

转载自《电力系统保护与控制》2026年54卷9期

引用格式: 李咸善, 李家辉, 李丹宁, 等. 考虑温度影响的电动汽车集群市场化双型需求响应运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(9): 137-150.

LI Xianshan, LI Jiahui, LI Danning, et al. Market-oriented dual-type demand response operation strategy for electric vehicle aggregators considering temperature effects[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(9): 137-150.

考虑温度影响的电动汽车集群市场化双型需求响应运营策略

李咸善^{1,2}, 李家辉^{1,2}, 李丹宁^{1,2}, 仇成龙^{1,2}, 张远航^{1,2}, 刘颂凯¹, 李飞^{1,3}

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 水资源工程与调度全国重点实验室(武汉大学), 湖北 武汉 430072)

摘要: 为应对极端温度对电网灵活性及电动汽车(electric vehicle, EV)运营产生的重大影响, 保障电网供电可靠性与多主体运营经济性, 提出了一种考虑温度影响的电动汽车聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)参与价格引导型和补贴激励型的双型需求响应市场化运营策略。首先, 构建了考虑温度影响的 EV 负荷模型、以及计及温度影响及用户响应意愿的 EVA 可调度容量评估模型。其次, 针对 EVA 参与日前-日内两阶段双型需求响应市场运营, 构建了电力市场运营商(power market operator, PMO)与 EVA 之间的主从博弈需求响应决策模型。其中, 上层为市场出清模型, 反映市场供需变化, 以市场用能成本最低为目标, 决策市场出清电价, 引导需求侧参与价格引导型需求响应; 下层为 EVA 双型需求响应决策模型, EVA 响应双型需求响应价格, 以 EVA 运营效益最大化为目标, 决策其双型需求响应策略。最后, 通过算例分析验证了所提策略能够使 EVA 在不同温度下有效调整竞标策略以实现收益最大化, 进而提升电网应对极端温度变化的调度能力。

关键词: 电动汽车; 温度影响因素; 电力市场; 需求响应; 运营策略

Market-oriented dual-type demand response operation strategy for electric vehicle aggregators considering temperature effects

LI Xianshan^{1,2}, LI Jiahui^{1,2}, LI Danning^{1,2}, QIU Chenglong^{1,2}, ZHANG Yuanhang^{1,2}, LIU Songkai¹, LI Fei^{1,3}

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. School of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To address the significant impact of extreme temperatures on power system flexibility and electric vehicle (EV) operation, and to ensure both power supply reliability and economic efficiency for multiple stakeholders, a market-oriented dual-type demand response operation strategy for EV aggregators (EVA) is proposed, incorporating temperature effects. The strategy enables participation in both price-based and incentive-based demand response programs. First, an EV load model considering temperature effects is developed, along with an EVA dispatchable capacity evaluation model that accounts for both temperature variations and user response willingness. Second, a two-stage day-ahead and intraday market framework is established, and a leader-follower game-based demand response decision-making model between the power market operator (PMO) and the EVA is developed. The upper-level model represents market clearing, aiming to minimize total energy cost while determining clearing prices to guide price-based demand response. The lower-level model describes the EVA's decision-making, where it responds to both types of demand response prices with the objective of maximizing operational profit by optimizing its participation strategy. Finally, case study results show that the proposed strategy enables EVA to effectively adjust bidding strategies under varying temperature conditions, thereby maximizing profits and enhancing the power system's dispatching ability to cope with extreme temperature variations.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407118).

Key words: electric vehicle; temperature effects; electricity market; demand response; operation strategy

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52407118); 水资源工程与调度全国重点实验室开放基金项目资助(2023SDG02)

0 引言

近年来,全球气候变暖导致气候系统紊乱,极端冷热异常天气增多,突发性气温骤变会使电网负荷剧烈波动,严重冲击电力系统供需平衡^[1]。为此,我国各省市相继出台电力需求响应实施细则^[2-3],通过市场化价格引导型和补贴激励型双型需求响应机制,激发需求侧响应能力并参与灵活调节,提升负荷侧管理能力,保障极端气候条件下电力供需平衡。

电动汽车(electric vehicle, EV)是一类重要的需求侧灵活性资源。针对大规模 EV 并网, EV 聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)聚合 EV 个体形成 EV 集群,可发挥 EVA 的规模化灵活性调节效应,参与双型需求响应,助力极端天气下电网供需平衡调度。但是,① 极端天气温度对 EV 用户本身的用能行为、EV 耗能特性及 EVA 可调度能力也会产生影响;② 极端环境温度、市场价格、EV 荷电状态等多因素会影响 EV 用户的用能行为选择意愿,进而影响 EVA 可调度能力;③ 市场环境下,极端温度、用户意愿及双型需求响应激励政策下的 EVA 运营策略,也会反作用于市场的供需变化,动态影响市场出清电价,进而影响 EVA 的运营策略。为此,需要研究考虑温度影响及用户意愿的 EVA 双型需求响应运营策略,解决考虑环境温度及用户意愿影响的 EVA 可调度能力评估、EVA 参与双型需求响应运营策略及系统优化调度模型等关键问题。

环境温度变化对 EV 耗能特性的影响已受到广泛关注^[4-7],包括温度影响下的 EV 电池耗能特性^[8]、EV 车载空调耗能特性研究^[9-11]等方面,但对温度影响下 EVA 的可调度能力评估尚缺乏研究。文献[4]基于多种环境温度下大规模用户出行数据的分析,得出不同温度下电动汽车的充电需求会发生重大变化,但仅考虑了温度对电池容量的影响,未量化不同温度条件下电池耗能特性等关键指标的动态变化;文献[5]聚焦寒潮天气下电网的优化调度问题,提出了极寒温度下 EVA 可调度能力的评估建模方法,但该研究仅聚焦低温场景,未量化不同温度梯度下电动汽车可调度能力的动态变化。文献[6]和文献[7]分别提出含季节、天气特性的 EV 充电模型,刻画了不同环境场景下的 EV 充电需求差异,但未考虑温度对电池充放电效率等因素的影响,会降低优化调度策略的准确性。为量化温度影响下 EVA 的普适性可调度能力,本文考虑了不同温度下 EV 电池最大载电量、充放电效率、里程耗电量、空调耗电量、低压附件耗电量等因素的影响,并采用闵可夫斯基和^[12]评估 EVA 的可调度能力。

在极端环境温度下,进行 EVA 参与双型需求响应的运营策略研究,需要建立更为准确的 EVA 可调度能力评估模型,除了环境温度对 EVA 充电负荷及可调度能力的直接影响外,用户意愿会间接影响 EVA 的可调度能力,需进一步研究考虑温度与用户意愿影响的 EVA 可调度容量评估模型。

在极端温度及双型需求响应市场机制下, EV 用户用能行为选择意愿会同时受到环境温度、充放电电价、EV 荷电状态等多种因素的影响,需要构建多因素耦合驱动意愿的 EVA 可调度能力评估模型。近年来, EVA 的个体用能意愿被逐渐纳入到 EV 集群聚合建模之中^[13-16],但主要考虑单一因素的影响。文献[13]考虑了高温天气因素的影响、文献[14]考虑了激励水平的影响,分别构建了单一变量驱动意愿的可调度能力预测模型。文献[15]虽然结合多影响因素构建了模糊推理模型量化 EV 意愿,但以激励价格为核心,其他因素仅作为修正项进行调整;文献[16]考虑激励水平和社交圈等多因素影响下的 EV 用户意愿模型,构建了价格激励下的 EV 用户个体行为意愿模型,依据个体意愿度大小,划分社交圈类型,其实质也为单一变量驱动意愿模型。为了解决多因素驱动意愿模型的构建问题,本文构建了环境温度、充放电电价、EV 进站荷电状态等多变量动态耦合驱动的用户意愿模型,量化多因素对用户的用能行为选择意愿的协同影响,进而评估考虑温度影响及多变量驱动用户意愿的 EVA 可调度能力。

基于上述,本文围绕考虑温度影响及用户意愿的 EVA 市场化双型需求响应运营策略开展研究,主要研究内容及解决的关键问题如下:

1) 考虑温度与用户意愿影响的 EVA 可调度容量评估。计及环境温度对 EV 电池最大载电量、耗电量、充放电效率的影响,计算不同环境温度下 EV 到站的实际荷电状态(state of charge, SOC);考虑环境温度、充放电电价、EV 进站荷电状态等要素对 EV 用户的用能行为选择意愿的影响,构建不同环境温度影响下的 EVA 可调度容量评估模型。

2) EVA 参与双型需求响应的两阶段市场化运营策略。基于电能量市场电价引导机制、需求响应政策补贴价格机制及环境温度影响下的 EVA 可调度能力评估,构建考虑温度影响下的 EVA 参与日前-实时两阶段电能量市场交易策略和补贴激励型需求响应策略,以期最大化 EVA 市场运营效益。

3) EVA 参与日前-实时两阶段电力市场交易决策的双层博弈模型。上层为市场出清模型,反映市场供需变化,决策市场出清电价,达到市场用能成

本最低, 引导需求侧参与价格引导型需求响应; 下层为 EVA 的双型需求响应决策模型, EVA 响应双型需求响应价格, 决策其双型需求响应策略, 达到 EVA 运营效益最大化。通过双层循环迭代, 直至多主体利益均衡, 获得 EVA 双型需求响应策略。最后通过仿真算例验证本文方法的有效性及其优势。

1 考虑环境温度影响的 EVA 市场化需求响应运营策略

为应对极端环境温度变化对电网供需平衡的严重冲击, 我国各级电网相继实施价格引导型和补贴激励型需求响应机制^[2-3], 激发需求侧响应能力, 保障电力供需平衡。EVA 作为重要的需求响应资源, 极端温度也会影响其需求响应能力及其响应意愿, 需要进行考虑温度影响及用户意愿的 EVA 市场化需求响应运营策略研究, 解决温度影响下的 EVA 可调度能力评估、EVA 市场化需求响应运营策略及系统优化调度模型等关键问题, 助力电网供需平衡调度, 提升 EVA 运营效益。

