

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221699

考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究

胡志勇¹, 郭雪丽¹, 王爽¹, 徐从明², 李婷婷¹, 周玮²

(1. 国网南阳供电公司经济技术研究所, 河南 南阳 473000; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 可再生能源大规模并网, 给电力系统安全运行带来了严峻的挑战。需求侧资源(如电动汽车、空调)具有巨大的需求响应潜力, 能够参与电网有功调度, 积极消纳可再生能源。因此, 提出了考虑响应意愿的电动汽车-空调集群需求响应策略。首先, 考虑价格、荷电状态及温度等多重因素的影响, 基于 Takagi-Sugeno-Kang 模糊模型量化了电动汽车群和空调集群的响应意愿, 采用三角隶属度函数描述意愿的不确定性。在此基础上, 建立了电动汽车-空调集群响应潜力评估模型, 获取集群需求响应的可调度裕度。然后, 考虑价格型需求响应负荷、风光发电以及响应意愿的不确定性, 建立了激励型需求响应策略模型。根据模糊机会约束规划理论, 将模糊期望约束和模糊机会约束转化为确定性的清晰等价形式。最后, 通过算例仿真分析验证了模型的有效性和可行性。

关键词: 需求响应; 不确定性; 模糊规划理论; 响应意愿

Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness

HU Zhiyong¹, GUO Xueli¹, WANG Shuang¹, XU Congming², LI Tingting¹, ZHOU Wei²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473000, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The large-scale renewable energy grid-connection has brought a great challenge to the safe operation of power systems. Demand side resources (such as electric vehicles and air conditioners) have great demand response potential and can participate in the active power dispatching of the power grid and actively absorb renewable energy. Therefore, this paper proposes a demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness. First, considering the influence of multiple factors such as price, state of charge and temperature, the response willingness of electric vehicles and air conditioners is quantified based on the Takagi-Sugeno-Kang fuzzy model, and the uncertainty of willingness is described by a triangular membership function. Then a response potential evaluation model of the electric vehicle and air conditioners is established to obtain a schedulable margin of the cluster demand response. Then, considering the uncertainty of price demand response load, wind power generation and response willingness, an incentive demand response strategy model is established. From fuzzy chance constraint programming theory, the fuzzy expectation constraint and the fuzzy chance constraint are transformed into a clear equivalent form of certainty. Finally, the effectiveness and feasibility of the model are verified by numerical simulation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873048).

Key words: demand response; uncertainty; fuzzy scheduling theory; response willingness

0 引言

为了实现“双碳”目标^[1], 在系列国家政策的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873048); 国网河南省电力公司 2022 年度重点科技项目资助《配电网分布式能源接纳能力评估与提升技术研究》(521780220001)

大力扶持下, 以风电和光伏为主的分布式新能源迅速发展^[2], 并呈现分层、多点接入的特征。随着并网规模的持续增大, 配电网中新能源功率倒送、弃风弃光等消纳问题凸显。以电动汽车、空调等柔性负荷为代表的响应需求为解决新能源消纳问题提供了有效的解决思路。电动汽车作为新能源交通工具, 其产业发展受到国家政策的大力支持。国务院办公

厅印发《新能源汽车产业发展规划(2021-2035)》，明确提出到 2035 年电动汽车要成为销售汽车的主流^[3]，电动汽车保有量将会大幅激增，大规模电动汽车将会接入配电网^[4]。随着经济快速发展及人民生活水平不断提高，空调负荷也不断增加，在上海、江苏、浙江等经济发达地区空调负荷峰荷占比甚至超过 50%，并呈现逐年上升趋势^[5]。因此，电动汽车、空调负荷的需求响应潜力巨大，如何制定合理的需求响应策略，以实现电动汽车、空调与可再生新能源的协调优化，从而促进新能源的消纳，是亟待解决的关键问题。

需求响应是指负荷侧用户针对市场价格信号和激励机制主动改变原有用电消费模式的行为^[6]，分为价格型需求响应和激励型需求响应。在价格型需求响应中，主要利用价格需求弹性矩阵研究分时电价对用户用电负荷的影响^[7-8]，基于确定的弹性系数值分析负荷的变化，没有考虑负荷响应的不确定性对需求响应结果的影响。在激励型需求响应中，主要研究通过制定合适的激励价格进行响应决策优化^[9-11]。文献[9]按照阶梯激励价格刺激用户响应系统调度，以源荷储运行成本最小为目标优化决策；文献[10]考虑用户响应特性，以综合需求响应实现成本最小为目标建立服务商和用户的需求响应协同优化策略；文献[11]建立了激励价格动态变化的需求响应参与电网优化调度，响应决策提高了微电网和用户的利益。但是，以上研究侧重于激励价格对需求响应柔性负荷的调度，忽略了对柔性电负荷的响应潜力进行合理的准确评估。大量的柔性负荷可以通过聚合建模以挖掘响应潜力，文献[12]建立温控负荷的近似聚合模型，计算空调负荷的稳态聚合功率，文献[13]考虑负荷的热力学模型和人体舒适度模型评估负荷聚合响应潜力，但以上文献未考虑响应意愿对负荷响应潜力的影响。需求响应的响应程度受到价格激励以及用电状态等因素的影响，用户响应程度是合理评估需求响应潜力的重要影响因素^[14]。现有研究基于消费者心理学^[15]或者用户响应意愿^[16]的方法描述需求响应实际状况。基于消费者心理学的响应行为模型将电价变化对用户响应的影响分为死区、线性区和饱和区，刻画出价格对响应程度的影响。而用户响应意愿不仅考虑了价格对用户响应程度的影响，用户本身的荷电状态也对响应程度起着决定作用。Takagi-Sugeno-Kang(TSK)模糊模型具有良好的非线性逼近能力，被广泛应用到系统辨识、模式识别以及数据处理等多个领域^[16]，因此选用该方法量化响应意愿，探究柔性负荷的需求响应潜力。

针对上述问题与挑战，本文提出了考虑响应意

愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究。首先，考虑价格、电池荷电状态(state of charge, SOC)及温度等多重因素的影响，基于 Takagi-Sugeno-Kang(TSK)模糊模型量化了电动汽车群(electric vehicles, EVs)和空调集群(air conditioners, ACs)的响应意愿。在此基础上，建立了电动汽车群-空调集群响应的可调度裕度模型，以此评估集群的需求响应潜力。然后，考虑风光发电以及响应意愿的不确定性，建立了激励型需求响应策略模型。根据模糊机会约束规划理论，将模糊期望约束和模糊机会约束转化为确定性的清晰等价形式进行优化求解。最后，通过算例仿真分析，验证了模型的有效性和可行性。

1 考虑意愿不确定性的电动汽车群-空调集群可调度裕度模型

电动汽车、空调发展迅速，作为柔性负荷的典型代表，两者具有不同的用电特性。电动汽车用电负荷具有很强的时间特性，会出现用电高峰和用电低谷时刻；而在外界环境温度变化不大的前提下，空调的负荷特性呈现平缓的用电趋势，各个时刻用电量变化不大。因此，作为两种不同用电特性的柔性负荷代表，研究在需求响应策略的实施下，两者的需求响应可调度裕度以及用电负荷调整特性。

