n (1 - r_j) \quad (32)$$

3) 综合权重

通过采用改进AHP法、熵权法从主观、客观角度对车主充能意愿评价指标进行主、客观权重确定后,通过组合计算获得综合权重。

$$w_j = \frac{\sqrt{w_j^1 w_j^2}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{w_j^1 w_j^2}} \quad (33)$$

式中 w_j 为FCHEV第 j 项评价指标的综合权重。

2.3 充能意愿综合评价指标计算

利用改进AHP法和熵权法对FCHEV车主各项评价指标进行权重确定后,可计算出车主充能意愿综合评价指标的值,如式(34)所示。

$$s_i = \sum_{j=1}^n w_{i,j} x_{i,j}, s_i \in [s^{\min}, s^{\max}] \quad (34)$$

式中: s_i 为车主 i 的充能意愿综合评价指标值; $w_{i,j}$ 为车主 i 第 j 项评价指标的综合权重; $s^{\max}$ 、 $s^{\min}$ 分别为最大、最小综合评价指标值。

基于上述的充能意愿综合评价指标值,可计算出车主期望通过充电、加氢方式对应的等效里程增加值占总等效里程增加值的比例。

$$\zeta_{E,i} = (s^{\max} - s_i) / (s^{\max} - s^{\min}) \quad (35)$$

$$\zeta_{E,i} + \zeta_{H,i} = 1 \quad (36)$$

式中 $\zeta_{E,i}$ 和 $\zeta_{H,i}$ 分别为FCHEV车主 i 通过充电、加氢方式对应的等效里程变化值占总等效里程变化值的比例。

3 FCHEV集群灵活性潜力评估模型

FCHEV因其可同时使用氢能和电能特性,当其接入系统时可为系统同时提供电功率以及氢功率的灵活性。但由于每个FCHEV车主自身的禀赋效应及环保意识具有差异,造成其参与响应的意愿并不相同,故在对FCHEV集群进行灵活性潜力评估前需合理刻画每个车主的响应意愿。

3.1 车主响应意愿度

为研究 FCHEV 可以提供的灵活性潜力，有必要首先刻画其参与响应的意愿度，如式(37)所示。

$$f_{i,c}^r = f_{i,c}^p + \tau_i(f_{i,c}^o - f_{i,c}^p) \quad (37)$$

式中： $f_{i,c}^r$ 、 $f_{i,c}^o$ 、 $f_{i,c}^p$ 分别为激励电价为 c 时第 i 个车主的响应意愿度、积极响应意愿度和消极响应意愿度，三者关系如图 3 所示； τ_i 为 FCHEV 车主 i 的积极响应偏向程度因子，其值越大车主越偏向于积极响应。图 3 为车主积极、消极响应意愿度。

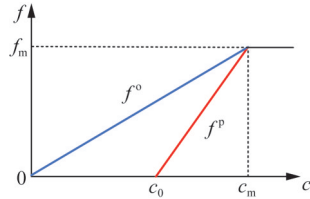


图 3 车主积极、消极响应意愿度

Fig. 3 Positive and negative response willingness degrees of vehicle owners

图 3 中， f_m 为车主最大响应率； c_m 为响应饱和激励电价； c_0 为消极响应临界激励电价。

集群内车主的构成较为复杂，每个车主参与积极、消极响应的偏向程度各不相同。为此，从车主的行为心理学角度出发，考虑车主禀赋效应以及环保意识对其参与积极响应偏向程度的影响。因此，车主的积极响应偏向程度可由式(34)计算得出。

$$\tau_i = \frac{1}{2} (\sqrt{1 - E_i^c} + \sqrt{E_i^a}), E_i^c, E_i^a \in [0, 1] \quad (38)$$

式中 E_i^c 、 E_i^a 分别为车主 i 的禀赋效应、环保意识因子。图 4 为车主的积极响应偏向程度因子 τ_i 的变化范围， E_i^c 越趋近于 1 且 E_i^a 越趋近于 0，则 τ_i 越趋近于 0，即车主越偏向于消极响应；反之，则偏向于积极响应。

