引用格式:王钦,赵健,崔昊杨.基于用户响应信用度评估的电动汽车可靠调度[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):193-203.
Citation: WANG Qin, ZHAO Jian, CUI Haoyang. Reliable scheduling of electric vehicles based on user response credibility assessment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):193-203.

基于用户响应信用度评估的电动汽车可靠调度

王　钦[1],赵　健[1],崔昊杨[2]
(1.上海电力大学电气工程学院,上海 200090;2.上海电力大学电子与信息工程学院,上海 200090)

摘　要:电网调度中心通过与电动汽车(electric vehicle,EV)用户签订需求响应协议,实现对EV需求响应的有序调度。EV用户可能会出现提前结束充电、虚报可调度负荷等违约行为,影响电网调度策略的施行效果。为提升电网调度策略的可靠性,提出基于EV用户响应信用度评估的EV可靠调度策略。首先,分析EV用户响应信用度的影响因素,从诚信度、合规度和支持度出发,构建EV用户响应信用度评估指标模型;其次,为更准确表征电网专家对EV用户信用度指标权重的判断,提出基于T-球形模糊数的改进层次分析法计算指标权重;再次,构建考虑EV用户信用度和电网负荷波动的优化调度模型,求解EV调度策略;最后,采用算例对所提模型与策略进行了验证。研究结果表明,相比于未考虑用户信用度的调度策略,所提策略实际可调度的EV负荷更多,不仅有效平抑电网波动,还能降低电网潜在的风险与损失。

关　键　词:电动汽车;用户信用度;指标权重;T－球形模糊数;有序调度
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.019　　**中图分类号**:TM73　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0193-11

Reliable scheduling of electric vehicles based on user response credibility assessment

WANG Qin[1], ZHAO Jian[1], CUI Haoyang[2]
(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Grid dispatch centers can achieve orderly dispatch of electric vehicle (EV) demand response by signing demand response agreements with EV users. However, EV users may violate the agreements by ending charging behaviour early or misreporting dispatchable loads, which affects the effectiveness of the grid scheduling strategy. To improve the reliability of the grid scheduling strategy, a reliable EV scheduling strategy based on user response credibility assessment is proposed. First, the influencing factors of EV user response credibility are analysed, and an evaluation index model of EV user response credibility is constructed from the aspects of integrity, compliance, and support. Second, to more accurately represent the judgment of power grid experts on the weights of EV user response credibility indicators, an improved analytic hierarchy process based on T-spherical fuzzy numbers is proposed to calculate the indicator weights. Third, an optimization scheduling model considering EV user response credibility and power grid load fluctuations is constructed to obtain the EV scheduling strategy. Finally, a numerical example is used to verify the proposed model and strategy. The results show that, compared with the scheduling strategy without considering user response credibility, the proposed strategy can actually dispatch more EV loads, which not only effectively smooths power grid fluctuations but also reduces potential risks and losses to the power grid.

Key words: electric vehicle; user credibility; indicator weight; T-spherical fuzzy number; orderly scheduling

收稿日期:2024-12-27;**修回日期**:2025-12-16
基金项目:国家自然科学基金(51907114)
通信作者:赵　健(1990—),男,博士,教授,主要从事智能配用电,灵活性资源调度和分布式发电管控等方面的研究;E-mail:zhaojianee@foxmail.com

在“双碳”战略与国家能源战略和加快构建新型电力系统的背景下[1],电动汽车(electric vehicle,EV)作为一种特殊的灵活性需求侧资源,因其绿色环保、负荷可调的特点受到广泛重视[2-3]。随着车网互动(vehicle to grid,V2G)技术、电力物联网和任务卸载技术的快速发展[4-6]、电力市场的逐步完善,亟待可靠的需求响应调度策略对EV进行调控,保障电网的安全稳定运行。

目前,已有大量有关EV参与需求响应的研究。文献[7]考虑了在EV参与需求响应过程中个人与社会因素的多因素交互影响,构建了EV多场景的需求响应充电调度策略。文献[8]为充分挖掘EV的响应潜力并提高聚合商的盈利能力,构建了EV参与需求响应的双层优化调度模型。文献[9]分析了EV与5G基站参与下的多网络耦合关系,构建了EV集群与5G基站集群的灵活性模型,并基于此模型提出了EV需求响应调度策略。事实上,EV不同于其他需求侧资源,其充、放电行为的执行情况易受用户影响。部分用户出于各种原因,可能会提前中断EV与充电设施的连接[10]或虚假申报可调用负荷以获取更多经济收益[11],而现有的EV调度策略研究往往建立在用户能完整执行调度计划与申报信息准确无误的基础上[12-15]。因此,量化评估用户响应信用度应作为制定EV调度策略的重要环节,这对提高电网调度策略的可靠性具有重要实际意义。

因此,国内外学者开始考虑用户信用度,以提高EV调度策略的可靠性。文献[16]考虑根据历史交易次数量化用户响应信用度来实现EV的可靠调度。文献[17]将用户信用度定义为申报负荷占实际调度负荷的比例,并在策略中优先调度用户信用度高的EV。但文献[16-17]量化用户信用度的指标较单薄,没有构建出全面描述用户信用度的评估模型。文献[10]以用户违约时长占比、荷电状态比和历史违约水平来评估用户信用指数,并利用动态加权法计算指标权重,根据用户信用指数修正EV充、放电计划,但其指标赋权方法较简单,未考虑用户信用度的特点对评估指标进行合理赋权。

1965年,ZADEH教授提出了模糊集的概念[18],通过定义隶属度函数来刻画事物的模糊性。文献[19]提出了基于改进q-阶正交模糊Einstein有序加权平均算子的层次分析法来计算指标主观权重,该方法较为全面地描述了专家判断的模糊性。电网专家经验丰富,其制定的用户信用度的指标权重适合性更强,球形模糊集能更全面地表征专家判断的模糊性,基于球形模糊集的指标赋权方法对于调度中心的可信度更高。

综上所述,为提高电网调度EV策略的可靠性,本文提出基于EV用户响应信用度评估的EV可靠调度策略。先从诚信度、合规度和支持度构建EV用户响应信用度评估指标模型;再提出基于T-球形模糊数的层次分析法计算指标主观权重,从隶属度、非隶属度、中立度和拒绝度这4个方面全面表征专家判断的模糊性,该评估方法更贴近电网实际应用;然后,构建双层调度模型,求解满足电网需求所要调用的一批高信用度EV用户;最后,采用算例仿真,验证所提方法的有效性。所提方法的实际可调度负荷更多,其不仅能平抑电网负荷波动,还能提高调度策略的可靠性,对保障电网的稳定运行具有实用价值。