1.1 电动汽车群可调度裕度模型

电动汽车作为柔性负荷，可参与配网侧的需求响应。鉴于单个电动汽车调度容易造成计算维数的激增，本文以电动汽车群为单位作为需求响应策略的调度对象。电动汽车群可调度裕度的有效评估，是实施需求响应策略的前提。汽车群的响应意愿是影响可调度裕度的重要因素，首先对电动汽车群的响应意愿进行量化。由于用户对激励缺乏重视、通信延迟和消费行为改变等因素的影响，导致需求响应意愿及实际响应程度都存在明显的不确定性^[17-18]，可以用三角隶属度函数描述响应意愿的不确定性。然后在考虑响应意愿不确定性的基础上，评估汽车群的可调度裕度。

1.1.1 基于 TSK 模型量化的汽车群响应意愿

采用 TSK 模糊模型量化集群的响应意愿，考虑汽车电池 SOC 和激励价格对需求响应意愿的影响。基于以上影响因素，利用 TSK 模糊建模方法建立响应意愿模型的步骤为：首先，定义电池 SOC 和激励价格对应的模糊集子集分别为“SOC 低”、“SOC 中”和“SOC 高”和“价格低”、“价格中”和“价格高”；然后，模糊子集对应的隶属度函数为梯形隶属度函数，电池 SOC 和激励价格对应的隶属度函数值作为

TSK 模糊规则的输入; 最后, 每个 SOC 与价格的模糊子集通过既定的模糊规则对应一个响应意愿函数。以“SOC 低”和“价格低”模糊子集为例, TSK 模糊规则定义为

IF (S is S_{low}) and (C is C_{low}), THEN $\lambda^i = f^i(S, C)$ (1)
式中: S 和 C 分别为电池 SOC 和激励价格; S_{low} 和 C_{low} 分别表示模糊子集“SOC 低”和“价格低”; λ_i 为第 i 条模糊规则下响应意愿值; $f^i(\cdot)$ 为第 i 条模糊规则的函数表达式。本文中第 i 条模糊规则的函数表达式为线性函数, 如式(2)所示。

$$f^i(S, C) = a_0^i + a_1^i \cdot S + a_2^i \cdot C \quad (2)$$

式中, a_0^i 、 a_1^i 、 a_2^i 为第 i 条模糊规则的固定参数。

所有 SOC 与价格的模糊子集的组合都有相应的隶属度值以及对应模糊规则下的响应意愿。电动汽车群的响应意愿表示为所有模糊规则的加权平均值, 具体表达式为

$$\lambda_{EV} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_{EV,p}^i(x_1^{EV}) \mu_{EV,S}^i(x_2^{EV}) f_{EV}^i(x_{EV})}{\sum_{i=1}^K \mu_{EV,p}^i(x_1^{EV}) \mu_{EV,S}^i(x_2^{EV})} \quad (3)$$

式中: $\mu_{EV,p}^i$ 和 $\mu_{EV,S}^i$ 为模糊子集对应的隶属度函数; x_1^{EV} 为输入变量汽车激励平均价格; x_2^{EV} 为输入变量汽车群电池 SOC; M 为模糊规则的数量; λ_{EV} 为电动汽车群的响应意愿值; f_{EV}^i 为汽车群对应的模糊规则; x_{EV} 为输入向量(x_1^{EV} , x_2^{EV})。

在实际需求响应过程中, 响应意愿必然存在一定的不确定性。采用三角隶属度函数描述响应意愿的不确定性程度。电动汽车群响应意愿的模糊表达式为

$$\tilde{\lambda}_{EV} = (\lambda_1^{EV}, \lambda_2^{EV}, \lambda_3^{EV}) \begin{cases} \lambda_2^{EV} = \lambda_{EV} \\ \lambda_1^{EV} = r_1^{EV} \lambda_{EV} \\ \lambda_3^{EV} = r_3^{EV} \lambda_{EV} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\tilde{\lambda}_{EV}$ 为汽车群响应意愿的模糊表达式; λ_1^{EV} 、 λ_2^{EV} 、 λ_3^{EV} 为响应意愿的三角隶属度参数; r_1^{EV} 和 r_3^{EV} 为比例系数, 且 $0 < r_1^{EV} < 1$, $r_3^{EV} > 1$, 比例系数借助专家系统获得。

1.1.2 基于不确定性响应意愿的电动汽车群可调度裕度

准确评估电动汽车群的可调度裕度是制定需求响应策略的重要前提。假设共有 N_{EV} 辆电动汽车, t 时刻汽车群的平均 SOC 为 $S(t)$, 则 $t+1$ 时刻汽车群的 SOC^[19]为

$$S(t+1) = S(t) + \frac{\eta_{ch} P_{EV}(t) \Delta t - (1 - K(t)) N_{EV} \frac{M_{unit}}{\eta_{em}} v(t) \Delta t}{N_{EV} B_{av}} \quad (5)$$

式中: η_{ch} 为电动汽车充电效率; P_{EV} 为汽车群充电功率; $K(t)$ 为汽车 t 时刻的停驶概率; M_{unit} 为汽车每公里消耗的机械能; η_{em} 为电能转化为机械能的效率; v 为电动汽车的行驶速度; B_{av} 为汽车群的电池平均容量; Δt 为 t 与 $t+1$ 时刻之间的时间间隔。

电动汽车群未参与需求响应时, 在满足汽车出行的同时, 根据电网购电价格以充电成本最小为目标安排汽车充电计划, 如式(6)所示。

$$\min F_0 = \min \left(\sum_{t=1}^T C_{tou}(t) P_0^{EV}(t) \right) \quad (6)$$

式中: T 为日前决策的时段总数; C_{tou} 为从主网购电价格; P_0^{EV} 为汽车群参与需求响应前的充电功率。

根据电动汽车群参与需求响应前原始功率, 结合汽车群响应意愿量化模型, 可以得到电动汽车群参与激励型需求响应的可调度裕度为

$$\tilde{P}_{min,t}^{EV} \leq P_{EV}(t) \leq \tilde{P}_{max,t}^{EV} \quad (7)$$

$$\tilde{P}_{min,t}^{EV} = P_{0,t}^{EV} - \tilde{\lambda}_{EV,t} (P_{0,t}^{EV} - P_{min,t}^{agg}) \quad (8)$$

$$\tilde{P}_{max,t}^{EV} = P_{0,t}^{EV} - \tilde{\lambda}_{EV,t} (P_{0,t}^{EV} - P_{max,t}^{agg}) \quad (9)$$

$$P_{min,t}^{agg} = 0 \quad (10)$$

$$P_{max,t}^{agg} = K(t) N_{EV} p_{ch} \quad (11)$$

式中: $\tilde{P}_{min,t}^{EV}$ 和 $\tilde{P}_{max,t}^{EV}$ 分别为汽车群可调度裕度下限和上限; $P_{min,t}^{agg}$ 和 $P_{max,t}^{agg}$ 分别为汽车群聚合充电功率的最小值和最大值; $P_{0,t}^{EV}$ 为时刻 t 汽车群参与需求响应前原始充电功率; p_{ch} 为每辆电动汽车额定充电功率。

1.2 空调集群可调度裕度模型

空调也是生活中常见的柔性负荷^[20], 数量多分布广, 具有重要的需求响应潜力。本文以空调集群为调度单位制定需求响应策略, 按照 1.1 节中电动汽车群需求响应策略的步骤, 首先对空调集群的响应意愿进行量化, 然后在考虑响应意愿不确定性的基础上评估空调集群的可调度裕度。

