

考虑电动汽车集群响应的分布式资源协同调度策略研究

江建,张树森,徐峰亮

(国网河南省电力公司信阳供电公司,河南 信阳 464000)

摘要:在国家政策的大力推动下,分散式风电大规模并网,给河南乡村配电网运行带来严峻挑战。为充分调动电动汽车(electric vehicle, EV)群需求响应及小型抽水蓄能灵活性资源参与电网协同调度,采用Takagi-Sugeno-Kang(TSK)模糊模型量化电动汽车群的响应意愿,以明确电动汽车集群充电功率的可调节裕度。在此基础上,提出一种计及电动汽车响应不确定性的风电-电动汽车群-小型抽水蓄能协同运行模型,以弃风惩罚和激励成本最小为目标函数引导电动汽车及抽水蓄能参与功率调节。基于信阳某乡村地区10 kV配电系统,验证了考虑电动汽车响应意愿对促进风电消纳和提升运行经济性的有效性,以及与小抽水蓄能共同形成“风-储-荷”运行的协同效果。

关键词:电动汽车集群;响应意愿;需求响应;分散式风电;协同运行

中图分类号:TM73

文献标识码:A

文章编号:1007-9904(2024)06-0001-11

Research on the Collaborative Dispatch Strategy of Distributed Resources Considering the Response of Electric Vehicle Cluster

JIANG Jian, ZHANG Shusen, XU Fengliang

(State Grid Xinyang Power Supply Company, Xinyang 464000, China)

Abstract: With the national policy of vigorously promoting wind power, the large-scale integration of distributed wind power has posed significant challenges to the safe operation of the rural distribution grid in Henan. In order to motivate the enthusiasms of the demand response of electric vehicle (EV) clusters and the flexible small-scale pumped storage power station to participate in grid coordinated dispatch, the response willingness of the EV cluster is quantified based on the Takagi-Sugeno-Kang fuzzy mode to obtain a schedulable margin of the cluster charging power. And then, considering the uncertainty of response willingness for the EVs, a collaborative operation model of the electric vehicle and small-scale pumped storage is established. Taking the minimum cost of wind power curtailment penalties and incentive as an objective function, we guide the participation of EVs and pumped storage in power adjusting. Take a rural area's 10 kV distribution network in Xinyang as an example, we verified that the proposed approach has effect in promoting wind power consumption and improving the operation economy. We also concluded that EVs in conjunction with small-scale energy storage can provide wind-storage-load collaborative operation.

Keywords: electric vehicle cluster; response willingness; demand response; distributed wind power; collaborative operation

0 引言

随着低风速风电技术取得突破及“千乡万村驭风计划”“百县千村万台”等系列相关政策的推进,河南乡村地区分散式风电得到快速发展^[1]。信阳电网作为河南传统受端电网,未来几年依然存在新能源消纳空间。但信阳10 kV网架尤其是农村配电网网

架较为薄弱,主干线路联络率低,互联互通能力不足。大量分散式风电入网,可能会给系统安全稳定运行带来严峻挑战。一方面,高比例风电接入导致电压越限、设备重过载及功率上翻甚至引起弃风,给配电网运行带来了严峻挑战。另一方面,新能源并网规模的不断壮大也带动了电动汽车(electric vehicle, EV)数量的逐年攀升,群体效应正在显现。大规模电动汽车无序充电负荷可能与部分峰荷相叠加导致峰谷差进一步加大。这些问题不仅会大幅增加配电网的调度运行难度与投资成本,也反过来制

基金项目:国网河南省电力公司2022年度重点科技项目(521770230001)。

2022 Key Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (521770230001)。

约了乡村配电网中风电的发展。

信阳地处大别山腹地,水资源非常丰富,域内水库众多,且地势落差较大。近年来,信阳市结合本地水资源优势,大力推进分散式抽水蓄能项目。乡村地区通过充分利用小型抽水蓄能电站参与系统运行,可以辅助域内分散式风电确保功率就地平衡,提升风电接纳率。与此同时,由于电动汽车具有分布式移动储能特性,若能加以合理引导和利用,充分发挥需求响应作用,配合小型抽水蓄能等可控分布式资源,通过“源-荷-储”多元灵活资源互动,提高资源利用效率,有效解决分散式风电接入带来的消纳及运行问题。