1 基于用户信用度的EV需求响应机制设计

EV负荷的时空特性受用户影响极大,当调度用户参与需求响应时,应采用一定方法激励其主动意愿。目前,中国EV响应机制主要可分为价格型和激励型2种[20]。

价格型需求响应通过调整电价,间接引导EV用户在不同电价时段改变充电负荷。然而,该方法存在一定局限性,难以有效保障EV用户的响应速度与参与响应规模的可控性[21]。

激励型需求响应基于EV用户与电网调度中心签订的协议,通过经济补偿机制激励用户参与响应。该机制由调度中心集中决策实施,具备良好的实时调节能力与较高的EV用户调度可靠性。但该种激励型响应方式只能调度签订需求响应协议的EV用户,且其通常以运营成本最小化为核心目标,较少顾及用户侧的响应意愿。因此,与电网调度中心签订协议的EV用户的信用情况与能否完整执行电网调度策略这两点是激励型响应方式中电网调度中心制定的调度策略可靠性的重要影响因素。为提高调度策略的可靠度,也应提高EV用户参与需求响应的积极性,本文基于激励型响应方式,设定需求响应机制流程:

1) 响应申请。电网调度中心发出预调度时段

的需求响应邀请，有需求响应意向的EV用户在e平台提交响应申请，上报包含响应时段、响应负荷等在内的响应信息。

2）用户信用度评估。各聚合商根据EV用户账号标签识别获取EV用户参与需求响应的历史信息，并与电网交易中心下发的单位电量馈电电价进行比较，对提交申请的EV用户进行用户信用度评估，根据评估结果对EV用户进行排序。

3）EV日前调度策略。聚合商向电网调度中心提交EV用户的响应时段、申报负荷和用户信用度评估结果。电网调度中心根据负荷预测结果，计算需求响应时段的电网需求，根据各时段的电网需求、EV的用户信用度顺序和申报负荷形成各时段的EV调度策略，确定中标的EV用户与中标负荷。

4）需求响应协议。聚合商根据电网发布的中标结果，通过e平台向中标的EV用户发出签约通知，双方进行确认。

基于该EV需求响应机制的能量流、信息流“双流”EV控制框架如图1所示。

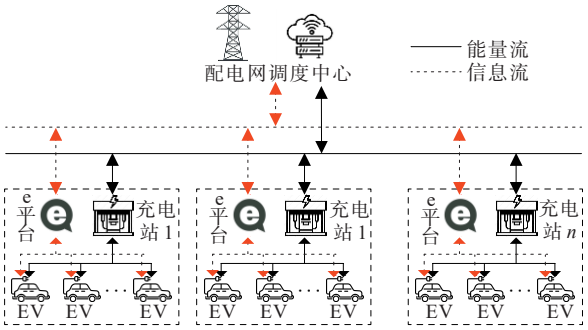

图1　EV控制框架

Figure 1　EV control framework

2　EV用户响应信用度评估指标模型

量化评估用户响应信用度是本文制定EV响应调度策略的重要前提，用户响应信用度的准确量化须构建可靠全面的评估指标模型。

为科学综合评估用户响应信用度，本文在吴氏三维信用理论的基础上，从诚信度、合规度和支持度3个方面出发，分别构建指标，评估用户响应信用度。

2.1　诚信度指标

诚信度主要考量EV用户过往参与需求响应时的守信情况。EV用户出于个人考虑，可能会提前中断EV与充电设施的连接，违背与电网调度中心签订的需求响应协议，这将影响需求响应调度策略的施行结果。EV用户在过往参与需求响应时的违约时长、响应协议的违背频率，都是衡量用户守信情况的重要因素。

因此，本文以平均违约时长占比和响应协议违背频率作为诚信度指标评估用户响应信用度。

2.1.1　平均违约时长占比

违约时长占比是用户违反需求响应协议的时长与协议签订的EV调用时长之间的比值，平均违约时长占比的计算式为

$$\gamma_{\mathrm{ave},j}=\frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n}\frac{t_{i,j}^{\mathrm{e}}-t_{i,j}^{\mathrm{o}}}{t_{i,j}^{\mathrm{e}}} \tag{1}$$

式中，$\gamma_{\mathrm{ave},j}$为第j位EV用户的平均违约时长占比；n_j为该EV用户参与需求响应的历史总次数；$t_{i,j}^{\mathrm{e}}$为第j位EV用户第i次参与需求响应时协议调用的时长；$t_{i,j}^{\mathrm{o}}$为第j位EV用户第i次参与需求响应时实际响应的时长。

2.1.2　响应协议违背频率

响应协议违背频率是EV用户违背需求响应协议的次数与EV用户参与需求响应次数的比值，即

$$f_{j,\mathrm{d}}=\frac{n_{j,\mathrm{d}}}{n_j} \tag{2}$$

式中，$f_{j,\mathrm{d}}$为第j位EV用户响应协议违背频率；$n_{j,\mathrm{d}}$为第j位EV用户的历史违约次数。

2.2　合规度指标

合规度主要度量EV用户申报响应信息时的守信情况，部分EV用户可能会虚假申报可调用负荷，以获取更多经济收益。因此，必须考虑用户申报可调度负荷的合规度。本文基于模糊数学理论和EV的历史数据，将以往参与需求响应的完成度ρ作为合规度指标，评估用户响应信用度，即

$$\rho_j=\frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_{i,j}^{\mathrm{d}}}{C_{i,j}^{\mathrm{h}}} \tag{3}$$

式中，ρ_j为第j位EV用户的平均申报负荷合规度；$C_{i,j}^{\mathrm{h}}$为第j位EV用户第i次EV需求响应时申报的负荷；$C_{i,j}^{\mathrm{d}}$为第j位EV用户第i次EV需求响应时的实际参与需求响应的负荷。

2.3　支持度指标

支持度主要度量EV用户本次响应的可能守信情况。一般来说，越经常响应分时电价政策的EV用户的响应电网需求调度的意愿也越高。同时，为提高用户参与需求响应的意愿，电网通过经济补偿方式来激励用户。随着馈电电价的提高，EV用户对本次响应任务的支持度越高，越愿意完整执行响