1.2.1 基于 TSK 模型量化的空调集群响应意愿

考虑室内温度和激励价格对空调集群需求响应意愿的影响, 利用 1.1 节中 TSK 模糊模型方法建立空调集群的响应意愿模型。空调温度要求等效为虚拟储能模型, 因此定义室内温度和激励价格对应的模糊子集分别为虚拟储能“SOC 低”、“SOC 中”、“SOC 高”和“价格低”、“价格中”、“价格高”。同样采用梯形隶属度函数, 按照空调集群的预定义

模糊规则，集群响应意愿表达式为

$$\lambda_{AC} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_{AC,p}^i(x_1^{AC}) \mu_{AC,T}^i(x_2^{AC}) f_{AC}^i(x_{AC})}{\sum_{i=1}^K \mu_{AC,p}^i(x_1^{AC}) \mu_{AC,T}^i(x_2^{AC})} \quad (12)$$

式中： $\mu_{AC,p}^i$ 和 $\mu_{AC,T}^i$ 为模糊子集对应的隶属度函数； x_1^{AC} 为输入变量空调激励平均价格； x_2^{AC} 为输入变量空调集群的虚拟储能 SOC； λ_{AC} 为空调集群的响应意愿值； x_{AC} 为输入向量 (x_1^{AC}, x_2^{AC}) 。

空调集群响应意愿的模糊表达式为

$$\tilde{\lambda}_{AC} = (\lambda_1^{AC}, \lambda_2^{AC}, \lambda_3^{AC}) \quad (13)$$

$$\begin{cases} \lambda_2^{AC} = \lambda_{AC} \\ \lambda_1^{AC} = r_1^{AC} \lambda_{AC} \\ \lambda_3^{AC} = r_3^{AC} \lambda_{AC} \end{cases}$$

式中： $\tilde{\lambda}_{AC}$ 为空调集群响应意愿的模糊表达式； λ_1^{AC} 、 λ_2^{AC} 、 λ_3^{AC} 为响应意愿的三角隶属度参数； r_1^{AC} 和 r_3^{AC} 为比例系数，且 $0 < r_1^{AC} < 1$ ， $r_3^{AC} > 1$ 。

1.2.2 基于不确定性响应意愿的空调集群可调度裕度

空调属于温控负荷，根据用户舒适度要求，将室温控制在 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 之间。空调温度模型可以等效为虚拟储能模型，当房间温度高于 θ_{\max} 时，空调开启制冷，相当于电池在充电，当房间温度低于 θ_{\min} 时，空调关闭房间升温，相当于电池在放电。在小时级日前调度中，将空调集群功率视为整体，空调集群的虚拟储能模型^[21]为

$$S_{AC}(t+1) = \frac{\theta_{\max,t} - \theta_{a,t} + \eta R \frac{P_{AC}(t)}{N_{AC}}}{\theta_{\max,t} - \theta_{\min,t}} \cdot (1 - e^{-\frac{1}{RH}}) + S_{AC}(t) \cdot e^{-\frac{1}{RH}} \quad (14)$$

式中： S_{AC} 为空调等效储能的荷电状态； $\theta_{\min,t}$ 和 $\theta_{\max,t}$ 分别为时刻 t 温度可调节裕度下限和上限； $\theta_{a,t}$ 为时刻 t 室外温度， $^{\circ}\text{C}$ ； R 为房间等效热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$ ； η 为空调能效比； H 为房间等效热容， $\text{kWh}/^{\circ}\text{C}$ ； P_{AC} 为空调集群用电功率； N_{AC} 为空调数量。

式(14)中 P_{AC} 可以根据文献[22]推断出，如式(15)所示。

$$P_{AC}(t) = N_{AC} E\left(\frac{1}{\eta R}\right) [\theta_a - E(\theta_{\text{set},t})] \quad (15)$$

式中： $\theta_{\text{set},t}$ 为时刻 t 室内温度设定值； $E(\cdot)$ 为变量的数学期望。

根据空调集群的聚合功率以及响应意愿量化模型，可以得到空调集群参与激励型需求响应的可

调度裕度为

$$\tilde{P}_{\min,t}^{AC} \leq P_{AC}(t) \leq \tilde{P}_{\max,t}^{AC} \quad (16)$$

$$\tilde{P}_{\min,t}^{AC} = P_{0,t}^{AC} - \tilde{\lambda}_{AC,t} \{P_{0,t}^{AC} - N_{AC} E\left(\frac{1}{\eta R}\right) [\theta_a - E(\theta_{\max,t})]\} \quad (17)$$

$$\tilde{P}_{\max,t}^{AC} = P_{0,t}^{AC} - \tilde{\lambda}_{AC,t} \{P_{0,t}^{AC} - N_{AC} E\left(\frac{1}{\eta R}\right) [\theta_a - E(\theta_{\min,t})]\} \quad (18)$$

$$P_{0,t}^{AC} = N_{AC} E\left(\frac{1}{\eta R}\right) [\theta_a - E(\theta_{\text{set},t}^0)] \quad (19)$$

式中： $\tilde{P}_{\max,t}^{AC}$ 和 $\tilde{P}_{\min,t}^{AC}$ 分别为空调集群可调度裕度上限和下限； $P_{0,t}^{AC}$ 为空调集群参与需求响应前原始聚合功率； $\theta_{\text{set},t}^0$ 为空调集群原始温度设定值。

2 考虑响应意愿的集群需求响应策略优化模型

在配电侧实施激励型需求响应策略时，需要考虑分时电价对柔性负荷的影响。国务院核准制定分时电价，引导基础柔性负荷响应电价的变化量，达到“削峰填谷”的效果。实际中，价格直接影响需求响应负荷量，响应误差的大小与电价变化量有关，根据两者之间的关系构建分时电价柔性负荷响应模型。对于配电侧可再生能源的“功率上翻”等消纳问题，电力企业可以在考虑分时电价对柔性负荷的影响下，制定激励型需求响应策略。在激励型需求响应中，根据可再生能源的预测出力以及基础柔性负荷的响应量，对电动汽车群、空调集群负荷施加合适的激励价格调整其用电量，提高可再生能源的消纳量以及用电负荷的经济性。需求响应策略整体流程图如图1所示。

2.1 分时电价下基础负荷建模

通过分时电价的制定引导用户优化用电行为，根据基础负荷不同时段实际用电量调整用电价格，起到“削峰填谷”的效果，即为价格型需求响应。需求弹性矩阵是价格型需求响应行为的表征方法之一。已知需求响应弹性矩阵的前提下，分时电价调整后的基础用电负荷模型具体如式(20)一式(24)。

$$\mathbf{P}_L^{\text{PDR}} = \mathbf{P}_0^{\text{PDR}} + \Delta \mathbf{P} = \mathbf{P}_0^{\text{PDR}} + \mathbf{P}_{D0} \mathbf{E} \Delta \mathbf{C} \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_0^{\text{PDR}} = [l_1^0 \quad l_2^0 \quad \cdots \quad l_T^0]^T \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{D0} = \begin{bmatrix} l_1^0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & l_2^0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_k^0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