“风-储-荷”联合运行研究大多是针对集中式风电并网场景,且面向分散式风电的控制策略研究主要聚焦在无功控制方面^[2],较少探讨分散式风电机组与配电网中灵活性资源协调控制策略。电动汽车需求响应作为一种灵活可控的分布式资源,其实现形式包括价格型和激励型两类。目前大部分研究属于价格型需求响应范畴。在分时电价机制下,根据荷电状态弹性电价引导电动汽车改变用电行为,以解决无序充电引起的综合能源系统运行经济性的问题^[3]或实现充电费用最小的目标^[4]。在分时电价定价问题上,文献^[5]结合电网运行的安全性与用户满意度,提出了一种电动汽车充放电定价模型,实现了供需双赢的目标。但仅依靠分时电价可能会导致峰谷倒置,通过电动汽车参与具有时变电价信号的需求响应^[6-7],即实时电价机制的实施可以避免这一现象。但是该机制需要结合实际运行场景频繁更新调整电价,实现过程过于繁琐。激励型需求响应通过签订协议直接补贴参与响应的用户,根据用户偏好制定个性化的激励策略^[8-10]。然而,现有研究在追求主体效益最大化目标下对用户进行直接调用,往往忽视了用户响应意愿或基于用户心理学更侧重于价格对意愿的决定性作用^[11-12],没有兼顾主观意愿所涉及的电动汽车运行状态等其他因素的影响,从而制约了需求响应潜力的最大化利用。

为解决上述问题,将考虑用户主观意愿的电动汽车需求响应引入配电网协同运行策略。考虑电动汽车电池荷电状态(state of charge, SOC)和激励价格对集群响应意愿的影响,基于Takagi-Sugeno-Kang (TSK)模糊化方法,构建了计及意愿不确定性的激励型电动汽车需求响应模型,以此评估电动汽车

集群参与运行的潜力。并在此基础上,提出分散式风电-电动汽车群响应-小抽水蓄能联合运行模型。结合信阳某乡村地区10 kV系统进行仿真分析,验证了小抽水蓄能-电动汽车群参与运行、提高分散式风电消纳能力的可行性和优越性。

1 考虑意愿的电动汽车需求响应模型

为应对分散式风电出力的随机波动特性叠加上电动汽车无序充电对电网带来的不利影响,通过需求响应机制给予电动汽车用户价格激励,鼓励其管理充电行为,可以实现对电动汽车充电行为的调控,使电动汽车聚合集群具备一定规模和时序特性,从而参与配网运行,协同小型储能等配电网中具备一定快速响应和调节能力的分布式灵活性资源进行功率调控是一种可行方法。

以抽水蓄能为代表的小型储能等已经是较为成熟的调节手段,因此研究聚焦电动汽车需求响应建模方法。在需求响应策略实施的过程中,保证用户积极参与是实现用户-电网双向互动的基础,通常采用响应意愿来描述需求响应的参与程度。因此,在量化用户主观意愿的基础上,建立激励型电动汽车需求响应模型。

1.1 电动汽车响应意愿量化模型

为合理刻画电动汽车用户主观意愿,引导电动汽车有序用电,以充电站充放电电价为主导因素,实现综合充放电价格、电池荷电状态等影响因素的电动汽车群响应意愿量化建模。

TSK模糊模型作为一种灵活性高且能处理不确定性的模糊推理模型,被广泛应用到模糊控制、决策和优化等多个领域^[13],因此,选用该方法量化响应意愿,并在此基础上研究电动汽车群可调度裕度,明确其需求响应潜力。

考虑到电动汽车用户的响应意愿受电池SOC和激励价格的影响,在TSK模糊子集中对电池SOC和激励价格的三种状态分别定义为“高”“中”“低”。在处理电动汽车响应意愿的模型中,涉及三个关键步骤:

- 1) 定义电池SOC和激励价格对应的模糊子集;
- 2) 为模糊子集设定梯形隶属度函数,将电池SOC和激励价格对应的隶属度函数值作为TSK模糊规则的输入;

3)每一个SOC与价格的模糊子集通过既定的模糊规则对应一个响应意愿函数。

以“SOC低”和“激励价格低”模糊子集为例,TSK模糊规则定义为

$$\begin{aligned} & \text{if } (S = S_{\text{low}}) \text{ and } (C = C_{\text{low}}) \\ & \text{then } \lambda_k = f_k(S, C) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: S 和 C 分别为电池SOC和电动汽车激励价格; S_{low} 和 C_{low} 分别为模糊子集“SOC低”和“激励价格低”; λ_k 为第 k 条模糊规则下响应意愿值; $f_k(\cdot)$ 为第 k 条模糊规则的函数表达式,该模糊规则的函数表达式为线性函数。

$$f_k^{\text{EV}}(x_1^{\text{EV}}, x_2^{\text{EV}}) = a_{0,k} + a_{1,k}S + a_{2,k}C \quad (2)$$