应调度策略。此外，反复充、放电行为导致的电池损耗也会影响用户持续使用的意愿。

因此，本文以馈电电价响应程度和电池折旧损失作为支持度指标，评估用户响应信用度。

2.3.1 分时电价响应程度

为避免EV用户无规则充电行为给电网带来的负荷波动，电网公司施行了分时电价政策：当电网负荷较大时，设定电价较高的峰时电价；在电网负荷较小时，设定电价较低的谷时电价。EV用户对分时电价的响应程度，反映了其对电网需求响应政策和自身利益的综合考量。分时电价响应程度是EV用户在规定时间段进行充电的次数与总充电次数的占比，即

$$\varepsilon_j = \frac{n_{j,\mathrm{c}}}{n_{j,\mathrm{z}}} \tag{4}$$

式中，ε_j为第j位EV用户分时电价响应程度；$n_{j,\mathrm{c}}$为第j位EV用户在谷时进行充电行为的次数；$n_{j,\mathrm{z}}$为第j位EV用户进行充电行为的总次数。

2.3.2 馈电电价的响应程度

馈电电价指电网公司给予参与需求响应的EV用户的补偿。随着馈电电价的变化，EV用户对馈电电价的响应程度η也发生改变，且其存在最低可感知阈值[22-23]。当电价低于可感知阈值时，EV用户对馈电电价的响应程度较低，响应策略完整执行的可能性也较低；当电价高于可感知阈值时，随着电价的提高，EV用户对馈电电价的响应程度逐渐升高；当电价达到一定数值后，EV用户对馈电电价的响应程度达到饱和，该EV用户会完整执行该响应调度策略，即

$$\eta = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant p < p_0 \\ \dfrac{p - p_0}{p_\mathrm{c} - p_0}, & p_0 \leqslant p < p_\mathrm{c} \\ 1, & p_\mathrm{c} \leqslant p \end{cases} \tag{5}$$

式中，p为单位电量的馈电电价；p_0为可感知馈电电价阈值；p_c为饱和馈电电价。

2.3.3 电池折旧损失

反复充、放电行为行为会导致电池损耗，影响用户持续响应的意愿。本文定义电池损耗L为

$$L = rB_\mathrm{loss}C_\mathrm{d} \tag{6}$$

式中，r为残值率，本文设其值为5%；B_loss为单次充、放电的平均电池损耗成本，本文设其值为0.26元[24]；C_d为实际参与需求响应的负荷。

本文所建立的用户响应信用度评估体系如图2所示。

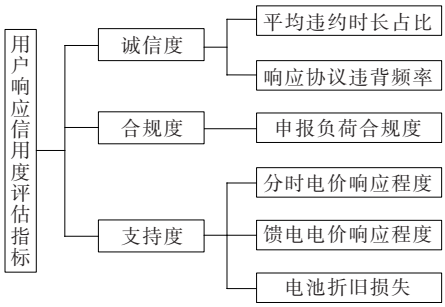

图2 用户响应信用度评估体系

Figure 2 User response credibility assessment system

3 基于T-球形模糊数的层次分析法

合理的指标赋权能准确量化计算用户响应信用度。本文提出的用户信用度评估指标是为电网需求响应调度服务的，故邀请电网专家从电网实际需求出发对各指标进行评估。在实际应用中，专家的判断通常是模糊的，单一标度无法全面展现专家的模糊意见。因此，为全面表征电网专家在判断时的模糊性，本文提出基于T-球形模糊数的层次分析法计算指标权重。

3.1 层次分析法

层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）是一种将定性判断与定量分析相结合的系统决策方法。AHP通过决策者的经验性判断，量化各目标间的相对重要性，为各决策指标计算出相应的权重[25]。AHP作为一种主观指标赋权方法，在计算主观性较强的指标权重时具有较好的效果。其赋权的具体步骤可分为4步。

1）通过征集专家意见确定评估体系中各指标的重要性，建立模糊评估矩阵$\boldsymbol{R}$，并以数值1-9标度。某指标数值越高，该指标的重要性越大。指标标度见表1。

表1 指标标度

Table 1 Indicator scale reference

标度	含义
1	两指标相较，重要性相同
3	两指标相较，前者比后者稍重要
5	两指标相较，前者比后者明显重要
7	两指标相较，前者比后者极其重要
9	两指标相较，前者比后者强烈重要
2，4，6，8	取相邻判断的中间值

2）依据各指标间的重要性比值，建立判断矩阵 $\boldsymbol{M}$，并计算其最大特征向量 $\lambda_{\max}$，即

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} 1 & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & 1 & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\alpha}=\lambda_{\max}\boldsymbol{\alpha} \tag{8}$$

式中，m_{ij} 为第 i 个指标与第 j 个指标的重要性比值；$\boldsymbol{\alpha}$ 为最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量。

3）专家主观经验具有局限性，须对矩阵元素间的一致性进行验证。采用一致性比率 C_{R} 衡量，即

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{9}$$

$$C_{\mathrm{R}}=\frac{C_{\mathrm{I}}}{R_{\mathrm{I}}} \tag{10}$$

式中，n 为判断矩阵 M 的阶数；C_{I} 为一致性指标；R_{I} 为随机一致性指标，通过查表获取。

若计算结果 $C_{\mathrm{R}}<0.1$，则该判断矩阵一致性达标，矩阵 $\boldsymbol{M}$ 合理；反之，若计算结果 $C_{\mathrm{R}}>0.1$，则该判断矩阵一致性不达标，须修改矩阵 $\boldsymbol{M}$，直到其满足一致性要求。

4）通过一致性检验后，即可计算主观权重，第 j 个指标的主观权重 w_j 为

$$w_j=\frac{\left(\prod_{i=1}^{n} m_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^{n}\left(\prod_{i=1}^{n} m_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}} \tag{11}$$

