

考虑充电不确定性的EVs集群参与削峰服务 控制策略研究

王斐,李元涛,孔建斌,马新声

(国网宁夏电力有限公司,宁夏 中卫 755000)

摘要:在含新能源的“源网荷储”系统中,针对电动汽车(EVs)集群参与削峰辅助服务时面临用户充电行为差异性和系统需求动态变化等挑战,在考虑各时段削峰需求程度的同时,提出了一种融合荷电状态(SOC)模糊控制的充电策略优化模型。以负荷聚合商和EVs用户双方总期望收益最大为目标,结合遗传算法与CPLEX求解优化模型。算例表明,所提SOC模糊充电控制策略能够兼顾EVs用户充放电意愿,为EVs预留可调空间,支撑削峰服务,同时使负荷聚合商和EVs用户总期望收益最大化,为“源网荷储”系统中EVs集群削峰服务提供更优方案。

关键词:电动汽车用户和负荷聚合商收益;SOC模糊控制;削峰辅助服务;充放电策略

中图分类号:TM715 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26979

Research on Control Strategy for Electric Vehicle Clusters Participating in Peak-shaving Services Considering Charging Uncertainty

WANG Fei, LI Yuantao, KONG Jianbin, MA Xinsheng

(State Grid Ningxia Electric Power Company, Zhongwei 755000, Ningxia, China)

Abstract: In the "source-grid-load-storage" system with new energy integration, electric vehicles (EVs) clusters face challenges such as differences in users' charging behaviors and dynamic changes in system demands when participating in peak-shaving auxiliary services. An optimized charging strategy model was proposed integrated with state of charge (SOC) fuzzy control, while considering the degree of peak-shaving demand in different time periods. Taking the maximization of the total expected benefits of both load aggregators and EVs users as the objective, the optimization model was solved by combining genetic algorithm with CPLEX. Case studies show that the proposed SOC fuzzy charging control strategy can balance the charging and discharging willingness of EV users, reserve adjustable capacity for EVs to support peak-shaving services, and maximize the total expected benefits of load aggregators and EV users. This provides a more optimal solution for EV cluster peak-shaving services in the "source-grid-load-storage" system.

Key words: revenues of electric vehicles users and load aggregators; state of charge (SOC) fuzzy control; peak-shaving auxiliary service; charging and discharging strategy

随着可再生能源渗透率不断提高,电力系统面临更大的调峰压力。电动汽车(electric vehicles, EVs)作为一种可调节的柔性负荷,通过车网互动(vehicle-to-grid, V2G)技术参与削峰服务具有重要价值^[1]。然而,现有研究在EVs集群调度中面临两个关键挑战^[2-4]:一是传统调度方法难以量化削峰需求、用户响应、聚合商间的复杂关系;

二是EVs用户充电行为具有高度不确定性。

许多学者对负荷聚合商管理下的EVs集群进行了大量研究,以保障电力系统的经济、稳定运行。文献[5]在考虑用户充电需求的前提下,实现了聚合商调控收益最大的目标。文献[6]提出了计及需求响应潜力的EVs聚合商多主体日前投标策略,显著提高了负荷聚合利益。文献[7]考

基金项目:国网宁夏电力有限公司科研项目“分布式光伏发电与电动汽车充电设施集成关键技术研究”(5229ZW240004)

作者简介:王斐(1995—),女,本科,工程师,主要研究方向为配电网工程管理等,Email:786848179@qq.com

虑在供需双方博弈视角下,实现聚合商收益最大化、用户用电成本最小化的目标。针对EVs集群提供辅助服务问题。文献[8]制定了聚合商对集群EVs的需求分配与响应控制策略,提升聚合商的经济性与系统运行稳定性。文献[9]考虑各时段削峰需求程度的EVs集群充放电策略优化模型,使得负荷聚合商和EVs用户总期望收益最大化。文献[10]提出了EVs集群参与日前能量市场和调频辅助服务市场的协同充电优化策略,有效提升了EVs集群参与电力市场调节的经济性。文献[11]建立了以负荷聚合商自身效益最大化为目标的EVs聚合商-EVs用户主从博弈模型,管理EVs集群实现负荷削峰填谷。文献[12]构建以最小化配电网负荷波动、最小化用户充电成本和最大化聚合商收益为目标的EVs充放电优化调度模型,实现削峰填谷的同时,保证了聚合商以及EVs用户的利益。

文献[2-4]中提出了多种EVs调度策略,但未能充分考虑用户行为的不确定性。模糊理论因其在处理不确定性问题方面的优势,已在电力系统多个领域得到应用^[13-14]。文献[15]根据EVs的运行模式确定模糊控制的输入量与输出量,实现对EVs的优化惯量控制。文献[16]通过模糊逻辑控制器与多模式动态调度的结合,在用户需求满足、电网稳定性和经济性之间取得了平衡。文献[17]提出的分散式模糊逻辑控制框架通过多目标优化,在电网稳定性、用户经济性和系统弹性之间取得了显著平衡。然而,目前将模糊控制应用于负荷聚合商管理下的EVs集群参与削峰服务的研究仍存在欠缺。现有研究未能充分考虑EVs用户荷电状态(state of charge, SOC)模糊控制、量化用户充电概率,难以精准地根据不同时段电力系统对削峰服务的需求。