图 4 为积极响应偏向度变化范围。

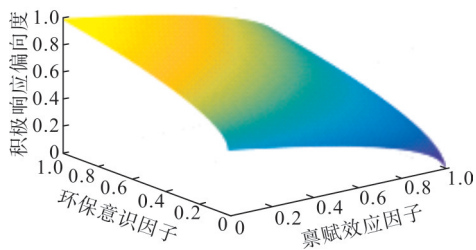


图 4 积极响应偏向度变化范围

Fig. 4 Variation ranges of positive response bias degrees

3.2 灵活性潜力评估模型

在灵活性潜力评估过程中，先建立最小化 FCHEV 集群充能成本模型^[29]，并求解出 FCHEV 集群原始充电功率，模型如下。

$$\min F_0 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_t P_{i,t}^{\text{cha}} + C^H m_{i,t}^H) \quad (39)$$

s.t. 式(10)–(17)

式中： C_t 为 t 时刻的电力批发市场电价； C^H 为单位加氢价格； T 为调度周期； N 为 FCHEV 集群的车辆数量。

求解模型(39)，得到 FCHEV 集群原始充电功率 $P_{i,t}^{\text{cha},0}$ 和加氢量 $m_{i,t}^{H,0}$ ，进而计算 FCHEV 集群充电负荷功率可调裕度，如式(40)–(43)所示。

$$P_t^{\text{CL}, \min} \leq P_t^{\text{CL}} \leq P_t^{\text{CL}, \max} \quad (40)$$

$$P_{i,t}^H = f_{i,c}^r (m_{i,t}^{H,0} \xi_{\text{M-R}} / \xi_{\text{E-R}} \Delta h) \quad (41)$$

$$P_t^{\text{CL}, \min} = \sum_{i=1}^N \left\{ \theta_{i,t} \left[\frac{P_{i,t}^{\text{cha},0} - P_{i,t}^H - f_{i,c}^r (P_{i,t}^{\text{cha},0} - P_i^{\text{cha}, \min})}{f_{i,c}^r (P_{i,t}^{\text{cha},0} - P_i^{\text{cha}, \min})} \right] \right\} \quad (42)$$

$$P_t^{\text{CL}, \max} = \sum_{i=1}^N \left\{ \theta_{i,t} \left[P_{i,t}^{\text{cha},0} - f_{i,c}^r (P_{i,t}^{\text{cha},0} - P_i^{\text{cha}, \max}) \right] \right\} \quad (43)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{cha},0}$ 、 $m_{i,t}^{H,0}$ 分别为电力批发市场电价背景下 t 时刻第 i 辆 FCHEV 的原始充电负荷功率、加氢量； $P_t^{\text{CL}, \max}$ 、 $P_t^{\text{CL}, \min}$ 分别为 FCHEV 集群在 t 时刻充电功率 P_t^{CL} 可上、下调的裕度； $\theta_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 辆 FCHEV 接入充能站的状态值； $P_{i,t}^H$ 为第 i 辆 CHEV 在 t 时刻通过“加氢”代替“充电”而获得的充电功率可下调裕度； Δh 为单位时间间隔。

式(40)为 FCHEV 集群充电功率 P_t^{CL} 的可调裕度；式(41)为 FCHEV 通过“加氢”代替“充电”而获得的充电功率可下调裕度；式(42)–(43)分别为 FCHEV 集群充电功率可下、上调裕度。

基于上述背景提出 FCHEV 集群的灵活性潜力评估方法，如图 5 所示，具体步骤为：

Step1: 建立 FCHEV 所处城市的交通路网模型，并计算车主充能意愿综合评价指标；

Step2: 在 Step1 基础上建立单体 FCHEV 充能模型；

Step3: 基于 Step2 建立最小化 FCHEV 集群充电成本的优化模型；

Step4: 求解 Step3 建立的优化模型，得出 FCHEV 集群的原始充电负荷功率曲线；

Step5: 考虑 FCHEV 车主的禀赋效应及环保意

识,进而计算出车主的响应意愿度;