3.2　基于 T-球形模糊数的层次分析法

球形模糊集作为模糊集的一种新拓展形式，从隶属度、非隶属度、中立度和拒绝度 4 个方面更全面地表征事物的模糊性。与其他模糊集相比，球形模糊集给予决策者更自由的信息表达空间，能更深入地挖掘事物本身的模糊性。为更全面地考虑专家在判断时的模糊性，在 AHP 的判断矩阵中引入 T-球形模糊数，并使用 T-球形模糊加权平均交互（t-spherical fuzzy weighted average interaction，TSFWAI）算子计算指标主观权重[26-27]。TSFWAI 是一种专门用于处理球形模糊数的加权聚合工具，将专家模糊决策矩阵与确定的专家权重聚合，可有效地综合各个专家的判断，考虑各位专家意见的交互影响，提高评估结果的准确性。

基于此，本文构建了如下的 EV 用户响应能力评估专家群决策赋权模型。定义评估指标集 $Z=\{Z_i|\, i=1,2,\cdots,m\}$ 和专家集 $P=\{P_j\,|j=1,2,\cdots,n\}$。设专家权重为 $\omega_j, j=1,2,\cdots,n$，且有 $\sum_{j=1}^{n}\omega_j=1$。专家 P_j 对指标 Z_i 的评估值用球形模糊数 a_i^j 来表征。据此，构建的初始 T-球形模糊决策矩阵为 $\boldsymbol{A}^j=\left(a_i^j\right)_{m\times n}$。

设 X 为一给定论域，则在其定义上的 T-球形模糊集为

$$\begin{cases} Z=\left\{\left\langle x, u_z(x), h_z(x), v_z(x)\right\rangle \middle| x\in X\right\} \\ 0\leqslant u_z^2(x)+h_z^2(x)+v_z^2(x)\leqslant 1 \end{cases} \tag{12}$$

式中，函数 $\mu_Z(x)$、$h_Z(x)$ 和 $v_Z(x)$ 分别为元素 x 属于集合 Z 的隶属度、中立度和非隶属度。

为方便表述，设 $f=\left(u_z(x), h_z(x), v_z(x)\right)$ 为一个 T-球形模糊数，f 的补集为 $f^{\mathrm{c}}=(u_z(x), h_z(x), v_z(x))$。此外，设 $\pi_{\mathrm{p}}^{z}(x)=1-\sqrt{1-\left(u_z(x)\right)^t-\left(h_z(x)\right)^t-\left(v_z(x)\right)^t}$ 为 Z 的拒绝度。任意一个 T-球形模糊数的精确函数定义为 $G(f)=\left(u_z(x)\right)^t+\left(h_z(x)\right)^t+\left(v_z(x)\right)^t$，其得分函数定义为 $S(f)=\sqrt[t]{1-\left(u_z(x)\right)^t-\left(h_z(x)\right)^t-\left(v_z(x)\right)^t}$。

确定指标权重的具体步骤可分为 8 步。

1）确定各专家的权重。构建初始 T-球形模糊决策矩阵 $\boldsymbol{A}^j=\left(a_i^j\right)_{m'\times n'}$，$a_i^j=\left(u_z^{i,j}(x), h_z^{i,j}(x), v_z^{i,j}(x)\right)$ 为一个 T-球形模糊数。

2）将评估指标分为效益型和成本型 2 种，规范化初始 T-球形模糊决策矩阵得到规范化后的 T-球形模糊决策矩阵 $\boldsymbol{B}^j=\left(b_i^j\right)_{m'\times n'}$，即

$$b_i^j=\begin{cases} a_i^j, & Z_i\in\Omega_{\mathrm{b}} \\ \left(a_i^j\right)^{\mathrm{c}}, & Z_i\in\Omega_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{13}$$

式中，Ω_{b}、Ω_{c} 分别为收益型和成本型指标；$\left(a_i^j\right)^{\mathrm{c}}=V_z^{i,j}(x), h_z^{i,j}(x), u_z^{i,j}(x)$。

3）获得各专家 P_j 的指标得分矩阵与集合 $\boldsymbol{S}=\left\{\boldsymbol{S}^j|j=1,2,\cdots,n'\right\}$，$\boldsymbol{S}^j=\left(\boldsymbol{S}_1^j, \boldsymbol{S}_2^j, \cdots, \boldsymbol{S}_{m'}^j\right)$。据此，计算指标平均得分矩阵集合 $\bar{S}=\left\{\bar{\boldsymbol{S}}_i\middle| i=1,2,\cdots,m'\right\}$。其中，指标 Z_i 的平均得分计算式为

$$\bar{\boldsymbol{S}}_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{S}_i^j \tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{S}_i^j$ 为专家 j 对第 i 个指标的得分矩阵。

4）引入关系系数 φ，将其作为专家 P_j 的得分矩阵 $\boldsymbol{S}^j$ 与平均得分矩阵 $\bar{\boldsymbol{S}}$ 之间一致性的测度，即

$$\varphi_j=\sum_{i=1}^{n'}(\boldsymbol{S}_i^j\bar{\boldsymbol{S}}_i)\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n'}(\boldsymbol{S}_i^j)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n'}(\bar{\boldsymbol{S}}_i)^2}\right)^{-1} \tag{15}$$

确定专家权重 ω_j，即

$$\omega_j=\frac{\varphi_j}{\sum_{j=1}^{n'}\varphi_j} \tag{16}$$

5）在获取各专家权重后，还须将各专家权重综合考虑，计算最终结果。据此，利用T-球形模糊加权交互算子的聚合功能，将每个指标的 n' 个决策矩阵合并为综合决策矩阵 $\boldsymbol{D}=\left(d_{ij}\right)_{m'\times 1}$，即

$$d_i^j=T(b_i^1,b_i^2,\ldots,b_i^n)=\bigoplus_{j=1}^{n'}\omega_j b_i^j \tag{17}$$

式中，T-球形模糊数 $\oplus$ 的运算法则如下：设 $T_1=\left(u_{T_1},h_{T_1},v_{T_1}\right)$ 和 $T_2=\left(u_{T_2},h_{T_2},v_{T_2}\right)$ 为 $T_1\oplus T_2=(\sqrt[t]{u_{T_1}^t+u_{T_2}^t-u_{T_1}^t\cdot u_{T_2}^t},h_{T_1}^t\cdot h_{T_2}^t,v_{T_1}^t\cdot v_{T_2}^t)$，且 $\bigoplus_{j=1}^{n'}b_i^j=b_i^1\oplus b_i^2\oplus\cdots\oplus b_i^{n'}$。