针对上述问题,文章提出考虑各时段削峰需求程度下,基于SOC模糊控制构建EVs用户和负荷聚合商利益最大化的EVs集群充放电策略优化模型。仿真结果表明,所提策略实现了考虑参与削峰服务下的EVs用户和负荷聚合商双方总期望收益最大的目标,提升了用户满意度。算例结果验证了所提优化策略的有效性与合理性。

1 “源网荷储一体化”系统运行特性与削峰辅助服务

“源网荷储一体化”系统(简称“系统”)由新

能源发电、与上级电网联络装置、储能装置及负荷构成。系统在稳态运行时,调度中心协调调度负荷和储能装置将新能源出力就地消纳,当新能源出力装置和储能装置无法承担系统内用电负荷时,调度中心可向电网购电,也可协调调度系统内EVs集群实现“负荷削峰”,降低系统运行成本。系统整体框架如图1所示。

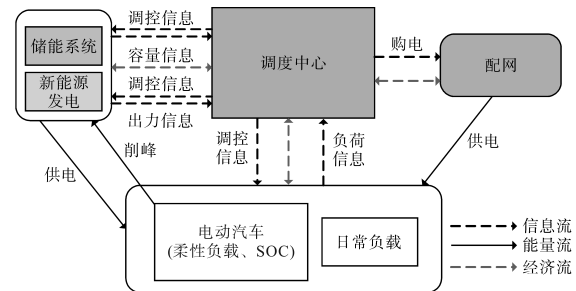


图1 “源网荷储一体化”系统整体架构

Fig.1 Overall architecture of the "source-grid-load-storage integration" system

负荷聚合商本质上是电力系统和EVs用户之间的中间机构,促进电力系统与EVs集群交互的同时赚取适当收益。负荷聚合商管理的EVs集群提供削峰辅助服务时,需要权衡EVs用户、电力系统和自身三方利益^[18-19]。文章模式管控下,负荷聚合商参与削峰服务基本流程如图2所示。

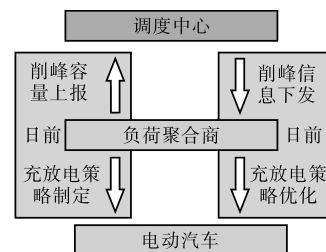


图2 负荷聚合商参与削峰服务框架

Fig.2 Framework for load aggregators participating in peak shaving services

2 电动汽车集群充放电策略优化模型

2.1 模糊理论与削峰服务需求评估

2.1.1 新能源出力不确定性处理

新能源出力装置受天气、地理因素影响,出力结果存在不确定性,而系统对削峰服务的需求与新能源出力结果息息相关。场景生成是处理新能源出力不确定的重要方法之一,主要在建立概率模型的前提下,依托随机抽样生成场景集,并通过场景削减算法形成有代表性的典型场景^[20]。文章针对规模化的场景集采用K-means聚类方法对场景进行削减,得到具有代表性的典型

场景,并计算各类典型场景出现的概率。

2.1.2 电动汽车用户充电决策模糊理论控制

SOC是影响EVs用户充电决策的主要因素之一,它既能够保障电池在最优区间工作以延长寿命,又可以实现能源的精准调度。本节考虑输入变量为SOC的模糊理论来描述EVs用户充电行为的不确定性,将主观意愿转化为可量化的充电概率(满意度),通过引导充电时段,促进EVs在削峰需求高峰时进行放电,优化用户充放电成本。定义满意度含义如下:以用户充电概率为核心表征,在数值上与充电概率相等,反映用户在特定SOC条件下选择参与充电行为的意愿强度,即充电概率越高,说明当前条件与用户诉求匹配度越好,满意度越高;峰价期间,充电意愿低,放电满意度定义为数值1与充电概率的差值。

1)模糊化。定义模糊集合: T 论域为[1,24]或[0,23],单位为h; SOC 论域为[0,1]。设计模糊控制器以确定充电概率 P_{cp} 作为输出,其论域为[0,1]。

2)建立隶属度函数。隶属度函数的选取通常依据统计数据或经验来确定。本节选取高斯隶属度函数来设计模糊控制器。

a)在输入量 SOC 中,选取低电量($SL, \leq 0.3$)、中等电量($SM, 0.3 \sim 0.7$)和高电量($SH, \geq 0.7$)作为模糊子集。隶属度函数如下式所示:

$$\begin{cases} SL(SOC, \sigma_{SL}, c_{SL}) = \exp(-(SOC - c_{SL})^2 / 2 \cdot \sigma_{SL}^2) \\ SM(SOC, \sigma_{SM}, c_{SM}) = \exp(-(SOC - c_{SM})^2 / 2 \cdot \sigma_{SM}^2) \\ SH(SOC, \sigma_{SH}, c_{SH}) = \exp(-(SOC - c_{SH})^2 / 2 \cdot \sigma_{SH}^2) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\sigma_{SL} = 0.2, c_{SL} = 0.4; \sigma_{SM} = 0.1, c_{SM} = 0.7; \sigma_{SH} = 0.11, c_{SH} = 1$ 。

b)在输出量 P_{cp} 中,选取低充电概率(L)、中低充电概率(ML)、中等充电概率(M^*)、中高充电概率(MH)和高充电概率(H)作为模糊子集。隶属度函数如下式所示:

$$\begin{cases} L(P_{cp}, \sigma_L, c_L) = \exp[-(P_{cp} - c_L)^2 / 2 \cdot \sigma_L^2] \\ ML(P_{cp}, \sigma_{ML}, c_{ML}) = \exp[-(P_{cp} - c_{ML})^2 / 2 \cdot \sigma_{ML}^2] \\ M^*(P_{cp}, \sigma_{M^*}, c_{M^*}) = \exp[-(P_{cp} - c_{M^*})^2 / 2 \cdot \sigma_{M^*}^2] \\ MH(P_{cp}, \sigma_{MH}, c_{MH}) = \exp[-(P_{cp} - c_{MH})^2 / 2 \cdot \sigma_{MH}^2] \\ H(P_{cp}, \sigma_H, c_H) = \exp[-(P_{cp} - c_H)^2 / 2 \cdot \sigma_H^2] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\sigma_L = 0.07, c_L = 0; \sigma_{ML} = 0.07, c_{ML} = 0.25; \sigma_{M^*} = 0.07, c_{M^*} = 0.5; \sigma_{MH} = 0.03, c_{MH} = 0.8; \sigma_H = 0.07, c_H = 1$ 。

3)模糊规则的制定。具体模糊规则如表1所示。可根据隶属度函数和日常经验制定模糊规则^[21]。 SOC 模糊控制量化用户充电行为的不确定性,输出充电概率决定用户是否选择充电,为后续放电调度预留可调容量。

表1 充电决策模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules for charging decision-making

组	SOC	充电概率
1	SL	H
		MH
		M^*
2	SM	ML
		M^*
		MH
3	SH	L
		ML
		M^*

为了用数学方式描述模糊规则并得到相应的模糊蕴含关系,模糊控制器的模糊蕴含关系可由9个模糊关系的并集表示:

$$\tilde{R} = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_9 = \bigcup_{i=1}^9 R_i \quad (3)$$

4)模糊推理。假设模糊控制器的采样步长为 $k(k=0, 1, \dots, n)$ 。采用Mamdani最大-最小合成法,输入的模糊集 SOC 记为 X_1^k ,输出 P_{cp} 记为 y_{jk} ($j=1, 2, 3, \dots, 9$),则 R 的隶属函数如下:

$$\mu_{\tilde{R}}(X_1^k) = \mu_R(X_1^k) \quad (4)$$

模糊规则对应的模糊关系如下:

$$R^* = \mu_R(X_1^k) \quad (5)$$

然后,通过模糊推理可得到相应的输出模糊值 U 如下:

$$U = X_1^k \circ R^* \quad (6)$$

式中: $\circ$ 为模糊合成运算符号。

5)去模糊化。确定隶属函数曲线与横坐标轴所围区域的重心。然后通过重心法得到精确值的输出:

$$y^{k+1} = f(X_1^k) = \sum_{j=1}^9 \bar{y}_j \mu_R(X_1^k) / \sum_{j=1}^9 \mu_R(X_1^k) \quad (7)$$

式中: $\mu_R(X_1^k)$ 为输入的高斯隶属函数; $\bar{y}_j$ 为 y_j 的重心。

2.1.3 负荷聚合商参与削峰服务概率

系统对削峰服务的需求程度主要取决于系统内新能源出力 and 用电负荷之间的供求关系^[20]。当系统内新能源出力低于用电负荷越多,系统对

削峰服务的需求程度也越高。以负荷数据与新能源出力结果之差作为系统削峰需求量,将其归一化后得到一天内各时段系统对削峰辅助服务的需求概率向量 P_0 如下:

$$P_0 = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_T] \quad (8)$$

γ_T 用以刻画 T 时段调度中心对削峰辅助服务需求程度。

EVs 集群参与削峰辅助服务的能力受自身充电需求、容量和出行需求约束,且前后时段可调容量相互制约,因此,EVs 集群能参与削峰辅助服务的周期通常较短。假设 EVs 因自身出行需求等的限制,只能参与一个时段的辅助服务。则负荷聚合商参与时段削峰辅助服务的概率 δ_T 为

$$\delta_T = \begin{cases} \gamma_T \prod_{t=1}^{T-1} (1 - \gamma_t) & T \geq 2 \\ \gamma_T & T = 1 \end{cases} \quad (9)$$

负荷聚合商各时段参与削峰服务概率向量 $P = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_T]$ 。

2.2 电动汽车集群优化调度模型

2.2.1 电动汽车的充放电行为建模

1) 充放电决策变量。当 EVs 的出行链发生变化时,可通过模糊理论以数学方式列出 EVs 的充电概率。此时, EVs 的充电决策 $\omega_{\text{cha}}(t)$ 分为两种情况,当 $\omega_{\text{cha}}(t)=0$ 时, EVs 不充电;当 $\omega_{\text{cha}}(t)=1$ 时, EVs 充电。同理, EVs 的放电决策 $\omega_{\text{dis}}(t)$ 分为两种情况:当 $\omega_{\text{dis}}(t)=0$ 时, EVs 不放电;当 $\omega_{\text{dis}}(t)=1$ 时, EVs 放电。

2) 集群充放电功率矩阵。为延长 EVs 电池使用寿命,应避免在短时间内频繁调整 EVs 充放电状态,因此,本研究将一天离散成 24 个时段,用矩阵 $W_{n \times 24}$ 来描述由 n 辆 EVs 组成的 EVs 集群一天中各时段的充放电功率,并设置矩阵 $W_{n \times 24}$ 中的元素 $P_{n,t}$ 为决策变量。

$$W_{n \times 24} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \dots & P_{1,24} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n,1} & \dots & P_{n,24} \end{bmatrix}_{n \times 24} \quad (10)$$