基于Step4和5计算并输出FCHEV集群充电负荷功率的可调范围。

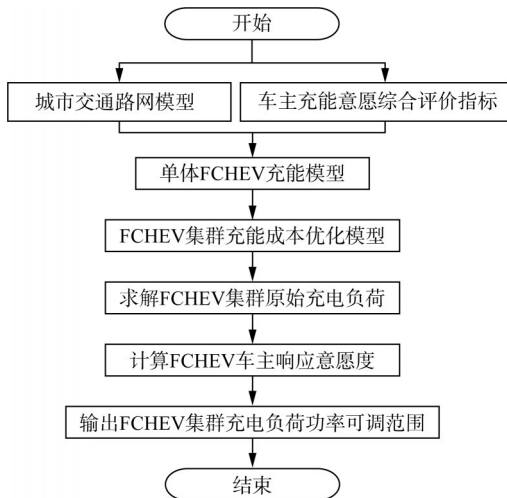


图5 FCHEV集群灵活性潜力评估流程

Fig. 5 Assessment process of FCHEV cluster flexibility potential

当FCHEV参与系统优化调度时,评估得到的FCHEV集群充电功率可调范围可作为其参与系统需求响应时充电负荷功率调节的上下限约束。

4 算例分析

4.1 算例参数

本文以一个改进的24节点城市交通路网为例进行仿真分析,路网拓扑结构如图6所示^[24]。该城市交通路网中含有2000辆FCHEV,FCHEV的车辆和出行特征参数分别如表2—3所示^[18-20]。集群内FCHEV出行的起始、目的节点以及车主的禀赋效应、环保意识因子符合随机分布。电力批发市场的电价以及需求响应激励价格如图7所示,单位加氢价格为45元/kg^[18]。车主最大响应率 f_m 为1,响应饱和激励电价 c_m 和消极响应临界激励电价 c_0 分别为1.4、0.6元/kWh^[29]。

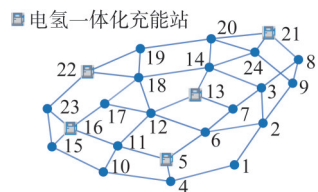


图6 24节点城市交通路网拓扑结构

Fig. 6 Topology of a urban traffic road network with 24 nodes

表2 FCHEV的车辆特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of FCHEV

参数	数值	参数	数值
$\xi_{E-R}/(\text{km} \cdot \text{kWh}^{-1})$	9	$\xi_{M-R}/(\text{km} \cdot \text{kg}^{-1})$	200
$E_i^{\max}/(\text{kWh})$	50	$M_i^{\max}/\text{kg}$	3
$P_i^{\text{cha}, \max}/\text{kW}$	17.5	η_{ch}	0.9

表3 FCHEV的出行特征参数

Tab. 3 Trip characteristic parameters of FCHEV

参数	分布
出行起始时段/h	正态分布 $N(9, 4)$
充电站停留时长/h	随机分布 $U(4, 10)$
初始电、氢量SOC	正态分布 $N(0.15, 0.1)$
目标里程/km	正态分布 $N(405, 65)$

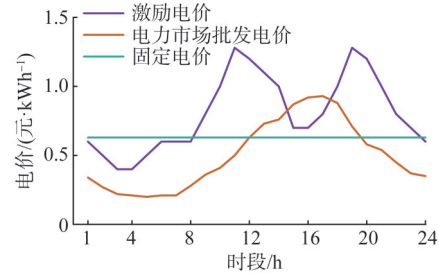


图7 电力批发市场电价及需求响应激励价格

Fig. 7 Electricity prices in wholesale electricity markets and demand response incentive prices

4.2 评估结果分析

基础算例中集群内车主的4个充能意愿评价指标参数设置为:车主的“充能成本”、“充能时长”、“充能安全性”评价指标值符合 $U(0.45, 0.55)$ 的随机分布,同时车主的受教育水平均为“中学(取0.5,教育水平取值范围为0.3~0.8)”、年龄符合 $U(25, 35)$ 的随机分布、政府环保政策激励强度取值为中(取0.5,政策激励强度取值范围为0.2~0.9)。

电力批发市场电价实施前后,FCHEV集群的充电负荷如图8所示。可以看出,电力批发市场电价实施后,集群充电功率呈现“多峰”状,这是由于FCHEV车主的趋利性进而选择在低电价时段充电。因此,图8中电力批发市场电价实施后集群充电负荷高峰时段对应图7中的低电价时段。

FCHEV集群灵活性潜力评估结果如图9所示。图9(a)、(b)分别为不考虑、考虑通过“加氢”代替原有“充电”方式进而为FCHEV集群提供的灵活性潜力,即式(42)中的 $P_{i,t}^H$ 部分。图9(b)中集群的充电功率可下调裕度大于图9(a)。因此,灵活的用能