1.1 温度影响下 EVA 市场化需求响应运营策略

图 1 所示为考虑温度影响的 EVA 市场化需求响应运营场景。电力市场运营商(power market operator, PMO)实施双型需求响应机制, 引导 EVA 参与需求响应, 进行极端温度下的电网供需平衡调度, 实现市场用能成本最低; EVA 参与需求响应, 调整用能策略, 实现其市场收益最大。

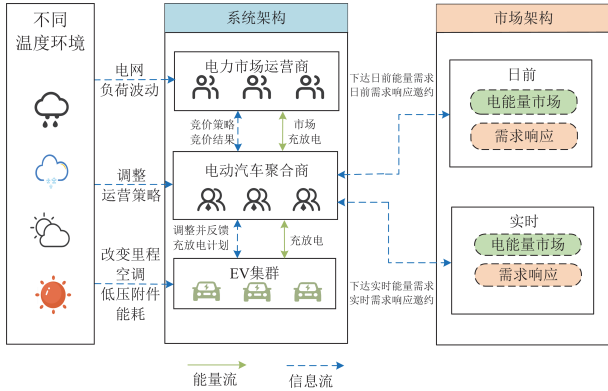


图 1 考虑温度影响的 EVA 市场化需求响应交易框架

Fig. 1 A market-oriented demand response trading framework for EVA considering the impact of temperature

1) 电力市场双型需求响应运营策略

电网实施双型需求响应机制, 引导 EVA 参与需求响应, 实现温度影响下的供需平衡, 达到市场购能成本最低。①价格引导型需求响应机制。温度变化会导致市场供需变化, 进而影响电能市场出清电价, 通过出清电价引导 EVA 动态调整 EV 充放电

计划, 助力满足市场电量平衡需求; ②补贴激励型需求相应机制。通过较高的补贴价格引导 EVA 参与日前邀约型和日内紧急型需求响应, 应对极端温度对电网供需平衡的冲击。

2) EVA 参与双型需求响应市场化运营策略

日前市场阶段, EVA 参与价格引导型和日前邀约型需求响应, 达到综合考虑购能成本和需求响应收益的综合收益最大化。依据考虑温度影响的 EVA 日前用能需求预测, 评估 EVA 日前可调度能力, ①参与价格引导型需求响应, 依据日前市场出清电价, 制定日前市场购能计划, 降低购能成本, 助力市场电量平衡; ②参与日前邀约型需求响应, 获得邀约型需求响应收益。

日内市场阶段, EVA 进行偏差调整和参与日内紧急型需求响应, 达到综合考虑偏差用能成本和需求响应收益的综合收益最大化。①EVA 日内市场偏差平衡调整: 依据 EVA 的日前用能计划与日内实际用能需求之间的偏差, 决策在实时电能市场上报增加或降低的充放电功率, 即偏差充放电功率, 参与实时电能市场出清。②参与市场日内紧急型需求响应, 获得其紧急型需求响应收益。

1.2 考虑温度影响下的 EVA 市场化需求响应主从博弈模型框架

电力市场运营环境下, 当电网负荷需求一定时, 电网供需平衡调度可通过电力市场运营商 PMO 与发电商之间的主从博弈调度来实现, 这方面内容已得到广泛研究。

但在本文研究场景中, 市场主体除了 PMO 和发电商之外, 还增加了 EVA 主体。与上述传统的市场负荷需求一定时的主从博弈模型不同的是, 在博弈过程中, EVA 作为产销主体, 要依据市场出清电价及双型需求响应补贴价格, 权衡其参与双型需求响应的购电成本和补贴收益, 决策其双型需求响应申报计划, 以实现其综合效益最大化。而 EVA 需求响应用能计划决策, 反过来又会影响市场的供需平衡, 导致发电商需要重新决策其报价报量策略, 实现新一轮供需平衡下的市场出清, 进而影响市场出清电价, 新一轮的出清电价又导致 EVA 进行新一轮的双型需求响应决策。如此循环, 直至市场多主体利益均衡。因而, PMO 与发电商之间存在报价报量的决策博弈, PMO 与 EVA 之间存在充放电申报的决策博弈。PMO、发电商和 EVA 三者之间的决策通过供需平衡耦合。

为此, 构建适用于日前、实时两阶段的 EVA 需求响应决策主从博弈模型架构, 如图 2 所示。上层为市场出清模型, 博弈主体 PMO 考虑 EVA 充放

电功率对供需平衡的影响,以购能成本最小为目标决策出清电价,满足供需平衡出清;下层为EVA双型需求响应决策模型和发电商报价量决策模型,博弈从体EVA响应市场出清电价结合补贴激励型需求响应补贴价格,实现综合效益最大化目标,优化决策其需求响应的充放电策略,发电商依据出清电价决策其报价量策略,实现发电商市场效益最大化。双层模型循环迭代,直至达到博弈双方利益均衡,获得优化的EVA双型需求响应策略。

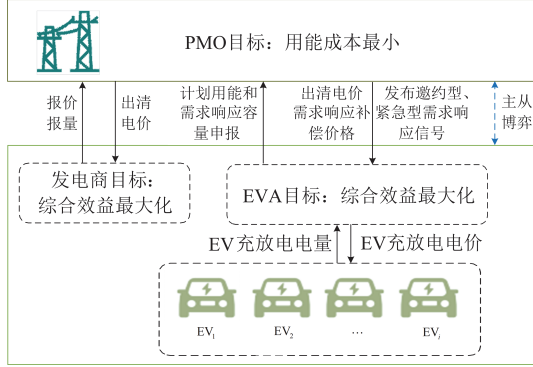


图2 EVA与区域电网主从博弈模型框架

Fig. 2 Master-slave game framework of EVA and regional power grids

2 计及温度影响及用户响应意愿的EVA可调度容量评估模型

定量分析温度对EV耗电量、EVA充电负荷及EV用户参与需求响应意愿的影响,构建计及温度影响及用户响应意愿的EVA可调度容量评估模型。

2.1 温度变化对电动汽车运行的影响

温度对EV运行的影响主要体现在对EV耗电量、EV电池最大载电量、充放电效率等方面,进而影响其充电负荷需求。考虑不同温度下EV到站电量模型,如式(1)所示。

$$\begin{cases} E_{i,start}^H = E_{i,max}^H - \Delta E_i^H \\ \Delta E_i^H = E_{i,mil}^H + E_{i,ac}^H + E_{i,lvc}^H \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_{i,max}^H$ 、 ΔE_i^H 、 $E_{i,start}^H$ 分别为在温度 H 下第 i 辆EV的电池最大载电量、出行耗电量及进站起始载电量; $E_{i,mil}^H$ 、 $E_{i,ac}^H$ 、 $E_{i,lvc}^H$ 分别为第 i 辆EV在温度 H 下的里程耗电量、空调耗电量及车辆低压附件能耗。

表1 不同天气温度下的安全行驶速度

Table 1 Safe driving speeds under different weather temperatures

天气	冬季		夏季		春秋季
	雪雾严重	雪雾轻微	雨	晴	常规天气
典型温度/℃	-10~0	0~10	25~30	30~35	10~25
速度/(km/h)	40	55	65	80	60~80

2.1.1 不同温度下EV电池最大载电量

EV电池放电量对温度具有较强的敏感性。由文献[17]的研究数据可知,以25℃为基准温度,其对应的放电量为基准容量。温度高于25℃时,电池放电量缓慢增加后降低且变化不明显;低于25℃时,随着温度降低电池放电量骤降。

用最大载电量表示EV电池能够存储的最大电量,由EV电池特性相关结论[18]可得不同温度下电池最大载电量如式(2)所示。

$$\begin{cases} E_{i,max}^H = E_{C,i}^H \cdot R_{C,i} \\ E_{C,i}^H = \left(\frac{0.000096H^3 - 0.01314H^2 +}{0.6525H + 70.7802} \right) / 79.989 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_{C,i}^H$ 、 $R_{C,i}^H$ 分别为在温度 H 下第 i 辆EV的电池相对容量百分数和电池理想容量,公式适用的温度区间为[-20℃, 60℃]。

2.1.2 EV耗电量计算模型

EV出行总耗电量主要包括里程耗电量、空调耗电量和低压附件耗电量。

1) 里程耗电量

EV的行驶里程和对应的单位耗电量决定了里程耗电量 $E_{i,mil}^H$, 如式(3)和式(4)所示。

$$E_{i,mil}^H = D_i \cdot E_{i,v}^H \quad (3)$$

$$\tau_i = D_i / V_{i,m}^H \quad (4)$$

式中: D_i 、 $V_{i,m}^H$ 、 $E_{i,v}^H$ 、 τ_i 分别为在温度 H 下第 i 辆EV的行驶里程、行驶时速、单位里程耗电量和行驶时长。其中EV行驶里程 D_i 可近似满足对数正态分布[19]。

单位里程耗电量 $E_{i,v}^H$ 由行驶速度 $V_{i,m}^H$ 决定,行驶速度 $V_{i,m}^H$ 因道路状况的不同而改变,道路状况与天气温度等情况紧密关联[19]。参考文献[20-22]定制出结合季节和温度的安全行驶速度,如表1所示。

EV单位里程耗电量可由式(5)求得[8]。

$$E_{i,v}^H = \begin{cases} 0.247 + \frac{1.52}{V_{i,m}^H} - 0.004V_{i,m}^H + 2.992 \times 10^{-5}V_{i,m}^H, & \partial = 1 \\ -0.179 + 0.004 \times V_{i,m}^H + 5.492/V_{i,m}^H, & \partial = 2 \\ 0.21 - 0.001 \times V_{i,m}^H + 1.534/V_{i,m}^H, & \partial = 3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ 为考虑温度影响的道路等级, 含 1、2、3 级。