其中

$$P_{i,t} = \begin{cases} \omega_{\text{cha},i,t} \times P_{\text{cha,max}} \times P_{\text{cha},i,t} & \text{充电 } P_{i,t} > 0 \\ -\omega_{\text{dis},i,t} \times P_{\text{dis,max}} & \text{放电 } P_{i,t} < 0 \\ 0 & \text{不充不放} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}$ 为第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 辆 EV 在 t 时段的充放电功率; $\omega_{\text{cha},i,t}$ 为第 i 辆 EV 在 t 时刻的充电决策; $\omega_{\text{dis},i,t}$ 为第 i 辆 EV 在 t 时刻的放电决策; $P_{\text{cha},i,t}$

为第 i 辆 EV 在 t 时刻模糊输出的充电概率; $P_{\text{cha,max}}, P_{\text{dis,max}}$ 为最大充电功率与放电功率。

3) EVs 接入/断开时间模型。该类私人 EVs 接入电网时间 t_{in} 和离开电网时间 t_{out} 均满足正态分布,其概率密度函数如下:

$$f(t_{\text{in}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{\text{in}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{in}} - \mu_{\text{in}})^2}{2\sigma_{\text{in}}^2}\right] & \mu_{\text{in}} - 12 \leq t_{\text{in}} \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_{\text{in}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{in}} + 24 - \mu_{\text{in}})^2}{2\sigma_{\text{in}}^2}\right] & 0 \leq t_{\text{in}} \leq \mu_{\text{in}} - 12 \end{cases} \quad (12)$$

$$f(t_{\text{out}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{\text{out}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{out}} - \mu_{\text{out}})^2}{2\sigma_{\text{out}}^2}\right] & 0 \leq t_{\text{out}} \leq \mu_{\text{out}} + 12 \\ \frac{1}{\sigma_{\text{out}} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{out}} - 24 - \mu_{\text{out}})^2}{2\sigma_{\text{out}}^2}\right] & \mu_{\text{out}} + 12 \leq t_{\text{out}} \leq 24 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\sigma_{\text{in}}, \sigma_{\text{out}}$ 分别为 EVs 接入和断开充电桩时段的均值, $\sigma_{\text{in}} = 1.1, \sigma_{\text{out}} = 1.5$; $\mu_{\text{in}}, \mu_{\text{out}}$ 分别为对应时段的方差, $\mu_{\text{in}} = 8.9, \mu_{\text{out}} = 17.6$ 。

该类 EVs 的日行驶里程数服从对数正态分布,其概率密度函数如下:

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (14)$$

式中: x 为 EVs 日行驶里程数; μ_D, σ_D 分别为其里程数的均值和方差, $\mu_D = 3.31, \sigma_D = 0.87$ 。

在接入充电桩 ΔT 时段后,第 i 辆 EV 断开充电桩时的电量 S_i 如下式所示:

$$S_i = S_{i,\text{base}} + \sum_{t=1}^{\Delta T} P_{i,t} \Delta t \eta \quad (15)$$

式中: η 为充放电效率; $S_{i,\text{base}}$ 为第 i 辆 EV 接入充电桩前的基础电量; Δt 为每个时段的时间长度。

2.2.2 电动汽车的充放电退化成本分析

在本节中,将分别阐述 EVs 参与 V2G 模式时的电池退化成本。电池的使用寿命主要与放电深度 $DOD_{\text{Bat}}^{\text{EVs}}(t)$ 以及充放电循环次数等因素相关,充放电循环次数与放电深度的关系如下:

$$L_c[DOD_{\text{Bat}}^{\text{EVs}}(t)] = 694 \cdot [DOD_{\text{Bat}}^{\text{EVs}}(t)]^{-0.795} \quad (16)$$

其中

$$DOD_{\text{Bat}}^{\text{EVs}}(t) = 1 - SOC_{\text{Bat}}^{\text{EVs}}(t)$$

由于电池在充放电过程中会产生损耗,因此相应的电池充电与放电退化成本 $C_{\text{Bat}}^{\text{de,cha}}(t)$ 和 $C_{\text{Bat}}^{\text{de,dis}}(t)$ 可描述如下:

$$C_{\text{Bat}}^{\text{de,cha}}(t) = \frac{C_{\text{Bat}}^{\text{EVs}} \cdot P_{\text{cha}}(t) \cdot \Delta t}{E_{\text{Bat}}^{\text{EVs}} \cdot L_c [DOD_{\text{Bat}}(t)] \cdot \eta_{\text{cha}}^2} \quad (17)$$

$$C_{\text{Bat}}^{\text{de,dis}}(t) = \frac{C_{\text{Bat}}^{\text{EVs}} \cdot P_{\text{dis}}(t) \cdot \Delta t}{E_{\text{Bat}}^{\text{EVs}} \cdot L_c [DOD_{\text{Bat}}(t)] \cdot \eta_{\text{dis}}^2} \quad (18)$$

式中: $DOD_{\text{Bat}}(t)$ 为电池放电深度; $C_{\text{Bat}}^{\text{EVs}}$ 为电池相关成本参数; $P_{\text{cha}}(t)$, $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为充电功率、放电功率; η_{cha} , η_{dis} 分别为充、放电效率。

为避免因深度充放电而缩短电池寿命,将充放电约束的 SOC 范围设定为 $[0.2, 0.8]$ 。当 SOC 达到 0.8 时, EVs 停止充电,且电池的 SOC 不低于 0.2。