6）为表征不同指标间的关联强度，定义 k_l 与 k_g 间的支持度函数 $G(k_l,k_g)$，并据此构建支持度矩阵 $\boldsymbol{G}_{m\times m}$，即

$$\begin{cases}G\left(k_l,k_g\right)=1-d\left(k_l,k_g\right)\\ d\left(k_l,k_g\right)=\left(\dfrac{\left|\mu_l-\mu_g\right|^g}{3}+\dfrac{\left|h_l-h_g\right|^g}{3}+\dfrac{\left|v_l-v_g\right|^g}{3}\right)^{\frac{1}{g}}\end{cases} \tag{18}$$

式中，μ_l、h_l、v_l 为 Z_l 在综合决策矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中对应的隶属度、中立度和非隶属度值；μ_g、h_g、v_g 分别为 Z_g 在综合决策矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中对应的隶属度、中立度和非隶属度值。

7）基于支持度矩阵计算转换矩阵 $\boldsymbol{C}=\left\{C(k_l)\middle|l=1,2,\cdots,n'\right\}$，即

$$C(k_l)=\sum_{g=1,g\neq l}^{n'}G\left(k_l,k_g\right) \tag{19}$$

式中，$C(k_l)$ 为指标 Z_l 所对应的在 $\boldsymbol{C}$ 矩阵的元素值。

8）为获得最终权重系数，由 $\boldsymbol{C}$ 矩阵导出权重值 ω_i，即

$$\omega_i=\left(1+\boldsymbol{C}(k_i)\right)\left(\sum_{i=1}^{n'}\left(1+\boldsymbol{C}(k_i)\right)\right)^{-1} \tag{20}$$

4 基于用户信用度评估结果的可靠调度模型

在求解各指标的综合权重后，结合EV用户响应信用度评估指标模型，即可量化评估某时段意向参与需求响应的EV用户的信用度，获取EV用户信用度量化评估结果。电网调用EV用户参与需求响应的首要目的是平抑电网负荷波动，在此基础上，再追求调度策略的可靠性。因此，本文构建双层调度模型，在平抑电网负荷波动的基础上，提高调度策略的可靠性。其上层模型从电网层出发，对区域配电网负荷波动进行平抑，求解电网需求准线；其下层模型从EV用户层出发，根据EV用户的信用度评估结果和申报负荷，求解满足电网需求所要调用的EV用户。

4.1 上层模型

4.1.1 目标函数

为尽可能平抑电网负荷波动，根据每辆EV的申报负荷和电网预测的日均负荷，确定目标函数 F_1，即

$$\min F_1=\min\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{n=1}^{N}\Delta P_t-P_{n,t}\right)^2 \tag{21}$$

式中，ΔP_t 为电网在 t 时段预测的负荷减去日均负荷的值；$P_{n,t}$ 为在 t 时段第 n 辆EV申报的充放电负荷（当 ΔP_t 为正时，$P_{n,t}$ 为正，EV正在放电；当 ΔP_t 为负时，$P_{n,t}$ 也为负，EV正在充电）；T 为调度周期，N 为调用的EV数量。

4.1.2 约束条件

引入电网安全和参与需求响应的EV用户数量约束，一共有3条。

1）EV实际可用负荷应大于EV用户申报的可调度负荷。

$$P_{n,t}\leqslant P_{n,t}^{\lim} \tag{22}$$

式中，$P_{n,t}^{\lim}$ 为 t 时段第 n 辆EV用户实际可用负荷。

2）为保障配电网安全，所调用的EV负荷不能超过配变最大负载。

$$P_{\mathrm{c,b}}+P_{\mathrm{c,ev}}\leqslant P_{\mathrm{c}}^{\max} \tag{23}$$

式中，$P_{\mathrm{c,ev}}$ 为配变中的EV总充电负荷；$P_{\mathrm{c,b}}$ 为配变除EV外的剩余负荷；$P_{\mathrm{c}}^{\max}$ 为配变允许的最大负载。

3）参与需求响应的EV数量约束。

$$0\leqslant N\leqslant N_t^{\mathrm{all}} \tag{24}$$

式中，N_t^{all} 为 t 时段愿意参与需求响应的全部EV的数量。

4.2 下层模型

4.2.1 目标函数

由该上层模型可获取电网在各调度时段的需求。其下层模型为使电网对EV用户的调度策略更可靠，在满足电网调度需求的条件下，所调度EV用

户信用度的总和应最高。故其目标函数 F_2 为

$$\max F_2 = \max \sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N_t} \varsigma_{n,t} \tag{25}$$

式中，$\varsigma_{n,t}$ 为 t 时段第 n 辆 EV 用户的信用度量化评估结果；N_t 为 t 时段满足电网调度需求的 EV 用户的个数。

4.2.2　约束条件

引入调度需求和参与需求响应的 EV 数量约束，一共有 2 个。

1）电网调度需求约束条件。

该约束式为

$$\sum_{n=1}^{N_t} P_{n,t} \leqslant \Delta P_t \tag{26}$$

2）参与需求响应的 EV 数量约束条件。

该约束式为

$$0 \leqslant N_t \leqslant N_t^{\mathrm{all}} \tag{27}$$

4.3　模型求解

在文 4.2 构建的模型中，其下层模型可以看作上层模型的约束条件，故将双层优化问题转化为单层问题，即如何选取信用度最高的一些 EV 用户来平抑负荷波动。因此，本文先通过 KKT 条件，构造该双层模型下层模型的拉格朗日函数，将该双层优化问题转化为单层问题；再通过 Python 编程，调用 Gurobi 求解器，对其进行求解。当得到信用度最高的 EV 用户的调度策略后，将通过与 e 平台向中标的 EV 用户签订需求响应协议。如果有中标的 EV 用户取消需求响应协议，则须重新计算，生成新的 EV 用户调度策略。在求解出 t 时段的 EV 用户可靠调度策略后，调度中心每隔一个调度周期就重新计算生成调度策略，即可实现各时段的 EV 用户可靠调度。考虑到 EV 用户响应时长的限制，本文设调度间隔为 15 min。EV 可靠调度策略生成流程如图 3 所示。