2) 车载空调耗电量

车辆的空调能耗主要取决于使用时长, 在冬、夏季节使用空调最为频繁, 应考虑环境温度对车辆空调能耗的影响。文献[9-11]统计了汽车空调开启数据, 拟合出了温度与空调开启率的函数关系如式(6)所示, 温差与车载空调运行功率的关系、空调能耗如式(7)所示。

$$\sigma_{i,E}^H = \begin{cases} \alpha_1 H^3 + \alpha_2 H^2 + \alpha_3 H + \alpha_4, & 5^\circ\text{C} < H < 29.5^\circ\text{C} \\ 1, & H \leq 5^\circ\text{C} \text{ 或 } H \geq 29.5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_{ac,cool}(\Delta H) = 0.07\Delta H + 0.75 \\ p_{ac,hot}(\Delta H) = 0.1\Delta H + 1.1 \\ E_{i,ac}^H = \sigma_{i,E}^H p_{ac}(\Delta H)\tau_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{i,E}^H$ 为气温 H 下第 i 辆 EV 的空调开启率; $\alpha_1 - \alpha_4$ 为拟合系数; ΔH 为车内舒适温度与室外温度的温差; $p_{ac,cool}(\Delta H)$ 、 $p_{ac,hot}(\Delta H)$ 分别为车载空调制冷、制热的运行功率; $p_{ac}(\Delta H)$ 为车载空调的运行功率。

3) 车辆低压附件耗电量

EV 的低压附件包括灯光、传感器等部件, 附件能耗主要与环境温度和 EV 的行驶时长相关^[10]。低压附件能耗可通过式(8)进行计算。

$$E_{i,lvc}^H = \begin{cases} 0.35\tau_i & H \geq 25^\circ\text{C} \\ 0.2\tau_i & H < 25^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

2.1.3 温度对充放电效率影响

温度通过影响 EV 电池的化学反应动力学和内阻特性, 显著改变电动汽车的充放电效率 η_H 。根据文献[23]的数据拟合出温度与充放电效率的关系及拟合优度 R^2 如式(9)所示, 适用的温度区间为 $[-10^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}]$ 。

$$\begin{cases} \eta_H = -0.000368H^2 + 0.0174H + 0.755 \\ R^2 = 0.9868 \end{cases} \quad (9)$$

2.1.4 温度对 EVA 基线负荷的影响

EVA 的基线负荷 $P_{B,t}^{\text{EVA}}$ 指的是 EVA 在 t 时段内未参与需求响应, 仅依据电能量市场价格优化后的用电负荷水平。其核心作用是量化 EVA 参与需求响应的额外调节贡献, 也是衡量 EVA 参与需求响应结算的参考标准。据此, 基于前述温度变化对 EV 运行的影响分析, 在正常温度与极端温度(如高温、低温)下, EVA 的基线负荷会呈现显著差异, 本文将在 EVA 需求响应结算时予以考虑。

2.2 计及温度 and 用户意愿影响的 EVA 可调度容量评估模型

1) EV 运营意愿模型

EV 用户参与需求响应的决策意愿受到充放电电价、环境温度、EV 进站荷电状态三要素的影响。韦伯-费希纳定律^[24]可以量化物理刺激强度与心理感知量之间的非线性关联, 有效刻画 EV 用户的决策意愿。基于韦伯-费希纳定律, EV 用户 i 对于 3 个要素的响应程度可表示为式(10)和式(11)所示。

$$\begin{cases} Q_i^{\text{ch}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H) = \varepsilon_1 \ln \lambda + \varepsilon_2 \ln \left(\frac{H - H_{\min} + 1}{H_{\max} - H_{\min}} + 1 \right) + \varepsilon_3 \ln(S_{i,\text{soc},\text{start}}^H + 1) + c_1 \\ Q_i^{\text{dis}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H) = \varepsilon_4 \ln \lambda + \varepsilon_5 \ln \left(\frac{H - H_{\min} + 1}{H_{\max} - H_{\min}} + 1 \right) + \varepsilon_6 \ln(S_{i,\text{soc},\text{start}}^H + 1) + c_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{i,\text{soc},\text{start}}^H = E_{i,\text{start}}^H / E_{i,\text{max}}^H \quad (11)$$

式中: $Q_i^{\text{ch}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H)$ 、 $Q_i^{\text{dis}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H)$ 分别为用户充、放电需求响应意愿; λ 为充放电电价; $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 分别为天气的最高、最低温度; $\varepsilon_1 - \varepsilon_6$ 和 c_1 、 c_2 分别表示 EV 用户的响应度系数和基础响应度常数。

根据式(10), 得到了 EV 用户响应度和三要素之间的线性关系。但在实际优化时, EV 用户响应意愿只有“愿意”和“不愿意”两种明确的反馈, 因此需要将连续的 EV 用户响应意愿二值化, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} Q_i^{\text{ch}} = 1, & Q_i^{\text{ch}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H) \geq Q^{\text{ch},\text{base}} \\ Q_i^{\text{ch}} = 0, & Q_i^{\text{ch}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H) < Q^{\text{ch},\text{base}} \\ Q_i^{\text{dis}} = 1, & Q_i^{\text{dis}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H) \geq Q^{\text{dis},\text{base}} \\ Q_i^{\text{dis}} = 0, & Q_i^{\text{dis}}(\lambda, H, S_{i,\text{soc},\text{start}}^H) < Q^{\text{dis},\text{base}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Q_i^{ch} 、 Q_i^{dis} 分别为离散的 EV 用户 i 充、放电需求响应意愿(0 不愿意, 1 愿意); $Q^{\text{ch},\text{base}}$ 、 $Q^{\text{dis},\text{base}}$ 分别表示 EV 用户的充、放电响应意愿阈值, 可根据 EV 历史运营数据聚类进行计算。当 EV 用户 i 的 Q_i^{ch} 、 Q_i^{dis} 均为 0 时, EVA 不对该 EV 进行调度, 并以最快速度对其充电以满足充电需求。

2) 计及温度影响及用户响应意愿影响的 EVA 可调度容量

结合 EV 充放电模型及 EV 用户响应意愿模型, 对 EV 全时段功率、电量边界进行闵可夫斯基求和, 可得到考虑温度及 EV 用户响应意愿的 EVA 可调度

能力模型, 如式(13)和式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{t,q,\max}^{\text{ch,EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} X_{i,t} P_{i,\max}^{\text{ch}} Q_i^{\text{ch}}, P_{t,q,\max}^{\text{dis,EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} X_{i,t} P_{i,\max}^{\text{dis}} Q_i^{\text{dis}} \\ P_{t,q,\min}^{\text{ch,EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} X_{i,t} P_{i,\min}^{\text{ch}} Q_i^{\text{ch}}, P_{t,q,\min}^{\text{dis,EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} X_{i,t} P_{i,\min}^{\text{dis}} Q_i^{\text{dis}} \\ E_{t,q,\max}^{\text{EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} X_{i,t} E_{i,t,\max} \max(Q_i^{\text{ch}}, Q_i^{\text{dis}}) \\ E_{t,q,\min}^{\text{EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} X_{i,t} E_{i,t,\min} \max(Q_i^{\text{ch}}, Q_i^{\text{dis}}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{t,q,\min}^{\text{ch,EVA}} \leq P_t^{\text{ch,EVA}} \leq P_{t,q,\max}^{\text{ch,EVA}}, P_{t,q,\min}^{\text{dis,EVA}} \leq P_t^{\text{dis,EVA}} \leq P_{t,q,\max}^{\text{dis,EVA}} \\ E_{t,q,\min}^{\text{EVA}} \leq E_t^{\text{EVA}} \leq E_{t,q,\max}^{\text{EVA}} \\ E_t^{\text{EVA}} = E_{t-1}^{\text{EVA}} + (\eta_H^{\text{ch}} \sum_{j \in \text{EVA}} P_{i,t-1}^{\text{ch}} - \sum_{j \in \text{EVA}} P_{i,t-1}^{\text{dis}} / \eta_H^{\text{dis}}) \Delta t + \Delta E_t^{\text{EVA}} \\ \Delta E_t^{\text{EVA}} = \sum_{j \in \text{EVA}} \begin{pmatrix} X_{i,t} (X_{i,t} - X_{i,t-1}) E_{i,\text{start}}^H \\ -X_{i,t-1} (X_{i,t-1} - X_{i,t}) E_{i,\text{end}}^H \end{pmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $X_{i,t}$ 表示第 i 辆 EV 是否在充电站内(0 为离站, 1 为在站); I^{EVA} 为聚集 EV 总数量; $P_{i,\max}^{\text{ch}}$ 、 $P_{i,\max}^{\text{dis}}$ 分别为 EV 电池在 t 时段的最大充、放电功率; $P_t^{\text{ch,EVA}}$ 、 $P_t^{\text{dis,EVA}}$ 分别为 t 时段 EVA 的充、放电功率; $(P_{t,q,\max}^{\text{ch,EVA}}, P_{t,q,\max}^{\text{dis,EVA}})$ 、 $(P_{t,q,\min}^{\text{ch,EVA}}, P_{t,q,\min}^{\text{dis,EVA}})$ 分别为考虑用户意愿后在 t 时段 EVA 的最大、最小充放电功率; E_t^{EVA} 为 t 时段 EVA 的电量; $E_{t,q,\max}^{\text{EVA}}$ 、 $E_{t,q,\min}^{\text{EVA}}$ 分别为考虑用户意愿后 EVA 在 t 时段的最高、最低电量; $E_{i,t,\max}^H$ 、 $E_{i,t,\min}^H$ 分别为第 i 个 EV 用户在 t 时段的最高、最低电量; η_H^{ch} 、 η_H^{dis} 分别为温度 H 下的充、放电效率; Δt 为调度时段长度; ΔE_t^{EVA} 为 EVA 在 t 时段因接入 EV 导致的电量变化; $E_{i,\text{start}}^H$ 、 $E_{i,\text{end}}^H$ 分别为 EV 接入、离开充电站时的电量。