方式可有效促进 FCHEV 集群灵活性潜力的提高。

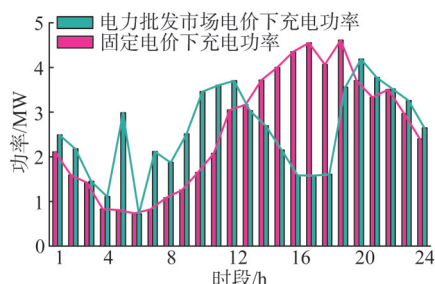


图8 电力批发市场电价前后 FCHEV 集群充电功率

Fig. 8 FCHEV cluster charging powers before and after the electricity prices in the wholesale electricity market

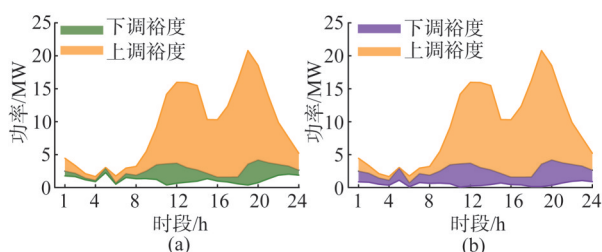


图9 FCHEV 集群灵活性潜力评估结果

Fig. 9 FCHEV cluster flexibility potential assessment results

同时,由于 FCHEV 车主具有趋利性,造成激励价格“低谷时段”集群内车主参与响应的意愿远低于激励价格“高峰时段”。因此,在时段 11—14 和 18—21, FCHEV 集群充电功率的可调裕度较大,即该时段集群的灵活性潜力较大;而在时段 1—7, FCHEV 集群的灵活性潜力较小。为此,在电力系统负荷高峰时段,也可通过设置合理的激励价格引导 FCHEV 集群内的车主参与响应,以达到电力系统的“削峰填谷”及“可再生能源消纳”等目的。

4.3 充能意愿评价指标对评估结果的影响分析

为探究车主充能意愿评价指标对集群灵活性潜力评估结果的影响,设置了不同的案例进行对比分析。由 2.1 节可知,“充能成本”指标和“充能时长”指标影响车主充能意愿的趋势大致相同,再结合 3.2 节可知,两个指标影响集群灵活性潜力评估结果的趋势也大致相同;“碳减排意识”指标和“充能安全性”指标同理。为此,以“碳减排意识”和“充能成本”两个指标为代表,探究车主充能意愿的差异性对集群灵活性潜力评估结果的影响。

4.3.1 “碳减排意识”对评估结果的影响分析

由 2.1 节相关内容可知,FCHEV 车主“碳减排意识”强弱主要与其受教育水平、年龄以及政府环

保政策激励强度有关。因此,为探究“碳减排意识”对集群灵活性潜力评估结果的影响,设置了两个案例进行对比分析,如表 4 所示。同时,案例 1 和 2 中集群内所有车主的其他 3 个评价指标均处于中值,即均取 0.5。

表 4 案例 1 和 2 的参数设置

Tab. 4 Parameter settings for cases 1 and 2

指标	案例 1	案例 2
政策激励强度	高(0.9)	低(0.2)
车主年龄	小于 30 岁(≤ 30)	大于 40 岁(≥ 40)
车主受教育水平	大学(0.8)	小学(0.3)

注:政策激励强度取值范围为 0.2~0.9;教育水平取值范围为 0.3~0.8。

案例 1 和 2 的集群灵活性潜力评估结果分别如图 10—11 所示。

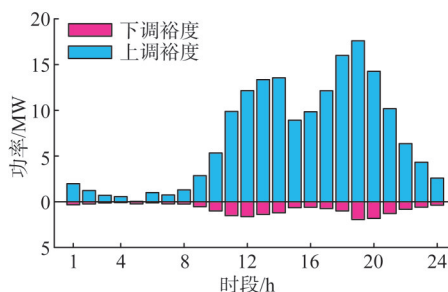


图 10 案例 1 的灵活性潜力评估结果

Fig. 10 Results of the flexibility potential assessment for case 1

相比于图 10,图 11 中集群充电功率可下调的裕度更大。这是由于案例 1 中集群内车主的年龄普遍较低,受教育水平普遍较高且政府环保政策激励强度较高,造成整个集群车主的“碳减排意识”相较于案例 2 普遍更高。同时,两个案例中集群内车主的其他指标均处于中值。因此,案例 1 内车主的充能意愿综合评价指标值普遍高于案例 2,即案例 1 中的车主相较于案例 2 更偏向于“加氢”。最后由于案例 1 的集群充电负荷功率低于案例 2,进而造成案例 1 的集群灵活性潜力低于案例 2。因此,随着集群内车主“碳减排意识”的增强,集群的灵活性潜力则会降低。