2.2.3 优化模型目标函数

1) 负荷聚合商收益模型。在分时电价的前提下,负荷聚合商主要通过合理分配 EVs 集群充放电时段赚取收益,考虑参与削峰服务下负荷聚合商一天的总收益如下式所示:

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{t=1}^{24} |P_{i,t}| \Delta t p_{D,t} - p(t) \right] + P_s \Delta t \Psi_0 \quad (19)$$

式中: $p_{D,t}$ 为负荷聚合商与电网部门的购售电价格; $p(t)$ 为 EVs 用户与负荷聚合商之间的购售电价格; $P_s \Delta t \Psi_0$ 为负荷聚合商提供削峰服务获取的补贴; P_s 为削峰功率大小; Ψ_0 为调度中心给负荷聚合商的削峰补贴单价。

2) 电动汽车用户成本模型。EVs 用户的充放电成本 C_2 应该包括 EVs 充放电的总费用、参与削峰服务的补贴以及 EVs 充放电循环带来的损耗, EVs 用户一天的总成本 C_2 的计算方式如下:

$$C_2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{t=1}^{24} P_{i,t} \Delta t p(t) \right] - P_s \Delta t \Psi_1 + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} \omega_{\text{dis},i,t} C_{\text{Bat}}^{\text{de,dis}}(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} \omega_{\text{cha},i,t} C_{\text{Bat}}^{\text{de,cha}}(t) \quad (20)$$

式中: $P_s \Delta t \Psi_1$ 为 EVs 用户参与削峰服务获取的补贴; Ψ_1 为负荷聚合商给 EVs 用户的削峰补贴单价。

3) 考虑不确定性的总期望目标。负荷聚合商调控 EVs 充放电行为会涉及到 EVs 用户和负荷聚合商的利益问题,在整个调控过程中,合理权衡双方的利益才能最大限度提升负荷聚合商的收益和 EVs 用户的参与积极性。基于线性加权法,以函数 F_T 表征 T 时段 EVs 集群参与削峰辅助服务时负荷聚合商和 EVs 用户双方利益关系,表

达式如下所示:

$$F_T = -\lambda_1 \frac{C_1}{C_{1,\max}} + \lambda_2 \frac{C_2}{C_{2,\max}} \quad (21)$$

式中: T 为参与削峰辅助服务的时段; λ_1 , λ_2 分别为负荷聚合商收益和 EVs 用户充放电成本的加权系数; $C_{1,\max}$ 为负荷聚合商参与削峰辅助服务收益的最大值; $C_{2,\max}$ 为负荷聚合商参与削峰辅助服务时 EVs 用户充放电成本的最大值。

当负荷聚合商不参与削峰辅助服务时,双方利益以 F_0 表示,此时 $C_{1,\max}$ 为不参与削峰辅助服务下负荷聚合商收益的最大值, $C_{2,\max}$ 为不参与削峰辅助服务下 EVs 用户充放电成本的最大值。 $C_{1,\max}$ 与 $C_{2,\max}$ 求解方式与下文中以 $\min Z_1$ 为目标函数的优化模型求解方法相同。不同应用场景下双方利益主次可通过设置不同权重 λ_1 和 λ_2 加以区分,为更好地保障用户利益、调动用户参与削峰辅助服务的积极性, λ_1 取值区间为 $(0.2, 0.4)$, λ_2 取值区间为 $(0.6, 0.8)$ 。

基于上述函数 F 和削峰需求矩阵 P , 文章提出了一天以负荷聚合商和 EVs 用户双方期望收益最大化为目标的目标函数 Z_1 :

$$\min Z_1 = \sum_{T=1}^{24} [\delta_T F_T] + (1 - \sum_{T=1}^{24} \delta_T) F_0 \quad (22)$$

而 F_T 受削峰后续时段充放电策略影响,因此计算 F_T 时需先完成削峰后续时段充放电策略优化模型的求解。

4) 削峰后时段平滑目标。“负荷尖峰”的出现可能导致后续时间段内系统对削峰辅助服务的需求增加,从而对系统的稳定运行产生不利影响。因此,在满足电动汽车集群自身充放电需求的前提下,对其参与削峰服务后续时间段的充放电策略进行优化^[9]。

后续优化过程目标函数 Z_2 :

$$\min Z_2 = \frac{\sum_{t=T}^{24} (\sum_{i=1}^n P_{i,t} - P_{\text{avg}})^2}{24 - T} \quad (23)$$

式中: P_{avg} 为可调电动汽车集群的平均功率; n 为集群中参与削峰辅助服务的电动汽车数量。

2.2.4 约束条件

1) 电动汽车充放电功率约束:

$$\begin{cases} 0 < P_{i,t} \leq \omega_{\text{cha},i,t} P_{\text{cha,max}} P_{\text{cha},i,t} & \text{充电} \\ P_{i,t} = 0 & \text{静止} \\ -\omega_{\text{dis},i,t} P_{\text{dis,min}} \leq P_{i,t} < 0 & \text{放电} \\ t \in [1, 24] \end{cases} \quad (24)$$

2)电动汽车电池容量 S_i 约束:

$$S_{i,\min} \leq S_i \leq S_{i,\max} \quad (25)$$

式中: $S_{i,\min}$, $S_{i,\max}$ 分别为第 i 辆EV的最低电量需求和电池容量最大值。

3)变压器容量约束:

$$P_{\text{base},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t} \leq S_T \quad (26)$$

式中: S_T 为区域内变压器的最大容量; $P_{\text{base},t}$ 为区域内基础负荷功率大小。

4)功率平衡约束:

$$P_{\text{base},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t} \leq P_{N,t} + P_{\text{ess},t} + P_{\text{tran},t} \quad (27)$$