3 考虑温度影响的 EVA 市场化需求响应收益模型

在电能市场中, 一方面, EVA 依据市场出清电价调整自身用能策略参与价格引导型需求响应, 实现市场购电成本最小; 另一方面, EVA 参与邀约型和紧急型需求响应, 获得补贴收益, 助力电网应对极端温度对电网负荷造成的冲击。

3.1 EVA 电能市场购电费用模型

EVA 在电能市场中购电费用包括日前电能市场购电费用和实时电能市场购电费用。

1) EVA 日前市场购电费用

EVA 日前电能市场购电成本 $G^{\text{e,rec}}$ 为

$$G^{\text{e,rec}} = \sum_{t=1}^T \lambda_t^{\text{rec}} (P_t^{\text{EVA,ch,rec}} - P_t^{\text{EVA,dis,rec}}) \quad (15)$$

式中: T 为日前市场交易周期; λ_t^{rec} 为 t 时段的前日电能量市场出清电价; $P_t^{\text{EVA,ch,rec}}$ 、 $P_t^{\text{EVA,dis,rec}}$ 分别为 t 时段 EVA 在日前电能市场中的购、售电量。

2) EVA 日内市场偏差平衡成本

日内实时运行阶段, 由于 EVA 的日前用电计划与日内实际用电量存在偏差, EVA 需要在实时电能市场中购入偏差平衡电能, EVA 实时电能市场购电成本 $G^{\text{e,rea}}$ 如式(16)所示。

$$G^{\text{e,rea}} = \sum_{t'=1}^{T'} \lambda_{t'}^{\text{rea}} (\Delta P_{t'}^{\text{EVA,ch,rea}} - \Delta P_{t'}^{\text{EVA,dis,rea}}) \quad (16)$$

$$\Delta P_{t'}^{\text{EVA,ch,rea}} = P_{t'}^{\text{EVA,ch,rea}} - P_t^{\text{EVA,ch,rec}} \quad (17)$$

$$\Delta P_{t'}^{\text{EVA,dis,rea}} = P_{t'}^{\text{EVA,dis,rea}} - P_t^{\text{EVA,dis,rec}} \quad (18)$$

式中: $\lambda_{t'}^{\text{rea}}$ 为 t' 时段的实时电能市场出清电价; $\Delta P_{t'}^{\text{EVA,ch,rea}}$ 、 $\Delta P_{t'}^{\text{EVA,dis,rea}}$ 分别为 t' 时段 EVA 在实时电能市场中的充、放偏差平衡电量; $P_{t'}^{\text{EVA,ch,rea}}$ 、 $P_{t'}^{\text{EVA,dis,rea}}$ 分别为 t' 时段 EVA 在实时电能市场中的购、售电量; T' 为实时阶段交易周期。

3.2 EVA 参与补贴激励型需求响应的补贴收益

EVA 参与补贴激励型需求响应获得的补贴收益由日前邀约型需求响应补贴收益和实时紧急型需求响应费用两部分组成。

1) EVA 日前邀约型需求响应补贴费用

日前邀约型需求响应补贴包含填谷、削峰两种类型的需求响应补贴, 由补偿价格和 EVA 在日前申报的相应容量决定, EVA 日前邀约型需求响应收益如式(19)—式(23)所示。

$$\begin{cases} G^{\text{dr,inv}} = G_{n_1}^{\text{dr,inv}} + G_{n_2}^{\text{dr,inv}} \\ G_{n_1}^{\text{dr,inv}} = \sum_{n_1=1}^{N_1} (\alpha \lambda_{n_1}^{\text{dr,inv}} \Delta P_{n_1}^{\text{inv}}) \\ G_{n_2}^{\text{dr,inv}} = \sum_{n_2=1}^{N_2} (\alpha \lambda_{n_2}^{\text{dr,inv}} \Delta V_{n_2}^{\text{inv}}) \end{cases} \quad (19)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0, k < 50\% \\ 1, 50\% \leq k \leq 120\% \\ 0, k > 120\% (\text{仅针对超出部分}) \end{cases} \quad (20)$$

$$k = \begin{cases} \Delta P_{n_1}^{\text{inv}} / \Delta P_{n_1}^{\text{re}}, n = n_1 \\ \Delta V_{n_2}^{\text{inv}} / \Delta V_{n_2}^{\text{re}}, n = n_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\Delta P_{n_1}^{\text{inv}} = \sum_{t=t_{n_1,\text{start}}}^{t_{n_1}} \Delta P_{n_1,t}^{\text{inv}} = P_{B,n_1}^{\text{inv}} - P_{R,n_1}^{\text{inv}} \quad (22)$$

$$\Delta V_{n_2}^{\text{inv}} = \sum_{t=t_{n_2,\text{start}}}^{t_{n_2}} \Delta V_{n_2,t}^{\text{inv}} = V_{R,n_2}^{\text{inv}} - V_{B,n_2}^{\text{inv}} \quad (23)$$

式中: $G^{\text{dr,inv}}$ 为 EVA 实际参与邀约型需求响应的补

贴总收益; $G_{n_1}^{\text{dr,inv}}$ 、 $G_{n_2}^{\text{dr,inv}}$ 分别为 EVA 实际参与邀约型削峰、填谷需求响应的补贴收益; N_1 、 N_2 分别为电网发布邀约型削峰、填谷需求响应的总次数; $\lambda_{n_1}^{\text{dr,inv}}$ 、 $\lambda_{n_2}^{\text{dr,inv}}$ 分别为 EVA 参与邀约型削峰、填谷需求响应类型对应的补偿价格; $\Delta P_{n_1}^{\text{inv}}$ 、 $\Delta V_{n_2}^{\text{inv}}$ 分别为邀约型削峰、填谷需求响应的实际响应量; α 为 EVA 参与需求响应对应的补偿系数; $\Delta P_{n_1}^{\text{re}}$ 、 $\Delta V_{n_2}^{\text{re}}$ 分别为削峰、填谷的申报量; $t_{n_1,\text{start}}$ 、 t_{n_1} 分别为第 n_1 次发布邀约型削峰需求响应的开始时间、持续时间; $t_{n_2,\text{start}}$ 、 t_{n_2} 分别为第 n_2 次发布邀约型填谷需求响应的开始时间、持续时间; P_{B,n_1}^{inv} 为 EVA 参与邀约型削峰需求响应前的用电基线负荷; P_{R,n_1}^{inv} 为 EVA 参与邀约型削峰需求响应后的平均负荷; V_{B,n_2}^{inv} 为 EVA 参与邀约型填谷需求响应前的用电基线负荷; V_{R,n_2}^{inv} 为 EVA 参与邀约型填谷需求响应后的平均负荷。

2) EVA 日内紧急型需求响应补贴收益

EVA 在实时阶段参与紧急型削峰需求响应的补贴收益如式(24)和式(25)所示。

$$G_{n_3}^{\text{dr,em}} = \sum_{n_3=1}^{N_3} \lambda_{n_3}^{\text{dr,em}} \Delta P_{n_3}^{\text{em}} \quad (24)$$

$$\Delta P_{n_3}^{\text{em}} = P_{B,n_3}^{\text{em}} - P_{R,n_3}^{\text{em}} \quad (25)$$

式中: $G_{n_3}^{\text{dr,em}}$ 为 EVA 在参与紧急型需求响应的补贴收益; $\lambda_{n_3}^{\text{dr,em}}$ 为 EVA 参与紧急型削峰需求响应对应的补偿价格; N_3 为电网发布紧急型削峰需求响应的总次数; $\Delta P_{n_3}^{\text{em}}$ 为 EVA 参与紧急型削峰需求响应的实际响应量; P_{B,n_3}^{em} 为 EVA 参与紧急型削峰需求响应前的用电基线负荷; P_{R,n_3}^{em} 为 EVA 参与紧急型削峰需求响应后的平均负荷。

4 考虑温度影响下的日前-实时两阶段 EVA 需求响应决策模型

根据本文制定的计及温度影响下 EVA 日前-实时市场两阶段运营策略,以 PMO 为领导者,EVA 和发电商为跟随者,建立 EVA 参与日前-实时市场化需求响应决策的博弈模型。上层为市场出清模型,下层为 EVA 双型需求响应决策模型和发电商报价决策模型。其中,发电商决策模型为成熟模型^[25],本文予以省略。

4.1 EVA 日前阶段投标决策博弈模型

1) 上层领导者 PMO 优化模型

(1) 目标函数

日前阶段,PMO 以用能成本最小化为目标,优化各机组在电能量市场中标量,满足考虑 EVA 电量调节的市场电量需求,进行市场出清,得到日前市场出清电价,并传递给跟随者 EVA。如式(26)所示。

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T (C_{m,t}^G P_{m,t}^{\text{G,rec}} + C_{m,t}^{\text{G,up}}) \quad (26)$$

式中: M 为机组总数量; $P_{m,t}^{\text{G,rec}}$ 、 $C_{m,t}^G$ 分别为机组 m 在日前阶段 t 时段的中标功率及报价; $C_{m,t}^{\text{G,up}}$ 为机组 m 在 t 时段的启停成本。

(2) 日前市场出清约束

日前市场出清约束包含功率平衡约束,如式(27)和式(28)所示。

$$P_t^L = \sum_{m=1}^M P_{m,t}^{\text{G,rec}} + P_t^{\text{EVA,dis,bid}} - P_t^{\text{EVA,ch,bid}} \quad (27)$$

$$P_{m,\min}^G \leq P_{m,t}^{\text{G,bid}} \leq P_{m,\max}^G \quad (28)$$

式中: P_t^L 为日前阶段 t 时段的电网负荷; $P_t^{\text{EVA,ch,bid}}$ 、 $P_t^{\text{EVA,dis,bid}}$ 分别为 EVA 在日前电能量市场 t 时段申报的充、放电功率; $P_{m,t}^{\text{G,bid}}$ 为机组 m 在 t 时段的竞标功率; $P_{m,\max}^G$ 、 $P_{m,\min}^G$ 分别为机组 m 竞标功率的上、下限。