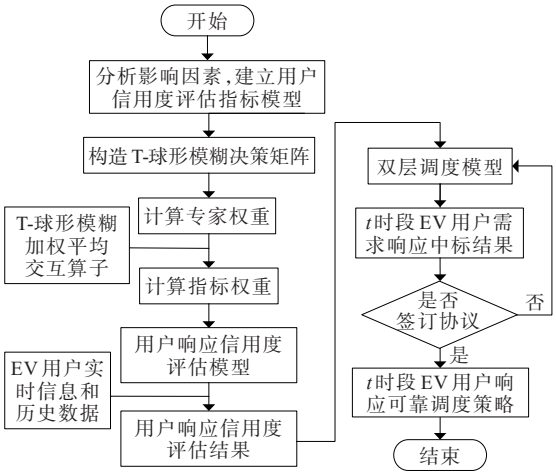

图 3　EV 可靠调度策略生成流程

Figure 3　Flowchart of EV reliable scheduling policy generation

5　算例分析

本文以中国浙江省某地的配电网数据为实例，对所提的基于用户响应信用度评估的电动汽车可靠调度策略进行验证。

5.1　指标权重的计算与分析

邀请 3 位来自中国浙江省电网公司的专家参与此次决策，专家们的判断意见以 T-球形模糊数的形式来表述，并据此构建专家决策矩阵，专家决策信息见表 2。

表 2　专家决策信息

Table 2　Expert decision information

专家	γ_{ave}	f	ρ	ε	η	L
1	[0.70,0.18,0.20]	[0.80,0.40,0.08]	[0.70,0.20,0.15]	[0.85,0.10,0.15]	[0.75,0.12,0.20]	[0.40,0.10,0.50]
2	[0.85,0.15,0.20]	[0.90,0.10,0.20]	[0.70,0.35,0.10]	[0.80,0.25,0.10]	[0.88,0.15,0.20]	[0.60,0.15,0.60]
3	[0.90,0.30,0.10]	[0.87,0.15,0.20]	[0.65,0.40,0.15]	[0.78,0.10,0.10]	[0.80,0.10,0.10]	[0.30,0.20,0.60]

根据式(17)～(20)，基于 T-球形模糊加权平均交互算子计算各指标的权重。对比分析本文所提方法、AHP 与熵权法计算客观权重，其结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，由熵权法得到的最大客观权重来自馈电电价响应程度 η，层次分析法得到的最大客观权重来自平均违约时长占比 γ_{ave}，而基于 T-球形模糊数的层次分析法的指标赋权结果，弱化了分时电价响应程度 ε、馈电电价响应程度 η 和电池折旧损失 L，更注重平均违约时长占比 γ_{ave} 和响应协议违背频率 f 这 2 个在实际应用中最能体现 EV 用户信用度的指标。一方面，EV 用户对分时电价的响应程度并不能直接反映 EV 用户对需求响应政策的意愿；另一方面，当 EV 用户响应电网的馈电电价激励机制时，其从主观上已经接受了电网的调控，且激励机制中有一定的电池损耗补偿，这也弱化了电池损耗的重要程度。

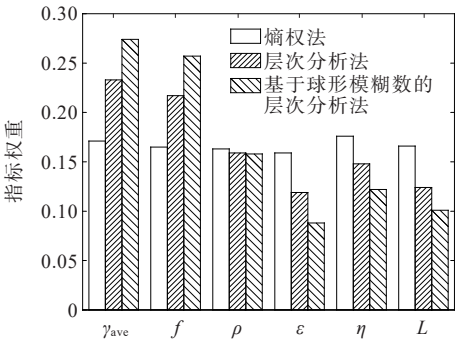

图4 本文所提方法、AHP与熵权法计算的客观权重比较

Figure 4 Objective weights calculated using the proposed method, AHP and entropy weighting approach

5.2 EV用户信用度的计算与分析

本文选定中国浙江省某示范配台区展开仿真验证，该台区曾在2022年执行需求响应策略一千余次。该台区变压器总容量为315 kV·A，配置了2个60 kW快充桩和6个7 kW慢充桩，设EV用户参与需求响应的馈电电价为2.0元/kW·h，EV用户可感知馈电电价阈值为0.5元/kW·h，饱和馈电电价为4.0元/(kW·h)[26]，调度周期为15 min。基于文5.1对用户响应信用度指标权重的计算，对台区内参与需求响应的各调度时段EV用户进行响应信用度评估，本文选取最具代表性的时段80～81进行分析。

在80～81时段，共有7辆EV接入充电桩进行充电。其中，有6辆EV用户与电网公司签订了需求响应协议，对这6辆EV用户的指标数据按照收益型和成本型进行归一化处理与用户响应信用度评估，该6辆EV用户申报的调度负荷和根据历史响应数据的用户信用度评估结果见表3。

表3 响应信用度评估结果

Table 3 User response credibility assessment results

EV编号	申报负荷/kW	用户信用度	信用度排名
1	15.0	0.843	2
2	1.2	0.652	5
3	1.5	0.739	3
4	1.5	0.882	1
5	13.5	0.690	4
6	1.0	0.376	6

5.3 基于用户信用度评估结果的EV可靠调度

在构建双层模型，并根据申报用户的信用度情况求解模型，即可得到该日的EV用户需求曲线和中标结果，获取该时段的EV用户调度策略。本文选取2022年12月22日数据，该日电网负载曲线、日均负载和求解的EV需求曲线如图5所示。

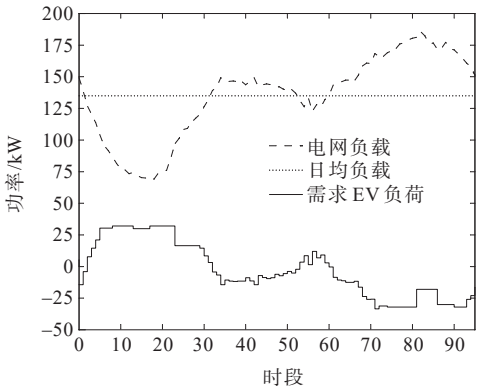

图5 某日电网负载曲线、日均负载和求解的EV需求曲线

Figure 5 Daily load curve, average daily load, and derived EV demand curve

通过模型求解的EV用户调度策略，电网调度中心通过和中标的EV用户签订需求响应协议，即可实现EV的可靠调度。以文5.2中80～81时段对用户响应信用度分析结果为例，该时段的EV用户调度策略为调用编号为4、1、3、6的EV用户。为模拟EV用户不守信行为的发生情况，选用逻辑回归模型，将EV用户信用度的评估结果转为不守信行为发生概率。设定违约EV用户实际可响应的负荷，等于其申报负荷与响应信用度评估结果的乘积。在72～88时段中应用本文基于用户信用度评估结果的调度结果，并对比在有响应意向的EV用户中随机选取中标对象的调度策略，其结果如图6所示。