4.3.2 “充能成本”对评估结果的影响分析

从 2.1 节的相关描述中可知,“充电”和“加氢”两种充能方式的成本差距较大。由于集群内车主自身的经济情况各不相同,造成集群内车主的“充能成本”敏感度亦有差距。因此,为探究车主“充能成

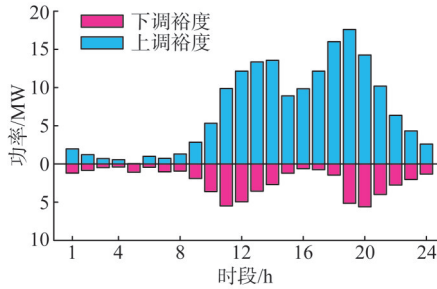


图11 案例2的灵活性潜力评估结果

Fig. 11 Results of the flexibility potential assessment for case 2

本”对集群灵活性潜力评估结果的影响,设置了两个案例进行对比分析,如表5所示。

表5 案例3和4的参数设置

Tab. 5 Parameter settings for cases 3 and 4

指标	案例3	案例4
“充能成本”	0.8	0.3
“充能时长”	0.5	0.5
“碳减排意识”强弱	0.5	0.5
“充能安全性”	0.5	0.5

案例3和4的集群灵活性潜力评估结果分别如图12和图13所示。图12中的充电功率可下调的裕度大于图13。原因在于:相较于案例4,案例3中集群内车主的“充能成本”敏感度更高,其到达充能站时更偏向于“充电”。因此,案例3中集群的充电负荷功率高于案例4,进而造成其充电功率可下调的裕度大于案例4,即案例3中集群的灵活性潜力高于案例4。为此,通过分析可知,随着集群内车主“充能成本”敏感度的增强,集群的灵活性潜力则随之升高。

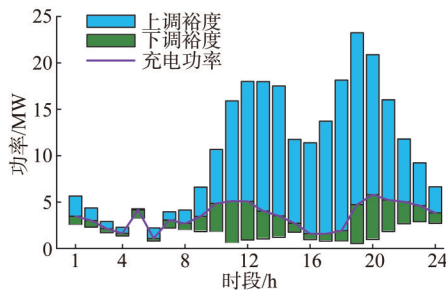


图12 案例3的灵活性潜力评估结果

Fig. 12 Results of the flexibility potential assessment for case 3

4.4 积极响应偏向度对评估结果的影响分析

如第3节相关内容所述,FCHEV车主的积极响应偏向度也会影响集群灵活性潜力评估结果。为探

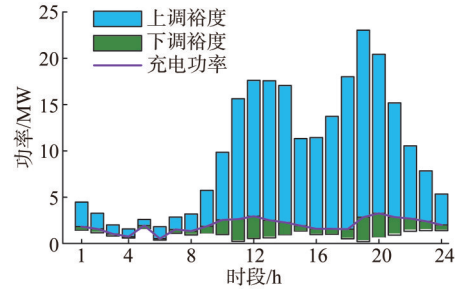
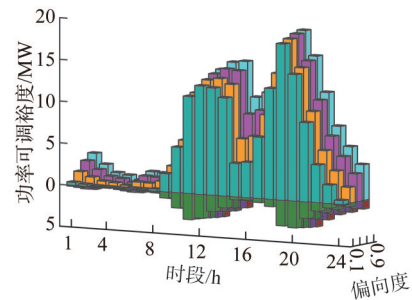


图13 案例4的灵活性潜力评估结果

Fig. 13 Results of the flexibility potential assessment for case 4

究不同的积极响应偏向度对评估结果的影响,分别设置集群内车主的 τ 为“0.1、0.4、0.7、0.9”4种场景进行对比分析,结果如图14所示。

图14 车主在不同 τ 的评估结果对比Fig. 14 Comparison of the assessment results of the vehicle owners at different τ

可以看出,在实际调度功率相同的背景下,当集群车主的 τ 增大时可上、下调的裕度也随之增大,即集群灵活性潜力增大。原因在于:在某一时刻,对单个FCHEV车主而言,其积极响应偏向度 τ 越大,其更偏向于积极响应。同时在相同的激励价格下, $f_{i,c}^o$ 总是大于等于 $f_{i,c}^p$ 。故随着车主积极响应偏向度 τ 的增大其参与响应的意愿度 $f_{i,c}^r$ 也随之增大,即车主参与响应可提供的调节裕度也随之增大。因此,当集群内车主的积极响应偏向度 τ 增大时集群的灵活性潜力也随之增大。