2) 下层跟随者 EVA 市场投标决策模型

(1) 目标函数

EVA 在日前电能量市场中,以电能量市场和邀约型需求响应综合收益最大化为目标,制定日前电能量市场投标策略。包括电能量市场购电成本 $G^{\text{e,rec}}$ (式(15))和邀约型需求响应收益 $G^{\text{dr,inv}}$ (式(19))、EVA 给 EV 充电获得的收益 $G^{\text{ch,rec}}$ (式(30))。

$$\max G^{\text{rec}} = -G^{\text{e,rec}} + G^{\text{dr,inv}} + G^{\text{ch,rec}} \quad (29)$$

$$G^{\text{ch,rec}} = \sum_{t=1}^T (\lambda_t^{\text{EV,ch}} P_t^{\text{EVA,ch,bid}} - \lambda_t^{\text{EV,dis}} P_t^{\text{EVA,dis,bid}}) \quad (30)$$

式中: G^{rec} 为 EVA 在日前市场的收益目标; $\lambda_t^{\text{EV,ch}}$ 、 $\lambda_t^{\text{EV,dis}}$ 分别为 EVA 在 t 时段给 EV 用户发布的充、放电价格。

(2) EVA 基线负荷量化目标函数

EVA 的核心决策逻辑是通过优化充放电功率实现总收益最大化,其中邀约型需求响应的收益 $G^{\text{dr,inv}}$ 依赖于 2.1.4 节定义的基线负荷 $P_{B,t}^{\text{EVA}}$ 。以电能量市场收益 G_B^{e} 最大化为目标,优化 EVA 仅参与电能量市场时的充放电功率情况,即基线负荷。在此,构建目标函数与 PMO 博弈,明确基线负荷量。

$$\max G_B = -G_B^{\text{e}} + G_B^{\text{ch}} \quad (31)$$

$$G_B^{\text{e}} = \sum_{t=1}^T \lambda_{B,t} (P_{B,t}^{\text{EVA,ch,bid}} - P_{B,t}^{\text{EVA,dis,bid}}) \quad (32)$$

$$P_{B,t}^{EVA} = P_{B,t}^{EVA, ch, bid} - P_{B,t}^{EVA, dis, bid} \quad (33)$$

式中: G_B 为基于 EVA 的历史数据在电能量市场的综合收益; $\lambda_{B,t}$ 为计算基线负荷时市场的出清电价; $P_{B,t}^{EVA, ch, bid}$ 、 $P_{B,t}^{EVA, dis, bid}$ 分别为 EVA 在计算基线负荷时 t 时段的充、放电功率。

(3) 约束条件

① EVA 日前功率平衡约束

$$P_{L,t}^{EVA} = P_t^{EVA, ch, bid} - P_t^{EVA, dis, bid} \quad (34)$$

② EVA 日前市场投标约束

$$\begin{cases} E_{t,q,min}^{EVA, rec} \leq E_t^{EVA, rec} \leq E_{t,q,max}^{EVA, rec} \\ E_t^{EVA, rec} = E_{t-1}^{EVA, rec} + (P_t^{EVA, ch, bid} \eta_H^{ch} - P_t^{EVA, dis, bid} / \eta_H^{dis}) \Delta t + \Delta E_t^{EVA, rec} \\ P_t^{EVA, ch, bid} P_t^{EVA, dis, bid} = 0 \\ 0 \leq P_t^{EVA, ch, bid} \leq P_{t,max}^{EVA, ch, rec} \\ 0 \leq P_t^{EVA, dis, bid} \leq P_{t,max}^{EVA, dis, rec} \end{cases} \quad (35)$$

式中: $P_{L,t}^{EVA}$ 为 t 时段 EVA 参与电能量市场和需求响应后的负荷; $E_{t,q,max}^{EVA, rec}$ 、 $E_{t,q,min}^{EVA, rec}$ 分别为 EVA 在日前阶段 t 时段的最高、最低电量; $E_t^{EVA, rec}$ 为 EVA 在日前阶段 t 时段的电量; $\Delta E_t^{EVA, rec}$ 为 EVA 在日前阶段 t 时段因 EV 进出站造成的电量阶跃变化; $P_{t,max}^{EVA, ch, rec}$ 、 $P_{t,max}^{EVA, dis, rec}$ 分别为 EVA 在日前阶段 t 时段的最大充、放电功率。

4.2 EVA 实时阶段投标决策优化模型

1) 上层领导者 PMO 出清模型

实时阶段, PMO 以用能成本最小化为目标, 优化发电侧在电能量市场的中标电量, 满足市场电量需求的同时进行实时电能量市场出清, 得到电能量市场出清电价, 并传递给跟随者 EVA。

(1) 目标函数

日前阶段发电机组开组合已确定, 所以在日前市场出清中发电机组启停成本被确定, 实时阶段 PMO 的优化目标不包括各机组启停成本, 只需优化机组的中标功率, 如式(36)所示。

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{t'=1}^{T'} C_{m,t'}^G P_{m,t'}^{G, rea} \quad (36)$$

式中: $P_{m,t'}^{G, rea}$ 、 $C_{m,t'}^G$ 分别为 t' 时段机组 m 的实时中标功率及报价。

(2) 约束条件

实时阶段 PMO 的功率平衡约束如式(37)所示。

$$P_{t'}^L = \sum_{m=1}^M P_{m,t'}^{G, rea} + P_{t'}^{EVA, dis, bid} + \Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid} - P_{t'}^{EVA, ch, bid} - \Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid} \quad (37)$$

式中: $P_{t'}^L$ 为实时阶段 t' 时段的电网基础负荷; $P_{t'}^{EVA, ch, bid}$ 、 $P_{t'}^{EVA, dis, bid}$ 分别为 EVA 在 t' 时段的计划充、放电功率; $\Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid}$ 、 $\Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid}$ 分别为 EVA 实时阶段 t' 时段在电能量市场中申报的偏差充、放电功率。

2) 下层跟随者 EVA 市场投标决策模型

实时运行阶段, EVA 需要满足 EV 用户的充电需求, 在实时市场中, EVA 以电能量市场和激励型需求响应综合收益最大为目标, 在日前市场出清电量的基础上增减充放电功率, 作为偏差电量参与实时市场投标和紧急型需求响应容量的申报, 满足 EVA 实际用电量需求的同时提高自身收益。

(1) 目标函数

EVA 在实时阶段以市场化需求响应综合收益 G^{rea} 最大为目标函数, 如式(38)所示。

$$\max G^{rea} = -G^{e, rec} - G^{e, rea} + G^{dr, inv} + G^{dr, em} + G^{ch, rec} + G^{ch, rea} \quad (38)$$

$$G^{ch, rea} = \sum_{t'=1}^{T'} (\lambda_{t'}^{EV, ch} \Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid} - \lambda_{t'}^{EV, dis} \Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid}) \quad (39)$$

式中: G^{rea} 为 EVA 在实时市场的收益目标; $G^{dr, em}$ 为 EVA 参与紧急型需求响应的补贴收益; $G^{ch, rea}$ 为实时阶段 EVA 给用户充电的收益; $\lambda_{t'}^{EV, ch}$ 、 $\lambda_{t'}^{EV, dis}$ 分别为 EVA 在 t' 时段给 EV 用户发布的充、放电价格。

(2) 约束条件

① EVA 实时功率平衡约束

$$P_{L,t'}^{EVA} = P_{t'}^{EVA, ch, bid} - P_{t'}^{EVA, dis, bid} + \Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid} - \Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid} \quad (40)$$

② EVA 实时市场投标约束

$$\begin{cases} E_{t',q,min}^{EVA, rea} \leq E_{t'}^{EVA, rea} \leq E_{t',q,max}^{EVA, rea} \\ E_{t'}^{EVA, rea} = E_{t'-1}^{EVA, rea} + (P_{t'}^{EVA, ch, bid} \eta_H^{ch} - P_{t'}^{EVA, dis, bid} / \eta_H^{dis}) \Delta t' + (\Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid} \eta_H^{ch} - \Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid} / \eta_H^{dis}) \Delta t' + \Delta E_{t'}^{EVA, rea} \\ \Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid} \Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid} = 0 \\ 0 \leq P_{t'}^{EVA, ch, bid} + \Delta P_{t'}^{EVA, ch, bid} \leq P_{t',max}^{EVA, ch, rea} \\ 0 \leq P_{t'}^{EVA, dis, bid} + \Delta P_{t'}^{EVA, dis, bid} \leq P_{t',max}^{EVA, dis, rea} \end{cases} \quad (41)$$

式中: $P_{L,t'}^{EVA}$ 为 t' 时段 EVA 参与电能量市场和需求响应后的负荷; $E_{t',q,max}^{EVA, rea}$ 、 $E_{t',q,min}^{EVA, rea}$ 分别为 EVA 在 t' 时段的最大、最小电量; $E_{t'}^{EVA, rea}$ 为 EVA 在 t' 时段的电量; $\Delta t'$ 为实时阶段调度时段长度; $\Delta E_{t'}^{EVA, rea}$ 为 EVA 在 t' 时段的电量变化; $P_{t',max}^{EVA, ch, rea}$ 、 $P_{t',max}^{EVA, dis, rea}$ 分别为 EVA 在 t' 时段的最大充、放电功率。

5 模型求解

本文构建 EVA 参与市场化需求响应的日前-实

时两阶段双层优化模型,在 MATLAB 的 YALMIP 编程环境下,采用 Gurobi 求解出主从博弈均衡解。

采用卡罗需-库恩-塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)将电力市场模型转化为 EVA 决策的约束条件,双层优化问题转化为单层问题,求解得到上层 PMO 市场出清结果,以及下层 EVA 在需求响应和电能量市场的投标计划。