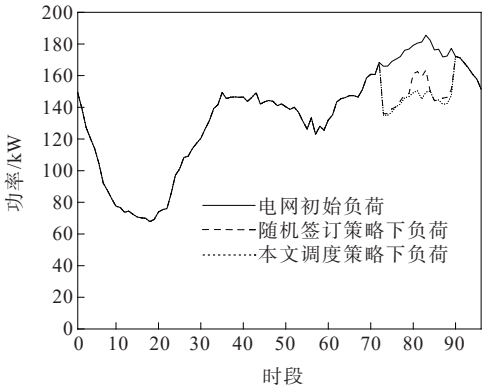

图6 示范台区调度策略应用结果对比

Figure 6 Application results of scheduling strategies in demonstration areas

示范台区不同调度策略效果对比见表4。由表4可知，本文所提方法的实际可调度的总负荷比随机方法的高出73.60 kW。所提方法的电网负荷峰谷差比随机签订方法的降低了11.887 kW，所提方法的峰谷差率与波动率比随机签订方法的分别降

低了 6.444 与 8.815 个百分点。

表 4　示范台区不同调度策略效果对比

Table 4　Effectiveness of different scheduling strategies in demonstration area

方法	总调度负荷/kW	峰谷差/kW	峰谷差率/%	波动率/%
随机签订	458.6	27.531	16.838	20.416
本文方法	532.2	15.644	10.394	11.601

该示范台区为居民台区，参与需求响应的 EV 用户较为固定，且这部分 EV 用户信用情况较好，选取另一 EV 用户流动性较强的台区进行对比试验。该 EV 用户流动性强的中国浙江某地的新台区变压器总容量为 630 kV·A，配置了 6 个 60 kW 快充桩和 4 个 7 kW 慢充桩，其余参数设定与原示范台区的参数一致。同样地，在用电高峰的 72～88 时段，应用本文调度策略，获取基于 EV 用户信用度评估结果的调度结果，并将其与在有响应意向的 EV 用户中随机选取中标对象的调度策略进行对比，结果如图 7 所示。

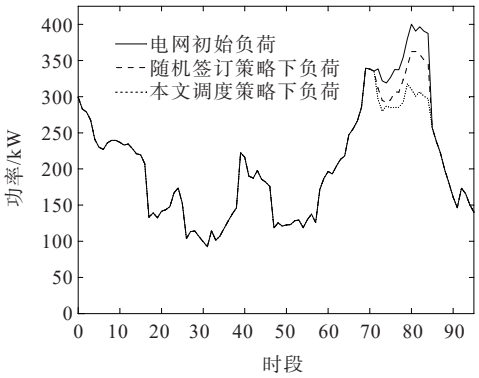

图 7　高流动性 EV 用户台区调度策略应用结果对比

Figure 7　Application results of high liquidity EV user area scheduling strategies

在该新台区进行需求响应的 EV 用户流动性较大，EV 用户信用度差异明显。高流动性用户台区不同调度策略效果对比见表 5。由表 5 可知，本文所提方法的实际可调度的总负荷比随机方法的高出了 409.200 kW。所提方法的电网负荷峰谷差比随机签订方法的降低了 32.892 kW。所提方法的峰谷差率与波动率比随机签订方法的分别降低了 7.596 和 8.824 个百分点。应用本文调度策略与随机签订调度策略的效果差异明显，这说明本文方法在 EV 用户流动性较强、EV 用户信用度差异明显的台区效果更好。

表 5　高流动性用户台区不同调度策略效果对比

Table 5　Different scheduling strategies for high liquidity user areas

方法	总调度负荷/kW	峰谷差/kW	峰谷差率/%	波动率/%
随机签订	427.200	70.726	19.506	21.620
本文方法	836.400	37.834	11.910	12.796

6　结语

本文针对 EV 用户可能的提前结束充电、虚报可调度负荷等违约行为所造成的调度负荷未满足预期需求和经济损失的问题，提出基于用户响应信用度评估的 EV 用户调度策略，并分析调度结果。得出如下结论：

1）本文从诚信度、合规度和支持度全面构建用户信用度指标评估模型，基于 T-球形模糊数的改进层次分析法计算指标权重，有效地量化用户响应信用度，更符合电网调度 EV 用户参与响应的实际需求。

2）电网调度中心根据 EV 用户信用度评估结果得出的 EV 用户中标对象，具有良好的信用度，以此施行的调度策略实际可调度的 EV 用户负荷量更多。该方法在 EV 用户流动性高、用户信用度差异大的台区中效果很好，能更好地平抑电网负荷波动，减少电网的潜在风险损失。在更大规模的 EV 用户需求响应应用中，其得出的调度策略更可靠，所提方法具有很强的实用价值。

3）本文主要考虑 EV 用户信用度与申报信息来求解调度策略，未考虑电网的调度成本，其中的馈电电价即是电网调度成本，这也影响 EV 用户响应信用度。后续研究会将电网的调度成本、EV 用户信用度和申报信息综合考虑，得到更合理可靠的调度策略。

参考文献：

[1]　黄雨涵，丁涛，李雨婷，等．碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报，2021，41(增刊 1)：28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (Sup 1): 28-51.

[2]　文旭，杨可，毛锐，等．可调节负荷调控能力评估行业标准研究及应用[J]. 电网技术，2021，45(11)：4585-

4594.
WEN Xu, YANG Ke, MAO Rui, et al. Research and application of industry standards for evaluation of adjustable load control capacity[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4585-4594.

[3] 房超运, 杨昆, 柴瑞环. 分时电价下含电动汽车的微电网群双层多目标优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 124-133.
FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan. Two-layer multi-objective optimal dispatching of microgrid group with electric vehicles under time-of-use electricity prices [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 124-133.

[4] KUMAR K N, SIVANEASAN B, CHEAH P H, et al. V2G capacity estimation using dynamic EV scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 5(2): 1051-1060.

[5] 仝杰, 齐子豪, 蒲天骄, 等. 电力物联网边缘智能: 概念、架构、技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5473-5496.
TONG Jie, QI Zihao, PU Tianjiao, et al. Edge intelligence to power Internet of Things: concept, architecture, technology and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5473-5496.