5 结论

针对现有研究在“FCHEV集群灵活性潜力评估”方面的缺失,本文提出一种计及车主充能意愿差异性的FCHEV集群灵活性潜力评估方法。经案例仿真对比分析,得出了以下结论。

1)建立的车主充能意愿综合评价体系,合理刻画了集群内车主充能意愿的差异性,可有效预测

FCHEV 集群的充电负荷曲线, 便于对其进行潜力评估。

2) 从行为心理学出发, 考虑禀赋效应和环保意识对车主参与响应意愿度的影响, 刻画了 FCHEV 车主在参与响应意愿上的差异。

3) 所提 FCHEV 集群灵活性潜力评估方法, 保证了评估结果的有效性, 当 FCHEV 参与系统响应时可有效提高电力系统的灵活性。

后续将在现有灵活性潜力评估结果的基础上对 FCHEV 以聚合方式参与电-氢系统优化调度进行研究。

参考文献

- [1] 赵书强, 吴博, 李志伟, 等. 风电-储能参与调频的高比例风电电力系统运行经济性分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 69-76.
ZHAO Shuqiang, WU Bo, LI Zhiwei, et al. Operational economic analysis of high-proportion wind power system with wind power and energy storage participating in frequency regulation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 69-76.
- [2] 张丹, 常东旭, 曾丕江, 等. 含高比例新能源和小水电的孤网频率稳定特性及涉网参数优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 11-18.
ZHANG Dan, CHANG Dongxu, ZENG Pijiang, et al. Frequency stability characteristics and optimization of grid-rated parameters for isolated grids with high proportion of new energy and small hydropower [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 11-18.
- [3] 金梦, 朱鑫要, 周前. 新能源对电网调峰特性影响定量评估及应用[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 70-76.
JIN Meng, ZHU Xinyao, ZHOU Qian. Quantitative assessment of influence of renewable energy on peak regulation characteristics of power grid and its application [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 70-76.
- [4] 邓序之, 刘淇, 叶傲霜, 等. 基于气象耦合特征分析及改进 XGBoost 算法的用户分布式光伏短期出力预测模型[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 80-89.
DENG Xuzhi, LIU Qi, YE Aoshuang, et al. Short-term output forecasting model of user side distributed photovoltaic based on meteorological coupling characteristics analysis and improved XGBoost algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 80-89.
- [5] 韩小齐, 刘文颖, 庞清仑, 等. 考虑日前现货市场风险的电力负荷参与系统调峰控制模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 55-67.
HAN Xiaoqi, LIU Wenying, PANG Qinglun, et al. Peak shaving control model of power load participation system considering day-ahead spot market risk [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 55-67.
- [6] CLAIRAND J M, RODRÍGUEZ-GARCÍA J, ÁLVAREZ-BEL C. Assessment of technical and economic impacts of EV user behavior on EV aggregator smart charging [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2): 356-366.
- [7] 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.
- [8] 张新, 岳园园, 曾好, 等. 面向电网规划的重点需求侧资源响应潜力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 162-170.
ZHANG Xin, YUE Yuanyuan, ZENG Hao, et al. Response potential evaluation method of key demand-side resources for power grid planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 162-170.
- [9] 陈旭, 杨柳, 杨振刚, 等. 住宅小区电动汽车有序充电潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 122-128.
CHEN Xu, YANG Liu, YANG Zhengang, et al. Assessment of orderly charging potential of electric vehicles in residential areas [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 122-128.
- [10] 杨秀, 傅广努, 刘方, 等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699-708.
YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 699-708.
- [11] 金旭, 张远实, 李明, 等. 考虑热舒适度的居民空调负荷调控潜力差异化评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 50-58.
JIN Xu, ZHANG Yuanshi, LI Ming, et al. Differentiation evaluation of regulation potential for residential air conditioning load considering thermal comfort [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 50-58.
- [12] 龙寰, 赵烁, 吴志, 等. 考虑反弹效应的空调负荷可调潜力评估与控制策略研究[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3638-3647.
LONG Huan, ZHAO Shuo, WU Zhi, et al. Adjustable potential evaluation and control strategy of air conditioning loads considering rebound effect [J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3638-3647.
- [13] RUDOLF T, SCHÜRMANN T, SCHWAB S, et al. Toward holistic energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles in heavy-duty applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(6): 1094-1114.
- [14] 赵德洁. 考虑电转氢的电-车优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [15] 林歆悠, 李雪凡, 林海波. 考虑燃料电池衰退的 FCHEV 反馈优化控制策略[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 153-161.
LIN Xinyou, LI Xuefan, LIN Haibo. Optimization feedback control strategy based ECMS for plug-in FCHEV considering fuel cell decay [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 153-161.
- [16] 朱兰馨, 聂枝根. 考虑坡度工况的 FCHEV 队列分层优化控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(11): 13-19.
ZHU Lanxin, NIE Zhigen. Hierarchical optimal control strategy for FCHEV queue considering gradient operation