式中: $f_k^{\text{EV}}(x_1^{\text{EV}}, x_2^{\text{EV}})$ 为电动汽车群响应意愿的第 k 条模糊规则的函数; x_1^{EV} 为电动汽车群的激励平均价格; x_2^{EV} 为电动汽车群电池荷电状态; $a_{0,k}$ 为模糊规则的固定参数; $a_{1,k}$ 为模糊规则与 S 有关的固定参数; $a_{2,k}$ 为模糊规则与 C 有关的固定参数。

电动汽车群的意愿可以通过计算所有模糊规则的加权平均值来表示,其中每个模糊规则对应的权重为其隶属度值与价格的模糊子集组合的结果,具体表达式为

$$\lambda_{\text{EV}} = \frac{\sum_{k=1}^K \mu_k^{\text{EV},C}(x_1^{\text{EV}}) \mu_k^{\text{EV},S}(x_2^{\text{EV}}) f_k^{\text{EV}}(x_1^{\text{EV}}, x_2^{\text{EV}})}{\sum_{k=1}^K \mu_k^{\text{EV},C}(x_1^{\text{EV}}) \mu_k^{\text{EV},S}(x_2^{\text{EV}})} \quad (3)$$

式中: λ_{EV} 为电动汽车群的响应意愿值; $\tilde{\lambda}_{\text{EV}}$ 为模糊规则的数量; $\mu_k^{\text{EV},C}(x_1^{\text{EV}})$ 为电动汽车群的激励平均价格 x_1^{EV} 的模糊子集对应的隶属度函数; $\mu_k^{\text{EV},S}(x_2^{\text{EV}})$ 为电动汽车群电池荷电状态 x_2^{EV} 的模糊子集对应的隶属度函数。

电动汽车充电行为的不确定性作为电网负荷管理的一个重要因素,同时也是挖掘其调节潜力的关键因素。这种不确定性源于电动汽车用户充电的个体行为和时间的多变性。在实际运行中,电动汽车的充电需求可能随时变化,从而导致电网负荷出现波动以及参与电网运行调节能力的波动。因此,有效处理电动汽车充电行为的不确定性至关重要。为描述响应意愿的不确定程度,可以采用三角隶属度函数。描述电动汽车群响应意愿的三角隶属度参数为

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

式中: λ_1^{EV} 、 λ_2^{EV} 、 λ_3^{EV} 均为电动汽车群的响应意愿的三角隶属度参数; r_1^{EV} 和 r_3^{EV} 均为确定电动汽车群的响应意愿的三角隶属度的三角形底边顶点位置的比例系数,其中 $0 < r_1^{\text{EV}} < 1$, $r_3^{\text{EV}} > 1$ 。

根据获得的参数,获取电动汽车响应意愿的三角隶属度模糊表达式为

$$\tilde{\lambda}_{\text{EV}} = (\lambda_1^{\text{EV}}, \lambda_2^{\text{EV}}, \lambda_3^{\text{EV}}) \quad (5)$$

式中: $\tilde{\lambda}_{\text{EV}}$ 为汽车群响应意愿的模糊表达。

1.2 电动汽车群可调度范围模型

为有效地制定需求响应策略,准确评估电动汽车群的可调度范围至关重要,可调度范围代表了电动汽车群在满足电力系统需求时的灵活性。假设共有 N_{EV} 辆电动汽车, t 时刻汽车群的平均SOC为 $S(t)$,则 $t+1$ 时刻汽车群的SOC^[14]为:

$$\begin{aligned} S(t+1) &= S(t) + \\ & \frac{\eta_{\text{ch}} P_{\text{EV}}(t) \Delta t - (1 - K(t)) N_{\text{EV}} \frac{M_{\text{unit}}}{\eta_{\text{em}}} v(t) \Delta t}{N_{\text{EV}} B_{\text{av}}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$S_{\text{min}} \leq S(t) \leq S_{\text{max}} \quad (7)$$

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

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

$$\min F_0 = \min \left(\sum_{t=1}^T C_{\text{tou}}(t) P_{\text{ch0}}^{\text{EV}}(t) \right) \quad (8)$$

式中: F_0 为汽车群充电成本; T 为调度时刻总数,24h; $C_{\text{tou}}(t)$ 为 t 时刻从主网购电价格; $P_{\text{ch0}}^{\text{EV}}(t)$ 为 t 时刻汽车群参与需求响应前的充电功率。