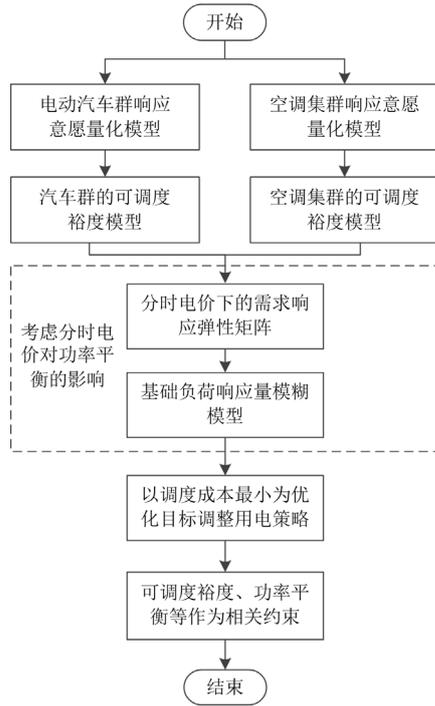


图1 需求响应策略整体框图

Fig. 1 Overall block diagram of demand response strategy

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1T} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{T1} & \varepsilon_{T2} & \cdots & \varepsilon_{TT} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Delta \mathbf{C} = \left[\frac{C_1^{\text{PDR}}}{C_1^0} - 1 \quad \frac{C_2^{\text{PDR}}}{C_2^0} - 1 \quad \cdots \quad \frac{C_T^{\text{PDR}}}{C_T^0} - 1 \right]^T \quad (24)$$

式中: $\mathbf{P}_0^{\text{PDR}}$ 为原用电负荷向量, 其元素为时段 t 的原用电负荷 l_t^0 ; $\mathbf{P}_L^{\text{PDR}}$ 为执行分时电价后现用电负荷向量, 其元素为时段 t 的现用电负荷 l_t^{PDR} ; $\Delta \mathbf{P}$ 为用电负荷变化向量; \mathbf{P}_{D0} 为原用电负荷对角阵, 对角元素为原用电负荷 l_t^0 , 其他元素均为零; $\Delta \mathbf{C}$ 为电价变化向量, 其中 C_t^0 为时段 t 的原电价, C_t^{PDR} 为时段 t 的现电价; \mathbf{E} 为需求弹性矩阵, 对角元素为自弹性系数, 非对角元素为交叉弹性系数, 弹性系数表达式为 $\varepsilon = \frac{\Delta P / P}{\Delta C / C}$, 其中 P 表示用电功率, C 表示电价。

实际上, 柔性负荷受价格影响时存在响应偏差, 响应偏差大小与电价变化量有关, 文献[23]指出响应偏差区间随着电价变化量的增大具有“先增大、后减小”的规律。根据上述规律, 构建负荷响应量不确定性的模糊表达式与电价变化量之间的关系式为

$$\begin{aligned} \tilde{P}_L^{\text{PDR}} &= (P_{\text{PDR}1}^{\text{vg}}, P_{\text{PDR}2}^{\text{vg}}, P_{\text{PDR}3}^{\text{vg}}) \\ \begin{cases} P_{\text{PDR}2}^{\text{vg}} &= P_L^{\text{PDR}} \\ P_{\text{PDR}1}^{\text{vg}} &= (1 - d_t) P_{\text{PDR}2}^{\text{vg}} \\ P_{\text{PDR}3}^{\text{vg}} &= (1 + d_t) P_{\text{PDR}2}^{\text{vg}} \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - e^{-a|\Delta c_t|}, & |\Delta c_t| \leq \Delta C_1 \\ 1 - e^{a|\Delta c_t| - 2a\Delta C_1}, & \Delta C_1 < |\Delta c_t| \leq \Delta C_{\max} \end{cases} \quad (26)$$

式中: \tilde{P}_L^{PDR} 为价格型需求响应负荷的模糊表达式; $P_{\text{PDR}1}^{\text{vg}}$ 、 $P_{\text{PDR}2}^{\text{vg}}$ 、 $P_{\text{PDR}3}^{\text{vg}}$ 为需求响应负荷的隶属度参数; d_t 为时段 t 响应负荷的最大误差水平, $d_t \geq 0$; a 为误差水平的参数; Δc_t 为时段 t 的电价变化量; ΔC_1 为拐点电价变化量; ΔC_{\max} 为电价变化量的上限。

2.2 激励型需求响应策略模型

2.2.1 优化目标

激励型需求响应通过激励补贴鼓励用户负荷调整用电量, 响应系统调度计划。根据用户负荷调整量按照阶梯价格补贴, 考虑弃风光发电成本, 激励型需求响应以调度成本最小为优化目标。

$$\min F = \min(F_1 + F_2 - F_3) \quad (27)$$

式中: F 为调度成本; F_1 为弃风光出力成本; F_2 为激励成本; F_3 为联络线功率增大的惩罚成本。

1) 弃风光成本

$$F_1 = \sum_{t=1}^T C_w P_{w,t}^{\text{cur}} \quad (28)$$

式中: $P_{w,t}^{\text{cur}}$ 为时段 t 弃风光容量期望值; C_w 为单位弃风光成本, 从系统运行的角度分析, 可用等弃风光量的火电发电成本和环境成本衡量弃风光成本。

2) 激励成本

$$F_{\text{IDR},t} = \begin{cases} C_{\text{IDR}}^1 \Delta P_{\text{IDR},t}, & 0 \leq \Delta P_{\text{IDR},t} \leq D_1 \\ \sum_{i=1}^N C_{\text{IDR}}^i D_i + C_{\text{IDR}}^{i+1} (\Delta P_{\text{IDR},t} - \sum_{i=1}^N D_i), & \sum_{i=1}^N D_i \leq \Delta P_{\text{IDR},t} \leq \sum_{i=1}^{N+1} D_i \end{cases} \quad (29)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^T F_{\text{IDR},t} \quad (30)$$

式中: F_{IDR} 为基于激励型需求响应对所调节负荷给予的补偿成本; C_{IDR}^i 为第 i 级对应的调节负荷阶梯价格; D_i 为第 i 级负荷调整量区段间隔; N 为阶梯补偿价格等级; $\Delta P_{\text{IDR},t}$ 为在 t 时段 IDR 负荷调整量的绝对值, 具体如式(31)、式(32)。

$$P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{EV}}(t) = \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{EV}} \quad (31)$$

$$P_{0,t}^{\text{AC}} - P_{\text{AC}}(t) = \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{AC}} \quad (32)$$

式中: $\Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{EV}}$ 为汽车群负荷调整量的绝对值; $\Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{AC}}$

为空调集群负荷调整量的绝对值。

3) 惩罚成本

$$F_3 = \sum_{t=1}^T C_{\text{pun},t} (P_{\text{line},t} - P_{\text{line},t}^0) \quad (33)$$

式中: C_{pun} 为惩罚系数; $P_{\text{line},t}$ 为联络线功率; P_{line}^0 为实施激励型需求响应策略前联络线的功率。

2.2.2 模糊期望/机会约束

1) 功率平衡约束

$$E(\tilde{P}_{w,t}) - P_{w,t}^{\text{cur}} + P_{\text{line},t} = E(\tilde{P}_{L,t}^{\text{PDR}}) + P_{\text{EV}}(t) + P_{\text{AC}}(t) \quad (34)$$