6 算例仿真分析

6.1 算例参数

算例参数设置如下。

1) EV 参数。根据文献[26]调研的数据,设置 EVA 聚合 3000 辆 EV,包含日间充电私家车(EV1)、夜间充电私家车(EV2)、网约车(EV3)和公交车(EV4),4 类车型分别占比为 0.21:0.5:0.09:0.2。EV 充电站支持充电、放电功能,设置私家车额定充放电功率为 7 kW,网约车包含慢速充电和快速充电两种模式,最高充、放电功率分别为 7 kW 和 60 kW,公交车为 60 kW,私家车、网约车、公交车的蓄电池容量分别设置为 60 kWh、60 kWh、300 kWh。EV 用户的充放电效率随温度变化而改变,到站 SOC 受不同典型日温度的影响,根据第 2 节中不同温度下的载电量与耗电量计算得到。4 类 EV 的到网时间、离网时间参数设置见表 2。

表 2 EV 数据参数

Table 2 EV data parameters

EV	到网时间	离网时间
EV1	$N(18,2)$	$N(8,1)$
EV2	$N(9,1)$	$N(17,2)$
EV3(a)	$N(21,1)$	$N(7,1)$
EV3(b)	$N(14,1)$	$N(15,1)$
EV4	$N(19,1)$	$N(6,1)$

注: $N(x,y)$ 表示数据符合正态分布;EV3(a)、EV3(b)分别表示在夜间慢速充电和在白天快速充电的网约车。

2) 市场参数。参考天津市需求响应实施细则设置邀约型需求响应的削峰价格为 2 元/kWh、填谷价格为 1.2 元/kWh,紧急型需求响应的削峰价格为 5 元/kWh^[2]。EV 在充电站内充电时,设置 EV 的充、放电价格分别为出清电价的 1.1 倍和 0.8 倍。

3) 4 种不同典型日参数。由蒙特卡洛抽样法得到:① 2 月典型日(春节期间);② 5 月典型日;③ 8 月典型日;④ 11 月典型日的不同负荷。激励型需求响应的发布情况会以电网典型日的负荷为依据。

4) 温度影响下各季节典型日负荷。各季节典型日的负荷数据如图 3 所示,2 月典型日 01:00—06:00 时段负荷在 900~930 MW 区间,处于较低水平,电

网侧发布邀约型填谷需求响应,激励 EVA 调整自身负荷至较高水平,提升填谷规模;5 月典型日 01:00—06:00 时段负荷在 800~815 MW 区间,负荷较低,电网侧发布邀约型填谷需求响应;8 月份处于夏季用电高峰期,温度急剧升高的同时电网负荷会显著增加,在 15:00—16:00、20:00—21:00 两个时段负荷较高,是削峰的关键时段,但由于 17:00—18:00 时段负荷急剧增加可能会影响电网运行,电网侧发布一次紧急型削峰来保障电网安全;11 月份处于温度较低的冬季,空调、电暖气等取暖设施的使用,使 19:00—20:00 时段负荷较高,此时发布邀约型削峰需求响应来缓解电网压力,在 02:00—05:00 时段负荷处于低谷,EVA 可增加用电参与邀约型填谷需求响应,以提升电网负荷水平。

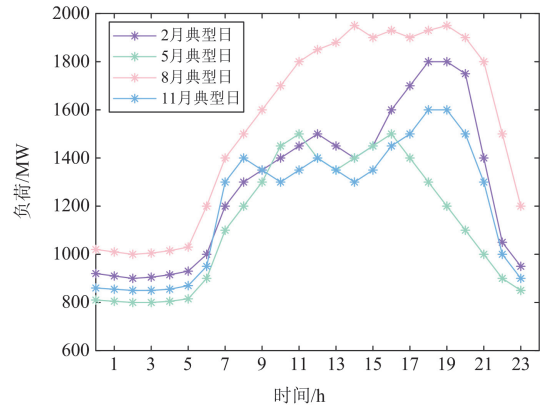


图 3 不同季节典型日负荷曲线对比

Fig. 3 Comparison of typical daily load curves in different seasons

6.2 仿真场景设计

设置 4 种典型算例场景,对比不同场景下 EVA 运营收益以及参与激励型需求响应削峰填谷的效果,以体现本文方法的优势。

场景 1: EVA 不考虑环境温度,仅参与电能量市场,即 EVA 用能策略仅考虑电价的影响。

场景 2: EVA 考虑环境温度,仅参与电能量市场,即 EVA 用能策略考虑温度对调度能力的影响及电价。

场景 3: EVA 不考虑环境温度,参与电能量市场和激励型需求响应。EVA 用能策略受到电价和激励型需求响应所获收益的影响。

场景 4: EVA 考虑环境温度,参与电能量市场和激励型需求响应。EVA 用能策略在场景 3 的基础上增加了温度对自身调度能力的影响。

以上 4 种场景中,EVA 均以综合收益最大化为目标,优化其日前-实时两阶段用能计划和投标策略。

6.3 仿真结果对比和分析

1) 考虑温度影响下的 EV 集群可调度能力

由蒙特卡洛抽样法抽样得到 2 月典型日 EV 集群的到网、离网时间及荷电状态等数据,并考虑温度影响下的载电量、耗电量,预测 EV 集群的可调度能力。EVA 以集群的可调度能力作为参考,满足 EV 用户充电需求的同时响应需求响应信号并参与电力市场投标。根据典型日内不同时段温度计算各时段充放电效率,并采用闵可夫斯基求和得出 EV 集群各时段的电量上下限,即可调度能力如图 4 所示。

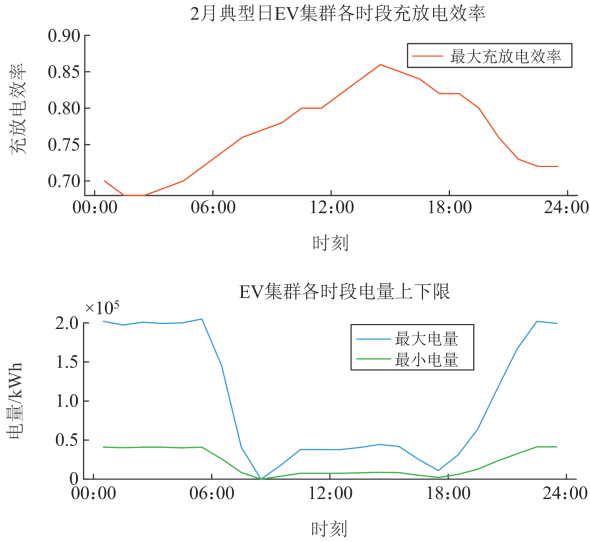


图 4 EV 集群可调度能力

Fig. 4 EV cluster schedulability

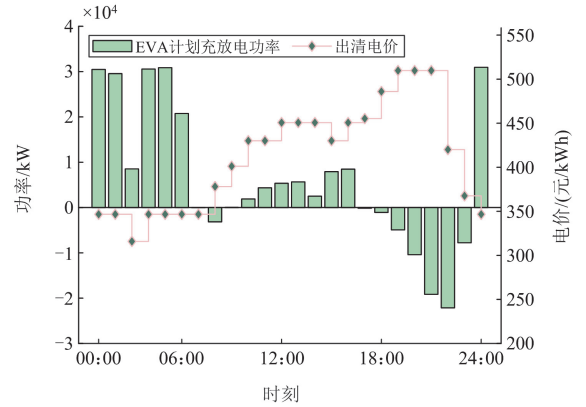
由图 4 可知,日间气温稍高时段(如 12:00—18:00)充放电效率高;夜间时段(如 00:00—06:00)充放电效率较低。EV 集群在夜间 21:00—24:00 及 01:00—06:00 时段具有最大可调度能力,这是由于大部分 EV 都在夜间休息时间选择并网充电;在 12:00—17:00 时段 EV 集群可调度能力出现一个小高峰,这是由于大部分电动网约车为保证夜间订单需求,会选择在订单较少的下午时段进行补充充电。

由可调度能力及模型构建可总结得出,温度通过改变电池性能和用户意愿两个维度来影响可调度潜力与实际响应量转化率,不同温度区间的主导约束不同。低温会导致电池容量衰减并且充放电功率受限,在此温度区间($-10^{\circ}\text{C} < H < 10^{\circ}\text{C}$)电池性能为主导,且随着温度的持续下降,转化率的波动完全由电池性能衰减主导;适宜温度区间($10^{\circ}\text{C} < H < 25^{\circ}\text{C}$): EV 电池性能充足,物理因素不再构成较大限制,用户意愿成为主导,转化率受物理约束影响

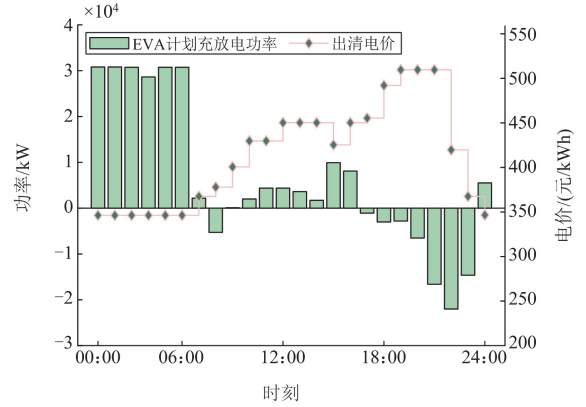
较小;高温区间($25^{\circ}\text{C} < H < 35^{\circ}\text{C}$):物理约束与心理约束叠加,双重约束交替主导,高温区间内较低温度时由用户意愿主导,如果温度继续上升,转化率因 EV 电池性能改变而发生变化。

2) 考虑温度和激励型需求响应对市场出清结果的影响

由于场景与典型日设置较多,在此以 2 月典型日和 8 月典型日为例进行算例说明。2 月典型日的日前电能市场的出清结果及 EVA 日前计划用电量如图 5 所示,8 月典型日如图 6 所示。