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

$$\tilde{P}_{\text{min},t}^{\text{EV}} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq \tilde{P}_{\text{max},t}^{\text{EV}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \tilde{P}_{\text{min},t}^{\text{EV}} = P_{0,t}^{\text{EV}} - \tilde{\lambda}_{\text{EV},t} (P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{min},t}^{\text{agg}}) \\ \tilde{P}_{\text{max},t}^{\text{EV}} = P_{0,t}^{\text{EV}} - \tilde{\lambda}_{\text{EV},t} (P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{max},t}^{\text{agg}}) \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{\min,t}^{\text{agg}} = 0 \quad (11)$$

$$P_{\max,t}^{\text{agg}} = K(t) N_{\text{EV}} p_{\text{ch}} \quad (12)$$

式中： $P_{0,t}^{\text{EV}}$ 为 t 时刻汽车群的原始充电功率； $\tilde{\lambda}_{\text{EV},t}$ 为 t 时刻汽车群响应意愿的模糊表达； $\tilde{P}_{\min,t}^{\text{EV}}$ 和 $\tilde{P}_{\max,t}^{\text{EV}}$ 分别为 t 时刻汽车群可调度范围下限和上限； $P_{\min,t}^{\text{agg}}$ 和 $P_{\max,t}^{\text{agg}}$ 分别为 t 时刻汽车群聚合充电功率的最小值和最大值； p_{ch} 为每辆电动汽车额定充电功率。

2 风电-抽水蓄能-电动汽车群协同运行模型

针对配电网中可再生能源的“功率上翻”等消纳问题,通过考虑汽车电池SOC和激励价格对响应意愿的影响以及TSK模糊模型量化电动汽车集群的响应意愿,获得电动汽车可参与调度的充电功率范围。对电动汽车集群实行激励型需求响应,调整其充电功率,结合配电网侧的小型抽水蓄能资源^[15],形成“源-荷-储”联合协同运行模式,提高分散式风电的消纳量以及配电网运行的经济性。整体协同运行策略如图1所示。

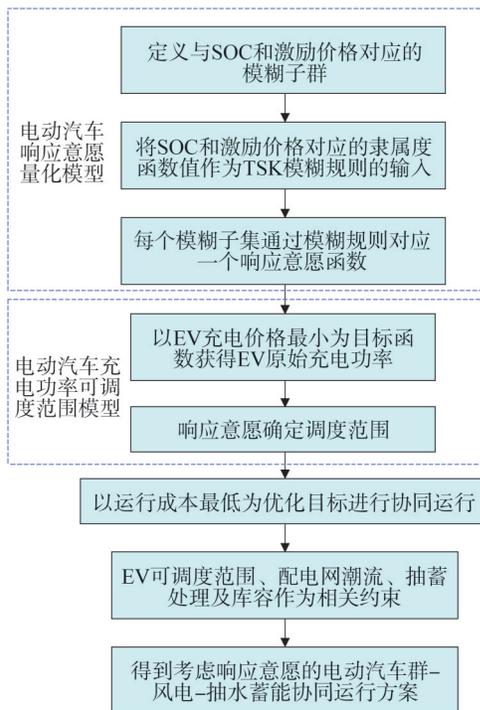


图1 风电-抽水蓄能-电动汽车群协同运行框图

Fig.1 Overall block diagram of collaborative operation of wind-pumped storage-EVs

2.1 协同运行问题的优化目标

在风电-抽水蓄能-电动汽车群协同运行模型中,以系统总经济性最优为优化目标,考虑弃风成本以及电动汽车的激励型需求响应调度成本最小。

$$\min F = \min(F_1 + F_2) \quad (13)$$

式中： F 为综合成本； F_1 为弃风惩罚成本； F_2 为激励型电动汽车群需求响应调度成本。

1)弃风成本。

$$F_1 = \sum_{t=1}^T C_{\text{pun}} P_{w,t}^{\text{cur}} \quad (14)$$

$$P_{w,t}^{\text{cur}} = P_{w,t}^{\text{max}} - P_{w,t} \quad (15)$$

式中： F_1 为决策时段内总弃风惩罚成本； $P_{w,t}^{\text{cur}}$ 为 t 时刻弃风功率； C_{pun} 为单位弃风成本,从系统运行的角度分析,可用等弃风量的火电发电成本和环境成本衡量弃风成本； $P_{w,t}^{\text{max}}$ 为 t 时刻风机有功出力上限； $P_{w,t}$ 为 t 时刻风机参与调度功率。