式中: $E(\tilde{P}_{w,t})$ 为风光出力预测期望值, $\tilde{P}_{w,t} = (P_{w1}^{\text{vg}}, P_{w2}^{\text{vg}}, P_{w3}^{\text{vg}})$, P_{w1}^{vg} 、 P_{w2}^{vg} 、 P_{w3}^{vg} 为风光出力的三角隶属度参数; $E(\tilde{P}_{L,t}^{\text{PDR}})$ 为价格型需求响应的基础柔性负荷期望值。

2) 电动汽车群功率调整量约束

$$\text{Cr}\{\tilde{P}_{\text{min},t}^{\text{EV}} \leq P_{\text{EV}}(t)\} \geq \beta \quad (35)$$

$$\text{Cr}\{P_{\text{EV}}(t) \leq \tilde{P}_{\text{max},t}^{\text{EV}}\} \geq \beta \quad (36)$$

式中: $\text{Cr}\{\}$ 为置信度表达式; β 为满足约束置信度。

3) 空调集群功率调整量约束

$$\text{Cr}\{\tilde{P}_{\text{min},t}^{\text{AC}} \leq P_{\text{AC}}(t)\} \geq \gamma \quad (37)$$

$$\text{Cr}\{P_{\text{AC}}(t) \leq \tilde{P}_{\text{max},t}^{\text{AC}}\} \geq \gamma \quad (38)$$

式中, γ 为满足约束的置信度。

2.2.3 其他约束条件

1) 联络线功率约束

$$P_{\text{line},t}^{\text{min}} \leq P_{\text{line},t} \leq P_{\text{line},t}^{\text{max}} \quad (39)$$

式中, $P_{\text{line},t}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{line},t}^{\text{min}}$ 分别为联络线功率的上、下限。

2) 反向负载率约束

$$\omega = -\frac{P_{\text{line}}}{S_c} \times 100\% \quad (40)$$

$$\omega \leq 80\% \quad (41)$$

式中, S_c 为变压器实际限值。

3) 弃风光功率约束

$$P_{\text{min}}^{\text{cur}} \leq P_{w,t}^{\text{cur}} \leq P_{\text{max}}^{\text{cur}} \quad (42)$$

式中, $P_{\text{max}}^{\text{cur}}$ 、 $P_{\text{min}}^{\text{cur}}$ 分别为弃风光功率的上、下限。

4) 空调的人体舒适度约束

$$0 \leq S_{\text{AC}}(t) \leq 1 \quad (43)$$

5) EVs 的 SOC 约束

$$S_{\text{min}} \leq S_{\text{EV}}(t) \leq S_{\text{max}} \quad (44)$$

式中, S_{max} 、 S_{min} 分别为汽车电池 SOC 的上、下限。

2.2.4 模糊约束的确定性表达

1) 模糊期望约束的确定性表达

功率平衡约束式(34)为模糊期望约束, 根据不

确定规划理论^[16]可以转化为确定性表达式, 如式(45)所示。

$$\frac{1}{4}(P_{w1}^{\text{vg}} + 2P_{w2}^{\text{vg}} + P_{w3}^{\text{vg}}) - P_{w,t}^{\text{cur}} + P_{\text{line},t} = \quad (45)$$

$$\frac{1}{4}(P_{\text{PDR1}}^{\text{vg}} + 2P_{\text{PDR2}}^{\text{vg}} + P_{\text{PDR3}}^{\text{vg}}) + P_{\text{EV}}(t) + P_{\text{AC}}(t)$$

2) 模糊机会约束的确定性表达

电动汽车群功率调整量约束式(35)、式(36)为模糊机会约束, 根据不确定规划理论可以转化为清晰等价类的确定性约束, 分别对应式(46)、式(47)。

$$-(2-2\beta)\lambda_2^{\text{EV}} [P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{min},t}^{\text{agg}}] - \quad (46)$$

$$(2\beta-1)\lambda_1^{\text{EV}} [P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{min},t}^{\text{agg}}] + \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{EV}} \leq 0$$

$$(2-2\beta)\lambda_2^{\text{EV}} [P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{max},t}^{\text{agg}}] + \quad (47)$$

$$(2\beta-1)\lambda_1^{\text{EV}} [P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{max},t}^{\text{agg}}] - \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{EV}} \leq 0$$

空调集群功率调整量约束式(37)、式(38)为模糊机会约束, 清晰等价类的确定性约束分别对应式(48)、式(49)。

$$-(2-2\gamma)\lambda_2^{\text{AC}} \{P_{0,t}^{\text{AC}} - N_{\text{AC}} E(\frac{1}{\eta R})[\theta_a - E(\theta_{\text{max},t})]\} -$$

$$(2\gamma-1)\lambda_1^{\text{AC}} \{P_{0,t}^{\text{AC}} - N_{\text{AC}} E(\frac{1}{\eta R})[\theta_a - E(\theta_{\text{max},t})]\} + \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{AC}} \leq 0 \quad (48)$$

$$(2-2\gamma)\lambda_2^{\text{AC}} \{P_{0,t}^{\text{AC}} - N_{\text{AC}} E(\frac{1}{\eta R})[\theta_a - E(\theta_{\text{min},t})]\} +$$

$$(2\gamma-1)\lambda_1^{\text{AC}} \{P_{0,t}^{\text{AC}} - N_{\text{AC}} E(\frac{1}{\eta R})[\theta_a - E(\theta_{\text{min},t})]\} - \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{AC}} \leq 0 \quad (49)$$

3 算例仿真

3.1 基础数据

假设某地区局部配电网中, 有 5000 辆电动汽车, 为分析简便起见, 假设电动汽车用电特性及参数均相同, 电动汽车充电功率为额定值。空调数量为 10 000 台, 假设用电参数及舒适度要求均相同, 空调用电功率为额定值。电动汽车、空调等各项参数如附录 A 表 A1 所示。风电、光伏发电预测出力及原始基础负荷如图 2 所示。分时电价前后用电价格如图 3 所示, 依据河南省 35~110 kV 以下现行的分时电价政策。用于激励的阶梯价格参数参考文献[9]如附录 A 表 A2 所示。模糊规则如附录 A 表 A3 所示, α 表示用户对影响因素价格和 SOC 的喜好参数。利用 Matlab 软件中 fmincon 函数按照内点法进行优化求解。