(a) 场景2日前电能市场出清结果



(b) 场景4日前电能市场出清结果

图 5 2 月典型日日前市场出清结果和 EVA 计划用电量

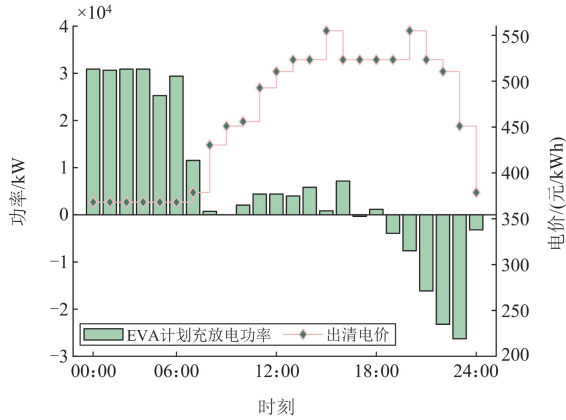
Fig. 5 Market clearance results before the typical day in February and the planned electricity consumption of EVA

场景 1 和场景 2 中 EVA 只参与电能市场,其用能策略只受到电价的影响。场景 2、4 在场景 1、3 的基础上考虑了环境温度的影响, EVA 可以根据自身实际可调度能力进行购电量申报,更真实地反映了 EVA 在各时段的可调度能力。

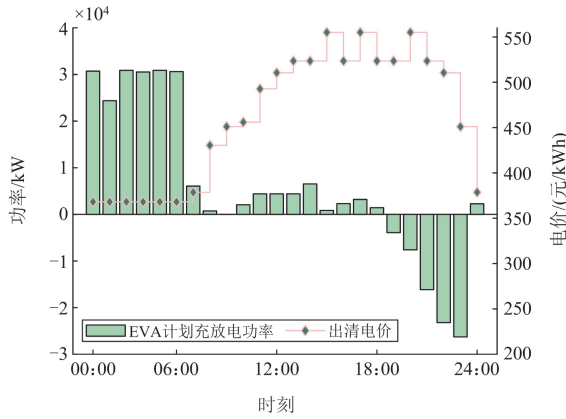
由图 5(a)可知, EVA 根据自身各时段的调度能力参与电能市场,在电价较低时段(如 01:00—

06:00)多充电,在电价较高时段(如17:00—22:00)少充电或者通过放电来获取收益,从而减少购电成本。由图5(a)、图5(b)对比可知,2月典型日中EVA参与邀约型填谷需求响应后,为获取更多的需求响应补贴收益,在邀约型填谷需求响应发布时段(01:00—06:00)大大提高充电量。

由图6(a)、图6(b)对比可知,8月典型日中EVA参与邀约型削峰需求响应后,在邀约型削峰需求响应发布时间段(如16:00),EVA通过减少充电量或提高放电量来参与电网侧发布的削峰需求响应。



(a) 场景1日前电能市场出清结果



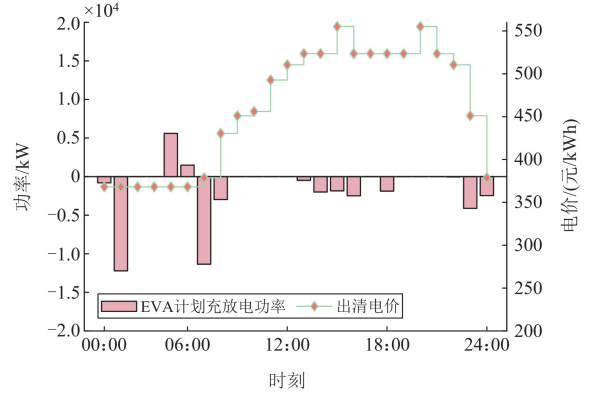
(b) 场景3日前电能市场出清结果

图6 8月典型日日前市场出清结果和EVA计划用电量
Fig. 6 Pre-market clearing results and the planned electricity consumption of EVA on typical days in August

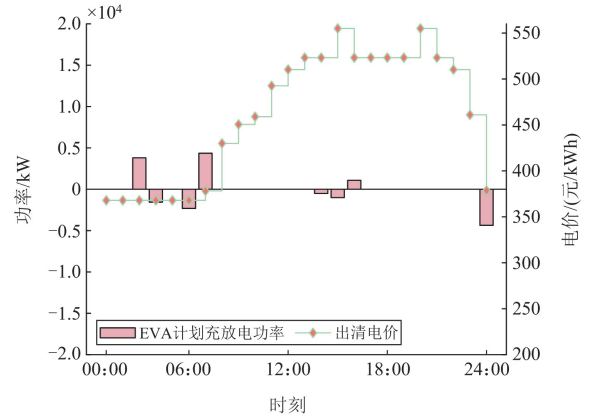
综上所述,在邀约型填谷/削峰市场化需求响应的激励下,EVA考虑温度参与市场,根据出清电价进行申报量调节的基础上,进一步参与电网侧需求响应,既降低了自身充电成本,又提高了综合收益,同时实现了电网侧的削峰填谷。

为进一步分析温度及需求响应对EVA用能策

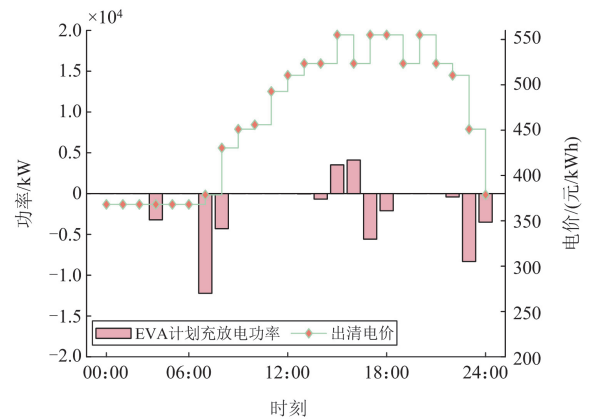
略所产生的影响,对4种场景下EVA在实时阶段的用能策略进行分析。以8月典型日为例,多个场景下的实时出清结果和EVA偏差充放电功率如图7所示。由图7(a)和图7(b)对比可知,相比于场景1仅参与电能量市场,场景2中EVA在考虑了温度的影响之后,明显减少了充放电功率的偏差,如(02:00、07:00),不仅降低了因功率误差带来的购电成本,还能使自身的负荷更加稳定。



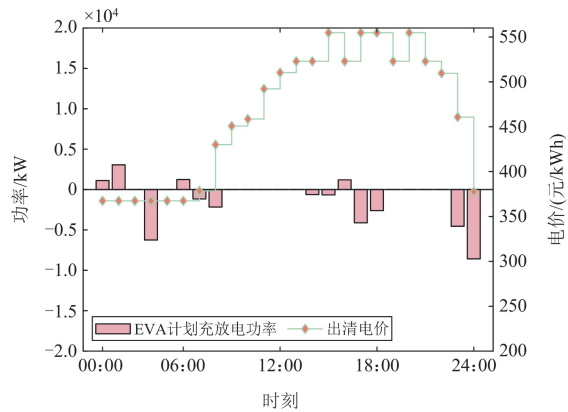
(a) 场景1实时电能市场出清结果



(b) 场景2实时电能市场出清结果



(c) 场景3实时电能市场出清结果



(d) 场景4实时电能市场出清结果

图7 8月典型日实时市场出清结果和EVA计划用电量
Fig. 7 Real-time market clearing results and EVA planned electricity consumption on typical days in August

由图 7(a)和图 7(c)对比可知,在紧急型削峰需求响应发布的时间段(17:00—18:00),EVA 为获取较高的紧急型需求响应补贴收益,会主动降低充电量或增加放电量,以获得更多的需求响应补贴收益。由图 7(d)可知,场景 4 在场景 3 的基础上,EVA 在考虑温度的影响后充放电功率误差再次降低,如(15:00、16:00),避免了因实际响应量达不到日前申报响应量带来的无效响应惩罚,从而更加合理地安排各时段充放电功率,提升自身收益。

3) 不同场景下 EVA 收益对比

以 8 月典型日为例,4 种场景下的 EVA 收益如表 3 所示。其中,场景 1 和场景 2 中 EVA 仅考虑电能市场,EVA 在电力市场中的目标为参与日前—实时两阶段电能市场购电成本最小化,EVA 以最低的充电成本满足 EV 用户的充电需求。

表 3 不同场景下的 EVA 收益

Table 3 EVA gains under different scenarios

收益/成本	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
日前购电成本	45 784.30	53 437.48	45 885.32	53 535.29
实时购电成本	-14 156.43	-1206.37	-10 280.07	-1023.25
充电收益	47 234.91	69 514.63	51 901.81	70 003.37
邀约型需求 响应收益	0	0	20 657.10	23 870.50
紧急型需求 响应收益	0	0	12 898.30	14 863.00
总收益	15 607.04	17 283.50	49 851.96	56 224.83

由各场景收益/成本对比可知,场景 1 的日前电能市场购电成本较低,实时电能市场购电成本偏差较高。场景 2 考虑了温度影响后,对自身调度能力预测更加精准,日前申报购电量提高,购电成

本增加,且实时购电成本偏差降低,EVA 总收益整体提高了 1676.46 元,说明 EVA 考虑温度影响后可以更加合理、准确地安排各时段的充放电功率。场景 3 中 EVA 在参与激励型需求响应之后相较于场景 1 购电成本略高,且由于现有的天津市需求响应细则中设置邀约型削峰需求响应价格较高,为算例出清电价的 4~5 倍,所以在考虑需求响应补贴收益后,场景 3 相对于不考虑温度影响且只参与电能市场的场景 1 来说,总收益大幅提高了 34 244.92 元。场景 4 在场景 3 的基础上考虑了温度的影响后,对自身荷电状态预测更加精准,可以更灵活地参与需求响应,其 EVA 所获得总收益是所有场景中最高的,相较于场景 3 再次提高了 6372.87 元。