2)激励成本。

$$F_{\text{IDR},t} = \begin{cases} C_1^{\text{IDR}} \Delta P_{\text{IDR},t}, & 0 \leq \Delta P_{\text{IDR},t} \leq D_1 \\ \sum_{m=1}^M C_m^{\text{IDR}} D_m + C_{M+1}^{\text{IDR}} (\Delta P_{\text{IDR},t} - \sum_{m=1}^M D_m) & \sum_{m=1}^M D_m \leq \Delta P_{\text{IDR},t} \leq \sum_{m=1}^{M+1} D_m \end{cases} \quad (16)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^T F_{\text{IDR},t} \quad (17)$$

$$P_{0,t}^{\text{EV}} - P_{\text{EV}}(t) = \Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{EV}} \quad (18)$$

式中： $F_{\text{IDR},t}$ 为 t 时刻基于激励型需求响应对所调节负荷给予的补偿成本； M 为阶梯补偿价格等级； C_m^{IDR} 为第 m 级对应的调节负荷阶梯价格； D_m 为第 m 级功率调整量； $\Delta P_{\text{IDR},t}^{\text{EV}}$ 为 t 时刻激励型需求响应负荷调整量的绝对值^[15]。

2.2 协同运行问题的约束条件

1)基于Distflow模型的功率平衡约束。

配电网相比于输电网具有电压级别低、拓扑结构呈辐射状、有大量的分支线路和分布式电源、负载变化较大等特点。Distflow模型基于分布式参数模型,将配电网视为一个复杂的网络系统,考虑了线路的阻抗、负载的特点以及节点之间的连接关系,能够更好地反映配电网的实际运行情况,可以用来模拟和分析配电网中的潮流情况^[16]。

因此,配电网潮流约束可以分别表达为:

$$\sum_{i \in s(j)} \left[P_{ij} - \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(U_i)^2} R_{ij} \right] = \sum_{l \in x(j)} P_{jl} + P_j, \forall j \in \lambda_N \quad (19)$$

$$\sum_{i \in s(j)} \left[Q_{ij} - \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(U_i)^2} X_{ij} \right] = \sum_{l \in x(j)} Q_{jl} + Q_j, \forall j \in \lambda_N \quad (20)$$

$$(U_j)^2 = (U_i)^2 - 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) + \left[(R_{ij})^2 + (X_{ij})^2 \right] \cdot \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(U_i)^2}, \forall ij \in \lambda_L \quad (21)$$

式中: P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为节点*i*、节点*j*间馈线上流动的有功功率和无功功率; R_{ij} 、 X_{ij} 分别为节点*i*、节点*j*间支路电阻和支路电抗; $s(j)$ 、 $x(j)$ 分别为节点*j*的上游节点集合和下游节点集合; l 为节点*j*的下游节点; P_{jl} 、 Q_{jl} 分别为节点*j*、节点*l*间馈线上流动的有功功率和无功功率; P_j 、 Q_j 分别为节点*j*注入的有功功率和无功功率; λ_N 为电力网里的所有节点; λ_L 为电力网里的所有线路; U_i 和 U_j 分别为节点*i*电压和节点*j*电压。

2)系统运行约束。

配电网电压约束^[17]为

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}, \forall i \in \lambda_N \quad (22)$$

式中: U_{\min} 、 U_{\max} 分别为允许电压幅值的最小值和最大值。

线路功率约束为

$$P_e \leq P_e^{\max} \quad (23)$$

式中: P_e 、 P_e^{\max} 分别为流经第*e*条支路的有功功率及其上限。

3)计及响应意愿的电动汽车群功率调节相关约束。

电动汽车群相关约束主要包括充放电功率约束以及SOC约束,详见式(6)、式(7)、式(9)一式(12),此处不再赘述。

4)小型抽水蓄能功率调节相关约束。

抽水蓄能是一种利用水力能量进行储能的技术,可以有效储存大量的能量,迅速响应电力需求的变化,提供稳定的电力输出^[18]。抽水蓄能电站的精确运行模型较为复杂,因此考虑主要因素进行初步简化,明确抽水蓄能电站的抽水/发电效率与水头,并通过水流量获得抽水/发电功率,通过上水库库容的约束进行建模分析。具体模型如下:

$$\begin{cases} P_p(t) = Q_p(t) \rho g H_p / \eta_p \\ P_g(t) = Q_g(t) \rho g H_g \eta_g \end{cases} \quad (24)$$