式中: $P_{N,t}$ 为新能源出力功率; $P_{\text{ess},t}$ 为储能装置出力功率; $P_{\text{tran},t}$ 为联络线出力功率。

5)联络线功率约束:

$$0 \leq P_{\text{tran},t} \leq P_{\text{tran},\max} \quad (28)$$

式中: $P_{\text{tran},\max}$ 为联络线最大输电功率,仅在购电时使用,且不向外电网输电。

6)储能功率约束:

$$P_{\text{ess},\text{discmax}} \leq P_{\text{ess},t} \leq P_{\text{ess},\text{chmax}} \quad (29)$$

式中: $P_{\text{ess},\text{discmax}}$ 为储能的最大放电功率; $P_{\text{ess},\text{chmax}}$ 为储能的最大充电功率。

3 算例分析

EVs充放电策略模型的求解是一项复杂的任务,涉及在削峰前后两个阶段优化充放电策略。采用遗传算法和CPLEX求解器对该模型进行求解。

3.1 参数设置

假设该区域配置有包含总容量为5 MW的光伏场,储能额定功率为1 MW。一个周期(24 h)内有100辆EVs接受负荷聚合商管理,其电池容量为90 kW·h,最大充电功率为10 kW,放电功率为6 kW,充电放电效率均为90%。以国内某分布式电源示范区的新能源出力数据作为历史数据。

设置分时电价主要如下:22:00—次日06:00为谷价0.58元/(kW·h),06:00—10:00,12:00—16:00为平价0.88元/(kW·h),10:00—12:00和16:00—22:00为峰价1.1元/(kW·h)。

设置EVs用户从负荷聚合商购电的电价为1元/(kW·h),放电回收的价格比分时电价少0.2元/(kW·h)。单位按照削峰补贴均价2元/(kW·h)作为削峰补贴标准,设置 $\Psi_0=2$, $\Psi_1=1$ 。经联络线装置向上级电网购电价格比削峰补贴电价高20%。储能配置成本150元/kW。设置遗传算法

种群规模60,最大迭代次数500,变异率0.001。

3.2 新能源出力结果

利用K-means算法对所生成的抽象场景进行聚类,生成五个典型光伏出力场景结果如图3a所示,结合各类典型场景出现概率(场景4概率最大),模拟得到新能源出力结果,并结合负荷预测结果,计算得到削峰需求量,将所得结果与实际结果相比较,对比结果如图3b所示,光伏出力主要位于06:00—18:00,峰时电价期间削峰需求高于其他时段。场景1~场景5对应出现的概率分别为0.015,0.285,0.113,0.563和0.024。

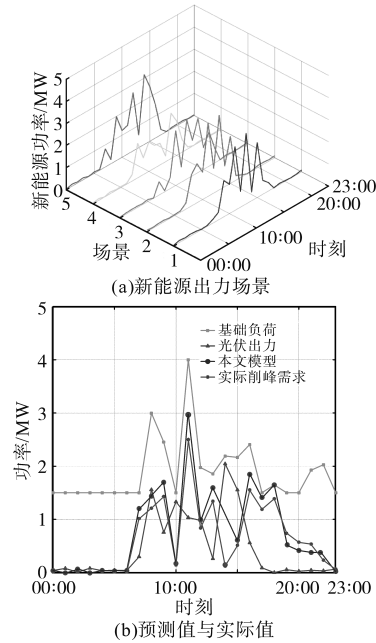


图3 典型新能源出力场景与光伏预测值和实际值曲线

Fig.3 Typical new energy output scenarios and curves of photovoltaic forecast values vs actual values

3.3 电动汽车集群最优充放电策略仿真结果

为了验证所提方法的有效性,负荷聚合商分别在无序充电(模式1)、考虑EVs参与削峰服务的有序充放电模式(模式2)和文章控制策略(模式3)三种模式下对EVs集群充放电行为进行管控。

三种模式下EVs集群充放电功率如图4所示,以时间06:00—18:00参与削峰服务为例进行分析。

由图4a可知,模式1下EVs集群充放电功率仅与EVs接入充电桩时段相关,因其在峰(段)价下EVs充电功率较大,因此EVs用户充电成本较高。相较于模式1,模式2、模式3在负荷聚合商的管理下,EVs用户在峰段时大幅减少了充电功率,并增大了放电功率,最大程度优化了自身充放电成本和负荷聚合商收益。

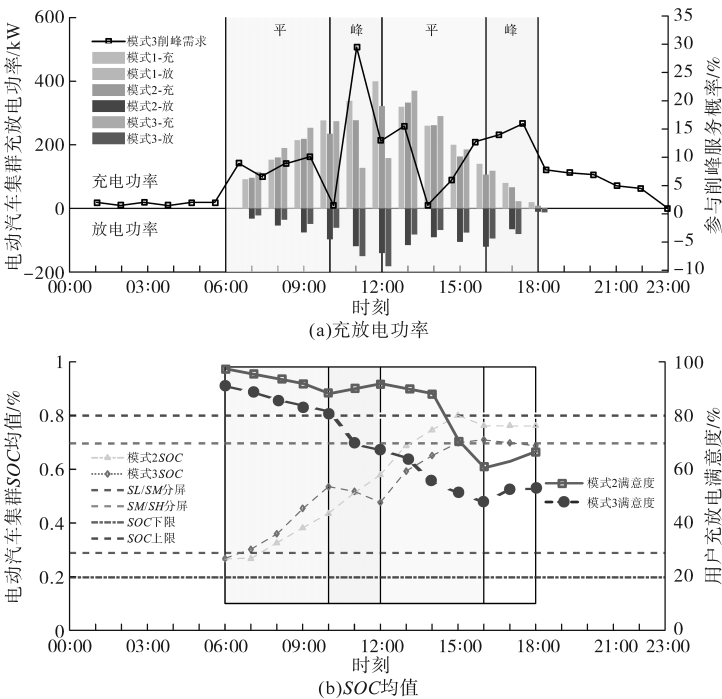


图4 不同模式下电动汽车集群充放电策略对比

Fig.4 Comparison of charging and discharging strategies for electric vehicle clusters under different modes