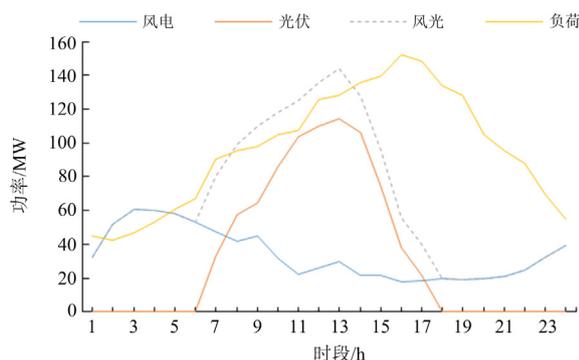


图2 风光预测出力及原始基础负荷

Fig. 2 Wind power forecast output and original base load

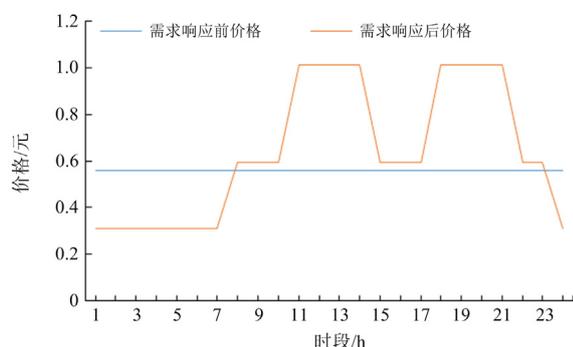


图3 价格型需求响应前后用电价格

Fig. 3 Electricity price before and after price demand response

3.2 仿真结果

3.2.1 分时电价下基础负荷前后对比分析

分时电价实施前后的结果如图4所示。分时电价的实施可以有效减小负荷的峰谷差，负荷的峰值由127.9 MW降低为117.1 MW，减小了8.4%；负荷的谷值由42.6 MW升高为45.7 MW，增加了7.3%。实际上，价格型需求响应负荷存在一定的不确定性，响应负荷的不确定程度随着价格改变量而变化。由响应偏差随价格变化规律构造的模糊表达式，可以看出，在时段8-10、时段15-17和时段22-23，分时电价实施前后的价格变化量小，为0.036元，价格型负荷响应的不确定程度也较低；在时段1-7和时段24，价格变化量增大，为0.248元，负荷的响应不确定程度也随之增大，最大变化范围为25.2 MW；在时段11-14和时段18-21，价格变化量达到最大，为0.45元，负荷的不确定程度有所减小，最大变化范围为23.8 MW。

3.2.2 激励型需求响应策略的结果分析

电动汽车群和空调集群响应意愿值如图5所示，集群的原始负荷如图6所示。在汽车群原始负荷高峰时段以及风光发电功率大于负荷的时段，即

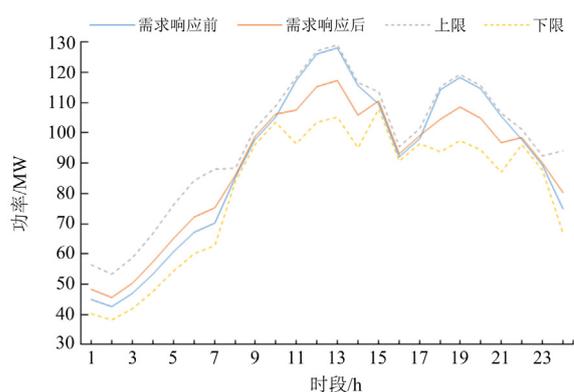


图4 价格型需求响应前后柔性负荷对比结果

Fig. 4 Comparison results of flexible load before and after price demand response

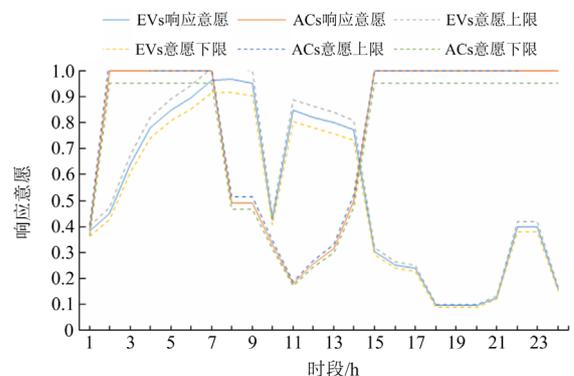


图5 集群响应意愿

Fig. 5 Cluster response intention

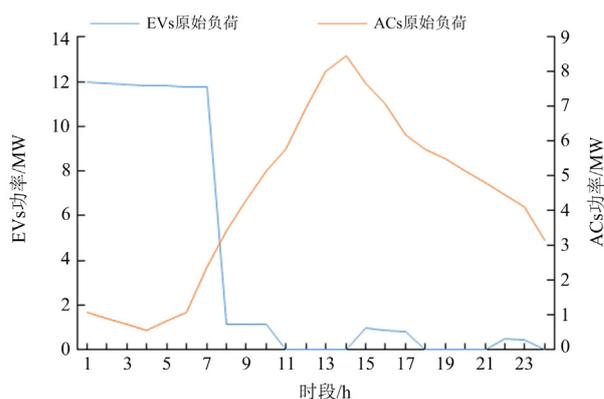


图6 集群原始负荷

Fig. 6 Cluster original load

时段5-8和时段8-14，电动汽车群响应意愿偏高，参与需求响应的积极性更高，可以更好地参与分布式可再生能源的消纳；而空调集群在风光发电功率大于负荷的时段响应意愿偏低，因为空调集群原始的负荷功率较高，不需要较高的激励价格就可以实

现风光功率的消纳。在其余调度时段，即风光发电功率小于负荷功率，电动汽车群在激励价格下的响应意愿较小，因为原始负荷功率本身较小，较小的意愿有利于降低负荷；空调集群响应意愿较高，通过提高参与需求响应的积极性，降低空调集群用电负荷。

1) 集群可调度裕度

由响应意愿确定的可调度裕度及实际优化调度功率如图 7、图 8 所示，对应的平均激励价格如图 9 所示。在风光发电功率大于负荷的时段，电动汽车群及空调集群的实际用电功率较高，有利于促进风光可再生能源消纳。而在其余时段，电动汽车群及空调集群的用电功率较少，降低了联络线的用电功率。但是由于原始用电负荷功率不同，激励平均价格也不相同。对于电动汽车群，原始用电功率集中在时段 1-7，其余时段用电功率较小，因此为激励汽车群积极参与风光功率高发时刻，需要设置较高的激励价格增大电动汽车群可调度裕度，如图 8 所示，电动汽车群激励价格在风光发电功率大于负荷的时段以及原始负荷高峰期，相较于其他调

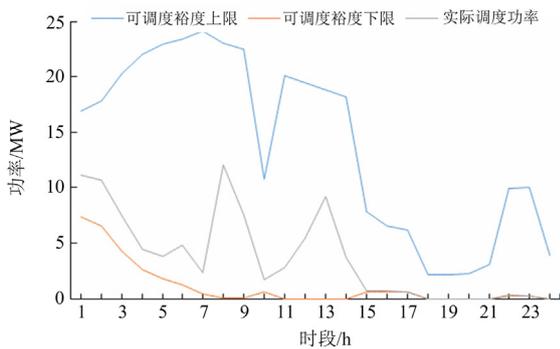


图 7 电动汽车群可调度裕度与实际调度功率

Fig. 7 Optimal dispatching margin and actual dispatching power of electric vehicles

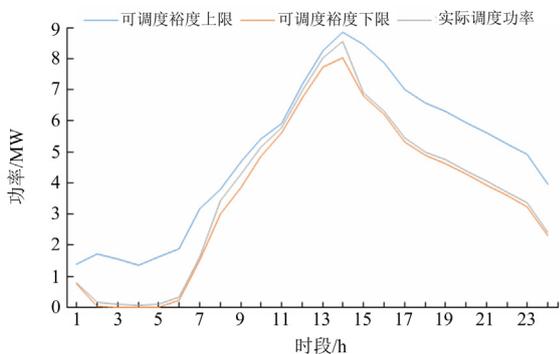


图 8 空调集群可调度裕度与实际调度功率

Fig. 8 Optimal dispatching margin and actual dispatching power of air conditioners