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \quad (25)$$

$$\begin{cases} Q_p^{\min} \leq Q_p(t) \leq Q_p^{\max} \\ Q_g^{\min} \leq Q_g(t) \leq Q_g^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

$$V(t+1) = V(t) + Q_p(t) - Q_g(t) \quad (27)$$

式中: $V(t)$ 为*t*时刻上游水库库容; V_{\max} 、 V_{\min} 分别为上游水库库容的上限、下限; $Q_p(t)$ 、 $Q_g(t)$ 分别为抽水、发电时的水流量; Q_p^{\max} 、 Q_p^{\min} 分别为抽水状态下水流量的上限、下限; Q_g^{\max} 、 Q_g^{\min} 分别为发电状态下水流量的上限、下限; ρ 为水密度; g 为重力加速度; H_p 、 H_g 分别为发电水头和抽水扬程; $P_p(t)$ 、 $P_g(t)$ 分别为抽水功率、发电功率; η_p 、 η_g 分别为抽水效率、发电效率。

3 算例分析

3.1 算例场景

利用所提出的考虑电动汽车群响应意愿的“风-储-荷”协同运行策略,以河南省信阳某乡村地区 10 kV 配电系统为背景进行简化模拟,配电系统及分布式资源安装位置如图 2 所示,图中 1—11 表示配电网中的节点,(1)一(10)表示配电网中的支路。该系统中有 3 个电动汽车群,每个集群下辖 100 辆电动汽车,接入节点分别为节点 6、节点 7、节点 10。节点 4、节点 9 为分散式风电接入节点,节点 8 为抽水蓄能电站接入节点。该系统内分散式风电装机容量为 8 MW,小型抽水蓄能容量为 4 MW。采用的小型抽水蓄能电站与电动汽车各项参数如表 1 所示,用于激励的阶梯价格参数见文献[15]。实验算例利用 MATLAB 中 fmincon 函数按照内点法进行优化求解分析。

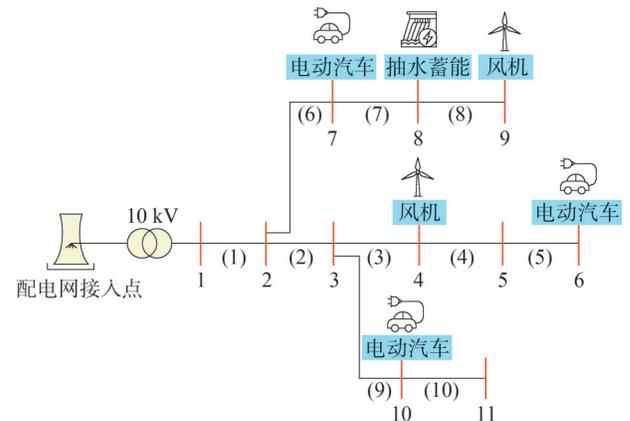


图2 某乡村 10 kV 系统拓扑图

Fig.2 Topology of a rural 10 kV system

表1 小型抽水蓄能及电动汽车参数
Table 1 Parameters of electric vehicle and pumped storage hydro

参数	数值	参数	数值
P_{dr}/kW	5	$V_{max}/(10^3 m^3)$	8
M_{unit}/kW	0.456	$V_{min}/(10^3 m^3)$	0.5
η_{em}	0.672	$V_{0}/(10^3 m^3)$	4
η_{ch}	0.9	η_p	0.8
$N_{EV}/辆$	100	η_g	0.75
B_{av}/kWh	27.3	H_p/m	24
$v/(km/h)$	40	H_g/m	24
S_{min}	0.2	S_{max}	1