4) 电网侧削峰填谷效果分析

本文采用了“价格引导型”和“补贴激励型”协同机制,能够在有效提升 EVA 经济性的基础上,促使地区电网负荷实现削峰填谷。将 8 月份原始负荷与添加 EV 有序充电负荷优化后的负荷曲线进行对比分析,结果如图 8 和表 4 所示。

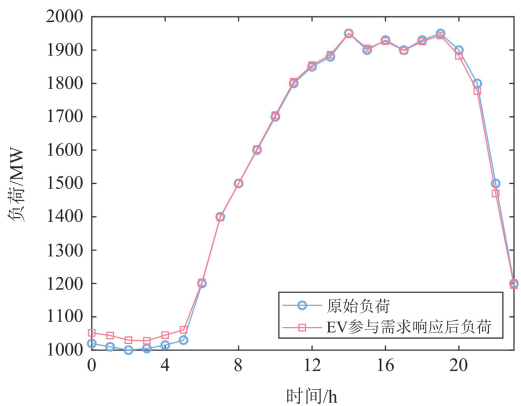


图 8 8 月典型日需求响应前后的负荷曲线对比

Fig. 8 Comparison of load curves before and after typical daily demand response in August

表 4 优化前后负荷曲线指标对比

Table 4 Comparison of load curve indicators before and after optimization

负荷曲线类型	峰谷差/MW	负荷方差/MW ²
原始负荷曲线	950.5	144 530
优化后负荷曲线	922.5	135 910

由结果可知,EVA 参与需求响应后,峰谷差缩小,负荷方差变小,负荷曲线的波动性降低。由此可知,EVA 参与需求响应后能够将 EV 负荷由用电峰时段向用电平、谷时段转移,能够有效地减小电网负荷峰谷差和全天负荷方差,实现削峰填谷,可以降低调度成本与风险,进而提高市场运行效率。

7 结论

为应对极端环境温度对电网需求响应及电动汽车运行产生的重大影响,保障电网供电可靠性与EVA运营经济性,提出了考虑温度影响的EVA参与双型需求响应的日前-实时市场化运营策略。通过仿真分析得出以下结论:

1) 在双型需求响应机制引导下,EVA通过改变自身用能行为,根据出清电价实现“低充高放”,响应电网发布的削峰填谷信号,有效降低电网因极端温度变化导致的负荷波动,保障电网供电可靠性。

2) 通过多场景整体收益对比分析,EVA在考虑温度影响后参与市场化激励型需求响应,不仅可以更加合理地调整自身用能行为,还增加了EVA的收入来源。以8月份典型日为例,与不考虑温度影响且不参与补贴激励型需求响应的场景对比,EVA的综合收益显著提高了40 857.28元。

3) 通过建立电力市场运营商与EVA之间的主从博弈优化模型,实现了极端温度影响下的电网侧与负荷侧EVA的协调互动,保障了多方利益,促进了系统供需平衡。

综上所述,本文所提策略不仅提高了EVA的综合收益,而且在环境温度、负荷发生改变时,EVA通过参与双型需求响应,从而助力系统供需平衡。

参考文献

- [1] 辛保安,李明节,贺静波,等.新型电力系统安全防御体系探究[J].中国电机工程学报,2023,43(15):5723-5731.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5731.
- [2] 天津市工业和信息化局.天津市工业和信息化局组织发布《天津市2022年电力需求响应实施细则》[EB/OL]. [2022-01-24]. https://gyxxh.tj.gov.cn/ZWGGK4147/ZCWJ6355/wjwj/202201/t20220124_5787811.html
- [3] 江苏省发展和改革委员会.江苏省发展和改革委员会组织发布《江苏省电力需求响应实施细则》[EB/OL]. [2024-06-13]. https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/20/art_51007_11276655.html
- [4] WANG Wenhao, TANG Aihong, WEI Feng, et al. Electric vehicle charging load forecasting considering weather impact[J]. Applied Energy, 2025, 383.
- [5] 焦治杰,许寅,刘翌,等.寒潮天气下考虑电动汽车参与灵活调节的电网优化调度方法[J].电力系统自动化,2025,49(4):116-127.
JIAO Zhijie, XU Yin, LIU Zhao, et al. Optimal scheduling method for power grid considering participation of electric vehicles in flexible regulation during cold wave weather[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 116-127.
- [6] 牛牧童,廖凯,杨健维,等.考虑季节特性的多时间尺度电动汽车负荷预测模型[J].电力系统保护与控制,2022,50(5):74-85.
NIU Mutong, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Multi-time-scale electric vehicle load forecasting model considering seasonal characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 74-85.
- [7] YAN Jie, ZHANG Jing, LIU Yongqian, et al. EV charging load simulation and forecasting considering traffic jam and weather to support the integration of renewables and EVs[J]. Renewable Energy, 2020, 159: 623-641.
- [8] 顾睿,于艾清,潘含芝,等.基于改进贝叶斯最大熵的乡村旅游电动汽车多时间尺度充电负荷预测[J].电力系统保护与控制,2025,53(12):117-127.
GU Rui, YU Aiqing, PAN Hanzhi, et al. Multi-timescale charging load forecasting for rural tourism electric vehicles based on improved Bayesian maximum entropy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 117-127.
- [9] 王子伟,梁媛媛,赵宇,等.汽车空调技术的生命周期气候性能评估[J].制冷技术,2014,34(4):1-7.
WANG Ziwei, LIANG Yuanyuan, ZHAO Yu, et al. Life-cycle climate performance assessment of mobile air conditioning technology[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(4): 1-7.
- [10] 霍云龙.纯电动汽车能耗模型与节能路径规划研究[D].长春:吉林大学,2022.
HUO Yunlong. Pure electric vehicle energy consumption model and the energy saving path planning research[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [11] 李明,薛庆峰,张可欣,等.电动汽车热泵空调系统性能分析[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(6):1943-1952.
LI Ming, XUE Qingfeng, ZHANG Kexin, et al. Performance analysis of heat pump air conditioning system for electric vehicles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 1943-1952.
- [12] 李晓露,徐婉云,柳劲松,等.考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域聚合方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):58-68.
LI Xiaolu, XU Wanyun, LIU Jinsong, et al. Adjustable power domain aggregation method for demand-side resources considering temporal correlation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 58-68.
- [13] 韩林阳,叶承晋,朱超,等.高温天气下计及用户意愿的城市充电负荷空间引导策略[J].电力系统自动化,

- 2024, 48(10): 139-150.
- HAN Linyang, YE Chengjin, ZHU Chao, et al. Spatial guidance strategy for urban charging loads in high-temperature weather considering user willingness[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 139-150.
- [14] 王俊杰, 贾雨龙, 米增强, 等. 基于双重激励机制的电动汽车备用服务策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 68-76.
- WANG Junjie, JIA Yulong, MI Zengqiang, et al. Reserve service strategy of electric vehicles based on double-incentive mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 68-76.
- [15] 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.
- [16] 胡俊杰, 马文帅, 薛禹胜, 等. 基于 CPSSE 框架的电动汽车聚合商备用容量量化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 46-54.
- HU Junjie, MA Wenshuai, XUE Yusheng, et al. Quantification of reserve capacity provided by electric vehicle aggregator based on framework of cyber-physical-social system in energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 46-54.
- [17] 孙庆, 杨秀金, 代云飞, 等. 温度对磷酸铁锂电池性能的影响[J]. 中国自行车, 2012(7): 42-49.
- SUN Qing, YANG Xiujin, DAI Yunfei, et al. The influence of temperature on the performance of lithium iron phosphate batteries[J]. China Bicycle, 2012(7): 42-49.
- [18] 张琦, 杨健维, 向悦萍, 等. 计及气象因素的区域电动汽车充电负荷建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 14-22.
- ZHANG Qi, YANG Jianwei, XIANG Yueping, et al. Regional electric vehicle charging load modeling method considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 14-22.
- [19] 王睿, 高欣, 李军良, 等. 基于聚类分析的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 37-44.
- WANG Rui, GAO Xin, LI Junliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting method based on clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 37-44.
- [20] LAURIKKO J, GRANSTRÖM R, HAAKANA A. Realistic estimates of EV range based on extensive laboratory and field tests in Nordic climate conditions[J]. World Electric Vehicle Journal, 2013, 6(1): 192-199.
- [21] LI Huamin, WANG Qingqing, XIONG Weixin. New model of travel-time prediction considering weather conditions: case study of urban expressway[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2021, 147(3).
- [22] 王海玲, 张美霞, 杨秀. 基于气温影响的电动汽车充电需求预测[J]. 电测与仪表, 2017, 54(23): 123-128.
- WANG Hailing, ZHANG Meixia, YANG Xiu. Electric vehicle charging demand forecasting based on influence of weather and temperature[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(23): 123-128.
- [23] 郭月新. 考虑环境温度下电动汽车中长期负荷预测及充电负荷优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- GUO Yuexin. Research on medium and long-term load forecasting and charging load optimization of electric vehicles considering ambient temperature[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [24] 李恒杰, 刘依环, 曾贤强, 等. 基于前景理论的小区负荷日前随机优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(17): 67-78.
- LI Hengjie, LIU Yihuan, ZENG Xianqiang, et al. Day-ahead stochastic optimal scheduling strategy for residential community loads based on prospect theory[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(17): 67-78.
- [25] 程雄, 冯佳, 吕欣, 等. 兼顾激励相容的水电富集电网中长期电力市场交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 12-24.
- CHENG Xiong, FENG Jia, LÜ Xin, et al. Medium and long-term electricity market trading model considering incentive compatibility in a hydropower-dominated grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 12-24.
- [26] 罗卓伟, 胡泽春. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
- LUO Zhuowei, HU Zechun. Study on plug-in vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.

收稿日期: 2025-08-28; 修回日期: 2026-03-27

作者简介:

李咸善(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网运行与控制、新型电力系统运行与控制、水电站仿真与控制; E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

李家辉(2001—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 634749427@qq.com

李丹宁(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 1042848274@qq.com

(编辑 魏小丽)