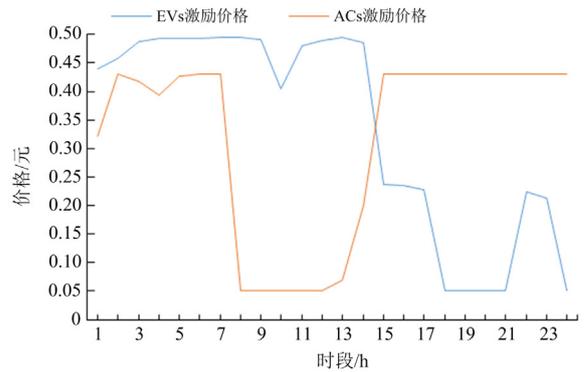


图 9 不同集群的激励价格

Fig. 9 Incentive prices for different clusters

度时段，激励价格较高。对于空调集群，原始用电功率在风光发电高峰时刻维持一个较高水平，因此只需设置较低的激励水平维持高负荷即可促进可再生能源的消纳，而在其余光伏发电功率欠缺的调度时段，需要设置较高的激励水平增大可调度裕度，减小空调的用电功率，降低配电网整体的负荷水平。

2) 风光消纳结果

在激励型需求响应策略实施后，风光功率的消纳结果如图 10 所示。激励型需求响应策略实施前，电动汽车群、空调集群按照原始功率用电，弃风光功率主要集中在时段 8-14。在实施激励型需求响应策略后，通过对不同类型的响应资源实施不同的激励水平，大大促进了风光可再生能源的消纳，弃风光功率所占总风光发电功率的比例由原来的 4.77% 降低为 0，实现了弃风光功率的完全消纳。

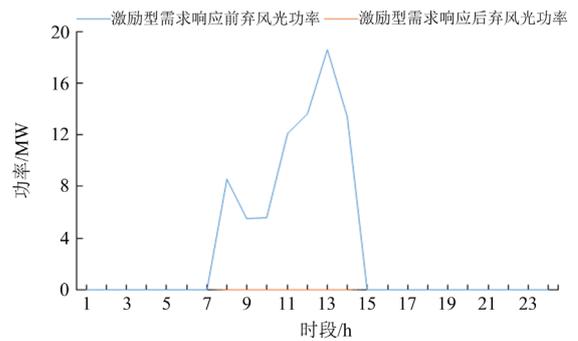


图 10 风光功率的消纳结果

Fig. 10 Absorption results of wind and solar power

3.2.3 TSK 模糊模型量化的响应意愿分析

相较于固定的响应意愿期望值，TSK 模糊模型量化响应意愿时，考虑到激励价格以及荷电状态对意愿的影响，能够更加合理地反映可调度裕度的大小。设置固定的响应意愿为 0.5、1 两种场景。当响应意愿期望值过于保守，固定为 0.5 时，弃风、购电成本总和为 562 178.53 元，高于 TSK 量化响应意

愿时的成本总和 557 470.36 元。当响应意愿期望值过于乐观, 固定为 1 时, 相较于 TSK 量化响应意愿时的总成本仅下降了 0.16%, 若考虑荷电状态以及价格对可调度裕度的影响, 意愿为 1 时汽车群、空调集群的优化负荷分别在时段 15-24、时段 1-2 处低于可调度裕度下限, 结果如图 11 所示, 说明固定响应意愿制定的需求响应策略不合理。

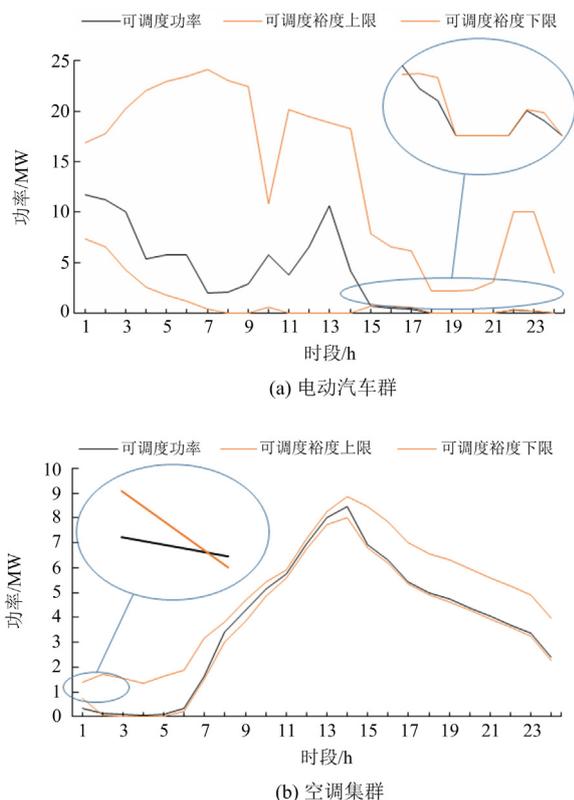


图 11 可调度裕度与意愿为 1 时可调度功率

Fig. 11 Optimal dispatching margin and dispatching power when intention is 1

实际需求响应意愿存在一定的不确定性, 通过调整响应意愿模糊参数, 分析响应意愿不确定程度对风光功率的消纳以及调度经济性的影响。假设存在 3 种情况: 情况 1, 响应意愿的比例系数 $r_1=1$, $r_3=3$, 即不考虑响应意愿的不确定性, 变化范围为 0; 情况 2, 响应意愿的比例系数 $r_1=0.95$, $r_3=1.05$, 即考虑响应意愿的不确定性, 变化范围为 0.05; 情况 3, 响应意愿的比例系数 $r_1=0.9$, $r_3=1.1$, 即响应意愿的不确定性进一步增大, 变化范围为 0.1。

不同情况下的响应结果如表 1 所示。可以看出, 随着响应意愿不确定性增大, 弃风光功率不变, 基本为 0, 但购电成本逐渐增加。响应意愿不确定性增加, 需求响应的不确定性也随之增加, 需要向外部购进更多的电量, 以保证风光可再生能源消纳,

减少弃风光的产生。

表 1 不同情况下响应结果对比分析

Table 1 Comparison and analysis of response results under different circumstances

响应意愿 不确定性	弃风光功率/MW	向外部购电 成本/元
0	0.00	554 522.82
0.05	0.00	556 436.04
0.1	0.00	556 901.74

3.2.4 电动汽车群-空调集群联合考虑对比分析

为验证电动汽车群-空调集群联合考虑对配电网需求响应的积极作用, 本文设置以下 4 种场景进行对比分析: 1) 场景 1, 电动汽车群、空调集群均参与激励型需求响应; 2) 场景 2, 仅电动汽车群参与激励型需求响应, 空调集群不参与; 3) 场景 3, 仅空调集群参与激励型需求响应, 电动汽车群不参与; 4) 场景 4, 两者均不参与需求响应。通过求解需求响应策略优化模型, 可得到在上述 4 种场景下的结果如表 2 所示。

表 2 不同场景下的成本

Table 2 Costs under different scenarios

场景	EVs、ACs	单独考虑	单独考虑	两者均不 考虑
	联合考虑	EVs	ACs	
弃风光 成本/元	1.505	11.170	14 857.105	35 071.362
向外部购 电成本/元	557 468.855	564 640.201	566 659.091	573 643.311