系统各节点有功/无功负荷如图3所示。

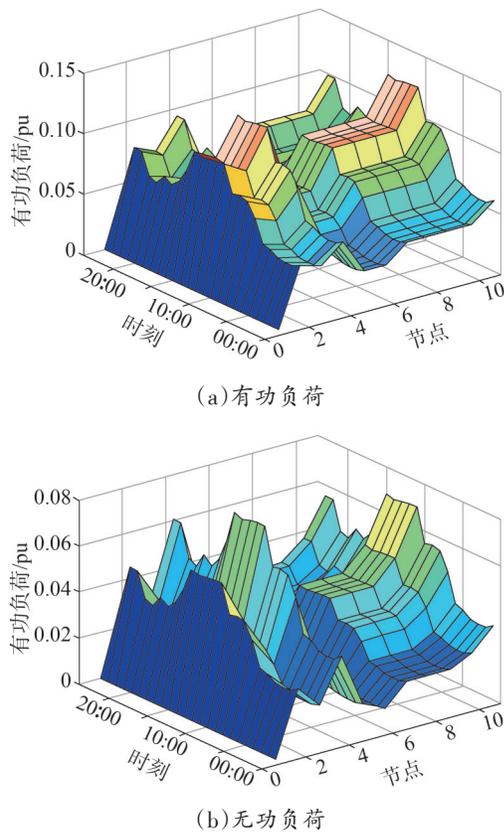


图3 各节点分时段有功/无功负荷

Fig.3 Active/reactive load of each node during different time periods

通过双馈型风力发电机风功率模型参数^[19]以及

该地24 h风速数据,得到单台2 MW风机的有功功率最大值,作为后续协同运行策略验证计算时单台风机出力的上限,如图4所示。

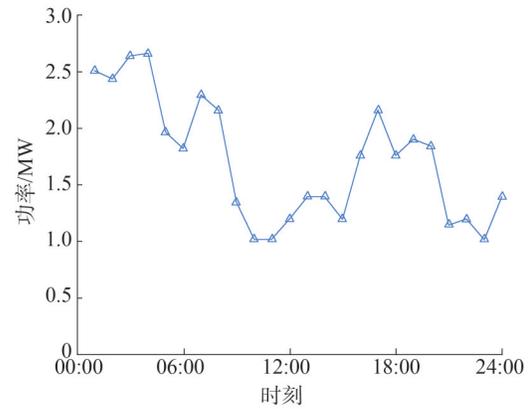


图4 单台2 MW风机有功出力上限

Fig.4 Maximum active power of a single 2 MW wind turbine

电动汽车集群一日24 h停驶概率^[20]如图5所示。在满足汽车出行需求的同时,以最低充电成本为目标,根据电网购电价格确定单个电动汽车集群在协同运行前的初始充电功率,如图6所示,分时电价数据见表2。电动汽车由于白天的出行计划,大部分安排在夜间进行充电。

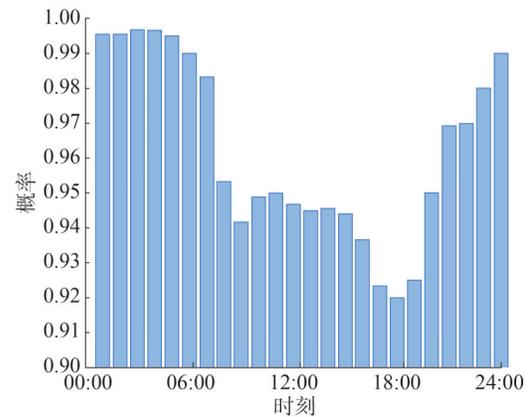


图5 电动汽车集群停驶概率

Fig.5 EV cluster outage probability

3.2 响应意愿模式优化对比分析

3.2.1 合理性分析

为验证提出的电动汽车集群动态响应意愿的合理性,仅考虑电动汽车参与协同运行的仿真结果,分

别针对静态及动态响应意愿进行对比分析。对以下三种场景的优化结果进行分析。

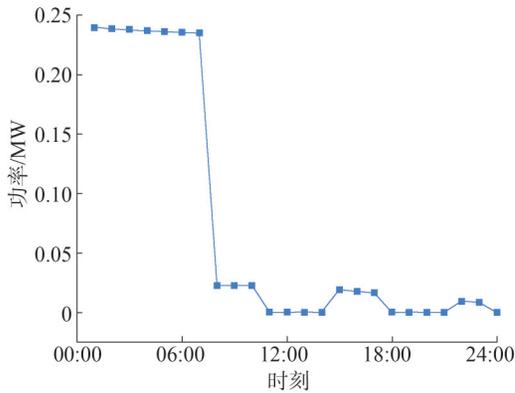


图6 单个电动汽车集群初始充电功率
Fig.6 Initial charging power of individual EV clusters

表2 分时电价

Table 2 Time of use tariffs

时段	电价/(元/kWh)
00:00—06:00, 23:00—24:00	0.4
06:00—09:00, 14:00—18:00, 20:00—23:00	0.7
09:00—14:00, 18:00—20:00	1

场景1:不考虑电动汽车集群用户的响应意愿;

场景2:静态响应意愿,取固定值0.5;