[6] 刘向军, 周凯, 孙毅, 等. 面向新型电力系统的边缘缓存与计算资源迁移策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 134-142.
LIU Xiangjun, ZHOU Kai, SUN Yi, et al. Edge cache and computing resource migration strategy for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 134-142.

[6] 刘向军, 周凯, 孙毅, 等. 面向新型电力系统的边缘缓存与计算资源迁移策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 134-142.
LIU Xiangjun, ZHOU Kai, SUN Yi, et al. Edge cache and computing resource migration strategy for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 134-142.

[7] 姚寅, 朱烨冬, 李东东, 等. 基于决策实验室算法-对抗解释结构模型的电动汽车多场景需求响应策略分析[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 93-104.
YAO Yin, ZHU Yedong, LI Dongdong, et al. Multi-scenario demand response strategy based on DEMATEL-AISM for electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 93-104.

[8] 朱兰, 余家乐, 董凯旋. 电动汽车聚合商参与能量-调频辅助服务市场优化策略及响应激励设计[J]. 现代电力, 2025, 42(5): 1037-1051.
ZHU Lan, YU Jiale, DONG Kaixuan. Design of optimization strategy and response incentive mechanisms of energy and frequency ancillary services market with participation of electric vehicle aggregators [J]. Modern Electric Power, 2025, 42(5): 1037-1051.

[9] 张巍, 祝童童, 苏瑾. 考虑电动汽车和5G基站的电力-信息-交通耦合网络需求响应策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 116-126.
ZHANG Wei, ZHU Tongtong, SU Jin. Demand response strategy for power-cyber-transportation coupling network considering electric vehicles and 5G base stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 116-126.

[10] 孙欣, 江海林, 谢敬东, 等. 基于用户信用指数的园区电动汽车充放电调度机制[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(2): 200-207.
SUN Xin, JIANG Hailin, XIE Jingdong, et al. Charging and discharging scheduling mechanism of electric vehicles in park based on user credit index[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(2): 200-207.

[11] 张凡勇. 基于CVaR风险度量的V2G备用决策与消费价格补贴模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
ZHANG Fanyong. Decisions and consumer price subsidymodels of v2g reserve based on cvar riskmeasurement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[12] 叶文浩, 陈耀红, 颜勤, 等. 基于动态分时电价引导的电动汽车需求侧响应[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 138-145.
YE Wenhao, CHEN Yaohong, YAN Qin, et al. Demand response of electric vehicle based on dynamic time-to-use electricity price[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 138-145.

[13] 侯慧, 何梓姻, 罗超, 等. 计及需求响应潜力的电动汽车聚合商多主体日前投标策略[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(2): 220-227.
HOU Hui, HE Ziyin, LUO Chao, et al. Multi-agent day-ahead bidding strategy of electric vehicle aggregators upon demand response potential[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(2): 220-227.

[14] 杨钰君, 于艾清, 丁丽青. 基于停车需求的电动汽车移动储能多目标充放电协调控制[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 65-77.
YANG Yujun, YU Aiqing, DING Liqing. Multi-objective coordinated control of charging and discharging for mobile energy storage of electric vehicles based on parking demand[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 65-77.

[15] 陈艳波, 田昊欣, 刘宇翔, 等. 计及电动汽车需求响应的高速公路服务区光储充鲁棒优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1752-1767.
CHEN Yanbo, TIAN Haoxin, LIU Yuxiang, et al. Robust optimization configuration of photovoltaic-storage-charging integrated system in expressway service area

considering demand response of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1752-1767.

[16] 黄珍瑶, 程诺, 江岳文. 考虑EV调峰需求响应可靠性的V2G聚合商多时间尺度调度策略[J]. 高电压技术, 2025, 51(1): 401-411.
HUANG Zhenyao, CHENG Nuo, JIANG Yuewen. Multi-time-scale scheduling strategy of V2G aggregators considering EV peak regulating demand response reliability[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 401-411.

[17] YUE H Z, ZHANG Q, ZENG X S, et al. Optimal scheduling strategy of electric vehicle cluster based on index evaluation system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 1212-1221.

[18] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.

[19] 倪涵艺, 曾飞, 孙国强, 等. 基于q-阶正交模糊数和云模型的配电自动化系统运行状态评估[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4690-4698.
NI Hanyi, ZENG Fei, SUN Guoqiang, et al. Operation status evaluation of distribution automation system based on Q-rung orthopair fuzzy number and cloud model[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4690-4698.

[20] 裴振坤, 王学梅, 康龙云. 电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 17-32.

[21] 范晋衡, 刘琦颖, 曲大鹏, 等. 考虑EV用户响应特性的激励型DR的削峰效果和各方需求分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 138-149.
FAN Jinheng, LIU Qiying, QU Dapeng, et al. Analysis on peak shaving effect and needs of all parties based on incentive demand response considering response characteristics of EV users[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 138-149.

[22] 黄冬梅, 吕嘉欣, 时帅, 等. 计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 88-98.
HUANG Dongmei, Lyv Jiaxin, SHI Shuai, et al. Optimal operation of island microgrid clusters considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 88-98.

[23] 周燕, 刘卫民, 陈帆, 等. 不同光伏渗透率下考虑需求响应的配电网储能双层规划[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 64-77.
ZHOU Yan, LIU Weimin, CHEN Fan, et al. Bi-level planning of energy storage in distribution network considering demand response under different penetration rates of photovoltaic[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 64-77.

[24] 刘利兵, 刘天琪, 张涛, 等. 计及电池动态损耗的电动汽车有序充放电策略优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 83-90.
LIU Libing, LIU Tianqi, ZHANG Tao, et al. Orderly charging and discharging strategy optimization for electric vehicles considering dynamic battery-wear model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 83-90.

[25] 唐学军, 谭忠富, 李智威, 等. 基于AHP-熵权法的配电网设备资产运检成本优化配置模型[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 166-172.
TANG Xuejun, TAN Zhongfu, LI Zhiwei, et al. AHP-entropy weight method based optimal allocation of operation and maintenance cost of distribution network equipment assets[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 166-172.

[26] LI Z X, LIU A J, SHANG W L, et al. Sustainability assessment of regional transportation: an innovative fuzzy group decision-making model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(12): 15959-15973.

[27] 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 Equipm