- condition[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11): 13–19.
- [17] MESHGINQALAM A, BAUMAN J. Integrated convex speed planning and energy management for autonomous fuel cell hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1072–1086.
- [18] 赵楠, 王俊, 黄桦, 等. 计及氢电混合动力车响应的多区域综合能源系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 257–264.
- ZHAO Nan, WANG Jun, HUANG Hua, et al. Coordinated optimal scheduling of multi-region integrated energy system with electric-hydrogen hybrid vehicle response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 257–264.
- [19] 陈为佳, 李庚银, 张天策, 等. 计及碳配额交易的氢电混动汽车集群调度方法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3069–3077.
- CHEN Weijia, LI Gengyin, ZHANG Tiance, et al. A scheduling approach for fuel-cell hybrid electric vehicle fleets considering carbon allowance trading[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3069–3077.
- [20] ZHAO Dejie, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Dispatching fuel-cell hybrid electric vehicles toward transportation and energy systems integration[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(4): 1540–1550.
- [21] ZENG Jie, TANG Jinjun. Modeling dynamic traffic flow as visibility graphs: a network-scale prediction framework for lane-level traffic flow based on Ipr data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(4): 4173–4188.
- [22] 徐原, 马伟哲, 赵利刚, 等. 基于CIM模型的多粒度潮流计算数据生成方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 40–47.
- XU Yuan, MA Weizhe, ZHAO Ligang, et al. Multi-granularity power flow calculation data construction method based on CIM[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 40–47.
- [23] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充放电时空灵活性优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 88–97.
- [24] ZHENG Yuanshuo, LI Feng, DONG Jiuling, et al. Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle-road-grid mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 88–97.
- [25] 李晓辉, 李磊, 刘伟东, 等. 基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 117–125.
- LI Xiaohui, LI Lei, LIU Weidong, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117–125.
- [26] 秦玉洁. “双碳”目标背景下城市居民消费碳减排意愿及减排特征研究[D]. 杭州: 浙江财经大学, 2022.
- [27] 黄婧杰, 李金成, 刘科明, 等. 含CVaR及增广 ε -约束法的多目标光储电站容量优化配置[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 94–103.
- HUANG Jingjie, LI Jincheng, LIU Keming, et al. Optimal allocation of multi-objective photovoltaic energy storage charging station capacity with CVaR and augmented ε -constraint method[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 94–103.
- [28] 王凌云, 李梦娇, 杨雨琪, 等. 基于ISSO-PP组合赋权的双向区间约束正态云模型的换流站阀冷系统冷却能力研究[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 27–37.
- WANG Lingyun, LI Mengjiao, YANG Yuqi, et al. Research on the cooling capacity of the valve cooling system in converter station based on the ISSO-PP combined weighting bidirectional interval constrained normal cloud model[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 27–37.
- [29] 曹华珍, 王天霖, 张黎明, 等. 基于组合赋权-TOPSIS交直流配电网能效评估[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3): 55–67.
- CAO Huazhen, WANG Tianlin, ZHANG Liming, et al. Energy efficiency evaluation of AC/DC distribution network based on combined weighting TOPSIS[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 55–67.
- [30] 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.

收稿日期: 2024-06-03; 网络首发日期: 2024-12-10

作者简介:

王秋杰(1988), 男, 副教授, 博士, 研究方向为综合能源系统优化运行与规划、弹性配电网, wangqiuji@ctgu.edu.cn;

刘观辉(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为负荷聚合体构建与优化调度, ctguguanhuiliu@foxmail.com;

谭洪(1991), 男, 通信作者, 硕士生导师, 博士, 研究方向为综合能源系统优化运行与规划、电力市场, tanhong@ctgu.edu.cn。