由表 2 可知, 单独考虑空调集群参与需求响应, 弃风成本降低 57.64%, 由于电动汽车群的可调度裕度更高, 单独考虑电动汽车群参与需求响应时弃风成本降低 99.97%, 汽车群、空调集群联合考虑后弃风光成本相比于单独考虑电动汽车或单独考虑空调的成本更低。汽车群、空调集群单独考虑时向外部购电成本相比于两者均不考虑时的成本分别减少了 9003.11 元、6984.22 元, 两者减少成本之和为 15 987.33 元, 仍小于联合考虑时向外部购电减少的成本 16 174.456 元。因此, 汽车群、空调集群用电特性的不同, 两者联合考虑可以实现风电光伏的完全消纳, 也可以比两者单独考虑时实现更低的购电成本。

4 结论

针对风光可再生能源消纳问题, 本文建立了考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群的需求响应策略模型, 对模型进行仿真验证, 得出如下结论:

1) 不同类型的激励型需求响应资源具有不同

的响应特性，需要制定有针对性的激励价格。电动汽车群原始用电负荷较低，且具有集中用电的特性，在风光发电高发时段增加配电侧用电负荷时，需要制定较高的激励价格提高响应意愿，使其参与到需求响应中；空调集群原始用电较高且较平稳，风光发电高发时段增加配电侧用电负荷时，不需要制定较高的激励价格改变其用电量，而在降低负荷用电时需要较高激励价格提高响应意愿。

2) 激励型需求响应策略的实施，可以有效降低弃风光功率。在可调度裕度潜力足够大时可以实现弃风光功率的完全消纳。

3) 响应意愿不确定性增大会增加向外部购电的购电成本，通过增加外部的购电量以弥补需求响应的不确定性，保证风光可再生能源的消纳，减少弃风光的产生。

4) 电动汽车群、空调集群联合考虑参与需求响应，在实现风电光伏消纳的同时，相比于两者单独考虑减少的成本之和，可以实现更低的购电成本。

附录A

表 A1 电动汽车及空调等各项参数

Table A1 Parameters of electric vehicle and air conditioner

参数	数值	参数	数值
p_{ch}/kW	5	φ	0.9
M_{unit}/kW	0.456	T/h	24
η_{em}	0.672	$\Delta t/h$	1
η_{ch}	0.9	$N_{EV}/辆$	5000
$C_w/\text{元}$	0.9	$R/(^{\circ}C/kW)$	5.56
B_{av}/kWh	27.3	$C/(kWh/^{\circ}C)$	0.18
$v/(km/h)$	40	$\theta_{max}/^{\circ}C$	27.3
S_{min}	0.2	$\theta_{min}/^{\circ}C$	24.8
S_{max}	1	$N_{AC}/台$	10 000

表A2 阶梯价格参数

Table A2 Parameters of tiered pricing

参数	数值/MW	参数	数值/(元/kWh)
D_1	0.01	C_{IDR}^1	0.05
D_2	0.005	C_{IDR}^2	0.08
D_3	0.005	C_{IDR}^3	0.10
D_4	0.08	C_{IDR}^4	0.20
D_5	0.10	C_{IDR}^5	0.30
D_6	0.10	C_{IDR}^6	0.50

表A3 模糊规则

Table A3 Fuzzy rules

$f^i()$	SOC 低	SOC 中	SOC 高
价格低	α^2	$\alpha^2(1-\alpha)$	α^2
价格中	α	$\alpha(1-\alpha)$	α
价格高	1	$1-\alpha$	1

参考文献

[1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. [2020-09-22]. <http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content5546168.htm>.

[2] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.

[3] 姚颖蓓, 陆建忠, 傅业盛, 等. 华东地区电动汽车发展趋势及用电需求预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 141-145.
YAO Yingbei, LU Jianzhong, FU Yesheng, et al. Electric vehicle development trends and electricity demand forecast in East China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 141-145.

[4] 周椿奇, 向月, 岑炳成, 等. 清洁能源发展场景下电动汽车入网对区域碳排放的系统动力学建模与分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 36-45.
ZHOU Chunqi, XIANG Yue, CEN Bingcheng, et al. System dynamics modeling and analysis of regional carbon emission by electric vehicles development under the evolution of clean energy development[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 36-45.

[5] 杨永标, 颜庆国, 徐石明, 等. 公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的思考[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 103-107.
YANG Yongbiao, YAN Qingguo, XU Shiming, et al. Thinking of public building air-conditioning load participating in grid with virtual peak clipping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 103-107.

[6] 肖斐, 艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 184-190.
XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 184-190.

[7] 刘浩田, 陈锦, 朱熹, 等. 一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 116-123.
LIU Haotian, CHEN Jin, ZHU Xi, et al. An incentive strategy of residential peak-valley price based on price elasticity matrix of demand[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 116-123.

[8] 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.
- [9] 彭春华, 张金克, 陈露, 等. 计及差异化需求响应的微电网源荷协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 1-7.
PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7.
- [10] 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): 1402-1412.
SUN Yi, HU Yajie, ZHENG Shunlin, et al. Integrated demand response optimization incentive strategy considering users' response characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1402-1412.
- [11] 都成, 魏震波. 基于模糊激励型需求响应的微电网两阶段优化调度模型[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 37-44.
DU Cheng, WEI Zhenbo. Two-stage optimal dispatching model of microgrid based on fuzzy incentive demand response[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 37-44.
- [12] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5519-5528.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528.
- [13] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394-401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 395-401.
- [14] 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.
- [15] 赵冬梅, 宋原, 王云龙, 等. 考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 21-30.
ZHAO Dongmei, SONG Yuan, WANG Yunlong, et al. Coordinated scheduling model with multiple time scales considering response uncertainty of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 21-30.
- [16] 周玮, 徐从明, 杨丹霞, 等. P2P 能源共享下考虑意愿动态调整的电动汽车群需求响应策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2022-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221019.1907.005.html>.
ZHOU Wei, XU Congming, YANG Danxia, et al. Research on demand response strategy of electric vehicles considering dynamic adjustment of willingness under P2P energy sharing[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2022-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221019.1907.005.html>.
- [17] 李义荣. 考虑不确定性的需求响应建模及其在电力系统运行中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LI Yirong. Modeling of demand response considering the uncertainty and its applications in power system operation[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [18] 彭文昊, 陆俊, 冯勇军, 等. 计及用户参与不确定性的需求响应策略优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1588-1594.
PENG Wenhao, LIU Jun, FENG Yongjun, et al. A demand response strategy optimization considering user participation uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1588-1594.
- [19] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. 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.
- [20] KANG Xie, HUI Hongxun, DING Yi. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 283-295.
- [21] WANG Dan, JIA Hongjie, WANG Chengshan, et al. Performance evaluation of controlling thermostatically controlled appliances as virtual generators using comfort-constrained state-queueing models[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(4): 591-599.
- [22] 赵秀, 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.
ZHAO 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.
- [23] 孙宇军, 王岩, 王蓓蓓, 等. 考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 106-113, 159.
SUN Yujun, WANG Yan, WANG Beibei, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 106-113, 159.

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-03-07

作者简介:

胡志勇(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划和调度运行; E-mail: zyhu1980@163.com

周 玮(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为分布式能源交易、配电网调度与运行、智能电网能源管理。E-mail: zhouwei@dlut.edu.cn

(编辑 魏小丽)