图4中,以平段(06:00—10:00),峰段(10:00—12:00)为例。平段时模式3的正向充电功率较模式1、模式2高,符合模糊规则:平段与SOC低时需高充电概率,平段低电价时高充电,既降低用户充电成本,又为峰段储备削峰容量;峰段模式3的负向放电功率(绝对值)较模式2大,EVs集群SOC下降,模式3满足“峰段高放电赚补贴”目标。这种“平段高充、峰段高放”的功率节奏,是分时电价与模糊规则协同作用的结果。

结合分时电价与SOC实时状态,依据模糊控制规则分析过程,获得模式2、模式3满意度曲线如图4b中所示,由满意度曲线可以看出,模式3相比模式2的满意度高。模式3在06:00—10:00期间,随着SOC不断增长,满意度逐渐平缓减低;10:00—12:00期间放电参与削峰服务,满意度提升;12:00—16:00期间SOC达到较高水平,用户为避免过度充电,该期间不愿进行充电,满意度下降迅速;16:00—18:00期间,用户放电参与削峰服务,满意度呈现回升趋势。

三种模式下平/峰段充放电功率结果对比如表2所示。由表2可以看出,模式1峰段期间充电功率大,即充电成本高;模式2、模式3在平段总充电电量基本保持一致,平段期间模式3放电功率相对模式2减少约160 kW·h,保证在下一阶段峰段期间减少充电功率,降低充电成本,同时有

表2 平段峰段充放电功率

Tab.2 Charging and discharging power in flat periods and peak periods

模式	平段总充电/ (kW·h)	平段总放电/ (kW·h)	峰段总充电/ (kW·h)	峰段总放电/ (kW·h)
模式1	1 300	/	1 350	/
模式2	1 896.75	826.67	1 015.97	550
模式3	1 955.41	666.03	703.79	557.58

利于峰段期间放电,参与削峰服务,获取收益。

由图5a给出了不同加权系数下模式3中负荷聚合商总期望收益与电动汽车用户总期望充放电成本等高线图,综合考虑两者效益,文章中 λ_1 取0.25, λ_2 取0.75,使得负荷聚合商总期望收益相对最高、用户充放电成本相对最低。由图5b可知,相较于模式1,由负荷聚合商控制EVs充放电行为的模式2、模式3获取了较大的放电收益,大幅降低了EVs用户的充放电成本,并增加了负荷聚合商从中获取的收益,模式3能够保证在峰价时段保持较高的放电功率,提供削峰服务。模式3的EVs集群通过参与削峰辅助服务获取相应补贴比模式2高约320元,同时EVs用户总期望充放电成本比模式2减少约180元。综上所述,EVs用户的总期望充放电成本以及负荷聚合商的总期望收益得到了更大程度的优化。

参与削峰后续时段优化仿真结果表明文章

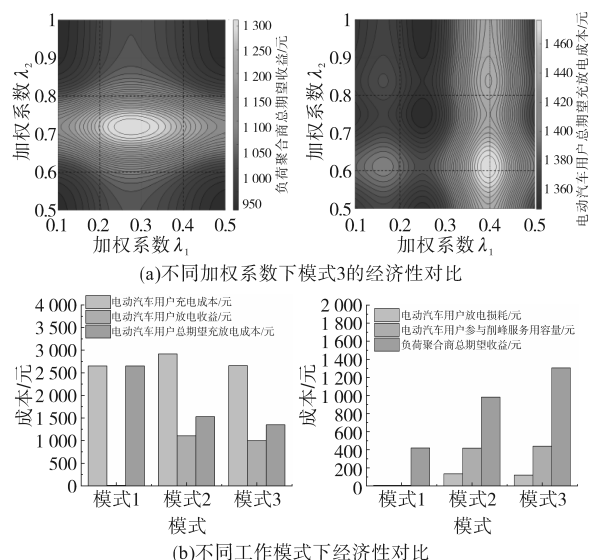


图5 不同加权系数与不同工作模式下经济性对比

Fig.5 Economic comparison under different weighting coefficients and working modes

控制策略能够在一定程度上降低“负荷尖峰”,有效保障了电力系统的稳定运行,文章对比不再进行描述。

4 结论

针对系统内负荷聚合商提供削峰辅助服务优化收益问题,考虑EVs用户SOC模糊控制,以负荷聚合商收益和EVs用户充放电成本的总期望收益最大为目标的EVs集群充放电策略优化模型,实现了多方共赢。证明了所提策略和模型的实用性、有效性和可行性。主要贡献如下:

1)所提充放电优化策略考虑了模糊控制,可有效解决传统策略用户决策理想化的缺陷:通过引入SOC模糊控制,动态筛选“高意愿合规用户”,更贴合实际用户行为,提升用户自愿参与削峰服务的积极性。

2)所提充放电优化策略考虑了系统削峰需求,在保障EVs用户充电需求的前提下进一步优化了负荷聚合商和EVs用户总期望收益。

参考文献

- [1] 刘洋,于海东,刘文彬,等. V2G模式下电动汽车多目标需求响应调度策略[J]. 山东电力技术,2025,52(7):27-34.
LIU Yang, YU Haidong, LIU Wenbin, et al. Multi-objective demand responses cheduling strategy for electric vehicles in V2G mode[J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(7): 27-34.
- [2] 马力,彭伟伦,范晋衡,等. 基于改进纵横交叉算法的车网互动模式下电动汽车充放电优化调度策略研究[J]. 电测与仪表,2025,62(2):133-142.
- [3] 陈楷,王景钢,王卉,等. 考虑电动汽车与分布式光伏协同的配电网集群划分与运行调度策略[J]. 南方电网技术,2025,19(3):15-23,38.
- [4] 王希鑫. 基于双层优化模型的电动汽车充放电调度策略[D]. 西安:陕西理工大学,2024.
WANG Xixin. Charge and discharge scheduling strategies for electric vehicle double-layer optimization models[D]. Xi'an: Shaanxi University of Technology, 2024.
- [5] LIU H, Qi J J, WANG J H, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3763-3772.
- [6] 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.
- [7] 戴朝华,杨帅,叶圣永,等. 供需双方博弈视角下的V2G优化策略[J]. 西南交通大学学报,2025,60(1):166-174,193.
DAI Chaohua, YANG Shuai, YE Shengyong, et al. Vehicle to grid optimization strategy from the perspective of supply and demand game[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(1): 166-174, 193.
- [8] 贾蕊. 考虑多类型辅助服务的电动汽车集群能量特性优化调度研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.
JIA Rui. Research on optimal dispatching of electric vehicle cluster energy characteristics considering various types of auxiliary services[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [9] 赵林听,李成鑫,桂江一,等. 考虑削峰服务的电动汽车集群最优充放电策略[J]. 电力建设,2025,46(11):24-34.
ZHAO Linxin, LI Chengxin, GUI Jiangyi, et al. Optimal charging and discharging strategies for electric vehicle clusters considering power peak shaving[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(11): 24-34.
- [10] 高爽,戴如鑫. 电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略[J]. 电力系统自动化,2023,47(18):60-67.
GAO Shuang, DAI Ruxin. Charging control strategy for electric vehicle aggregation participating in frequency regulation ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 60-67.

- [11] 房宇轩,胡俊杰,马文帅. 计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5091-5103.
- FANG Yuxuan, HU Junjie, MA Wenshuai. Optimal dispatch strategy for electric vehicle aggregators based on stackelberg game theory considering user intention[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5091-5103.
- [12] 李军,梁嘉诚,刘克天,等. 计及用户响应度的电动汽车充放电优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 123-132.
- LI Jun, LIANG Jiacheng, LIU Ketian, et al. Optimal scheduling strategy for electric vehicles charging and discharging considering user responsiveness[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 123-132.
- [13] 罗敏,杨景旭,周尚礼,等. 考虑电动汽车用户决策行为的电价型需求响应模型[J]. 机电工程技术, 2023, 52(11): 204-208, 255.
- LUO Min, YANG Jingxu, ZHOU Shangli, et al. Electricity price demand response model considering the decision-making behavior of electric vehicle users[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(11): 204-208, 255.
- [14] 何超. 基于模糊理论的能源调度过程中的不确定性问题研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
- HE Chao. Research on uncertainty in energy scheduling process based on fuzzy theory[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [15] 李江涛. 基于模糊控制的电动汽车混合储能系统能量管理策略[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2024.
- LI Jiangtao. Fuzzy control based energy management strategy for hybrid energy storage system of electric vehicle[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [16] VIJAYA K, KARUNANITHI K, RAJA S P, et al. Modelling of electric vehicle charging station and controlled by fuzzy logic controller with different modes of operation[J]. Journal of Control and Decision, 2023, 10(1): 26-39.
- [17] DONG Zihang, ZHANG Xi, ZHANG Ning, et al. A distributed robust control strategy for electric vehicles to enhance resilience in urban energy systems[J]. Advances in Applied Energy, 2023, 2(9): 100115.
- [18] 张婷婷. 考虑经济物理约束的电动汽车负荷聚合可调节容量评估[D]. 保定:华北电力大学, 2022.
- ZHANG Tingting. Estimation of adjustable capacity of EV load aggregation considering economic and physical constraints[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.
- [19] 臧汉洲,叶宇剑,汤奕. 一种基于内点策略优化的受约束电动汽车充放电策略[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4170-4180.
- ZANG Hanzhou, YE Yujian, TANG Yi. Constrained electric vehicle charging and discharging strategy based on interior-point policy optimization[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4170-4180.
- [20] 乐健,王靖,廖小兵,等. 基于随机场景的配电网源网储协同规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 132-147.
- LE Jian, WANG Jing, LIAO Xiaobing, et al. A source-network-storage collaborative planning method for distribution networks based on random scenarios[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 132-147.
- [21] PENG Peng, WANG Zongyao, DONG Yuhan. Optimal scheduling strategy for orderly charging and discharging of electric vehicles based on spatio-temporal characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 9: 5862-5871.

收稿日期:2025-09-09

修改稿日期:2025-09-18