场景3:动态响应意愿。

三个电动汽车集群用户各场景的响应意愿如图7所示。

场景3考虑动态响应意愿时,用户的响应意愿与场景1、场景2意愿值差别较大。在01:00—05:00,风力发电功率大于系统内负荷水平,电动汽车初始充电功率较高,电动汽车集群可供调度的充电功率范围较其他时段低,电动汽车用户的响应意愿不高,三个集群用户响应意愿在0.3左右。结合集群用户停驶概率9:00—15:00,电动汽车用户行驶需求较小,且电动汽车初始充电功率较低,电动汽车集群可供调度的充电功率范围较广,电动汽车用户响应意愿明显高于场景2的静态响应意愿0.5,可以积极参与系统内风电的消纳。三个集群用户响应充电的意

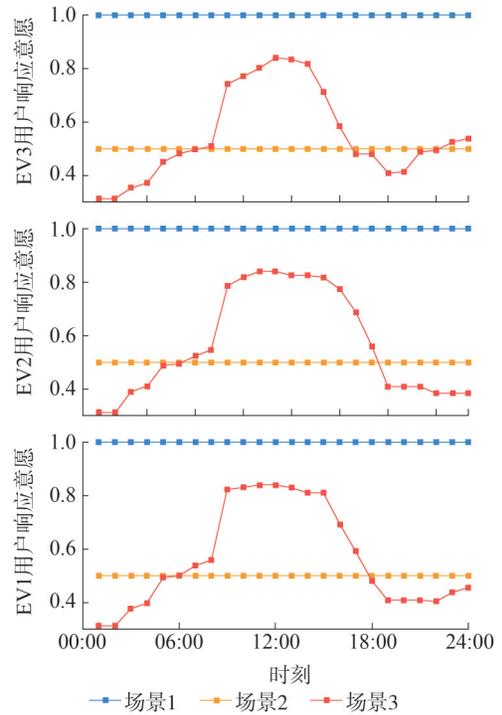


图7 各电动汽车集群用户不同场景响应意愿
Fig.7 Different scenarios response willingness of users in each EV cluster

愿在12:00均达到最高值0.84。在18:00之后,3个集群用户的响应意愿基本小于静态响应意愿0.5,而在16:00—20:00,虽然电动汽车原始的充电功率较低,但由于用户行驶需求增加,相应地,响应意愿降低。在21:00—24:00,响应意愿随着行驶需求的减少而呈增加趋势。

与场景3动态响应相比,场景1不考虑响应意愿,未考虑激励价格以及SOC对用户响应意愿的影响;而场景2静态响应意愿为0.5,对电动汽车群的响应水平估计过于保守,未能很好衡量电动汽车群作为灵活性资源的响应潜力。

以弃风惩罚和激励价格总成本为目标,获得的各电动汽车集群参与协同运行的各场景的充电功率如图8所示。以节点7的EV集群为例展示场景3考虑动态响应意愿,其充电功率的调度范围如图9所示,其他两节点EV集群充电功率调度范围趋势大致相同。场景1不考虑响应意愿或场景2静态响应意愿,电动汽车群充电功率的可调度范围较大,但是其调整充电功率呈现无序的状态,且在夜间时段安排的充电功率不符合大多数用户的充电习

惯。场景3计及动态响应意愿,在17:00,电动汽车集群的充电功率调度范围较小,符合用户夜间充电的需求,在日间,整体提升用户的充电功率、降低弃风。

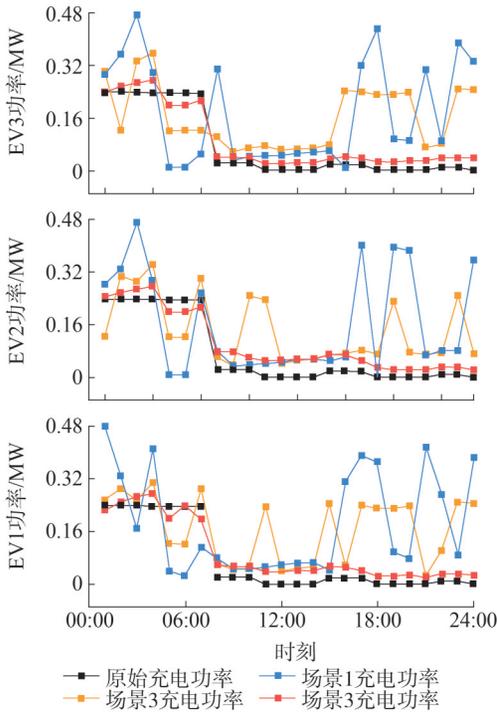


图8 各EV集群不同场景充电功率

Fig.8 Charging power for each EV cluster in different scenarios

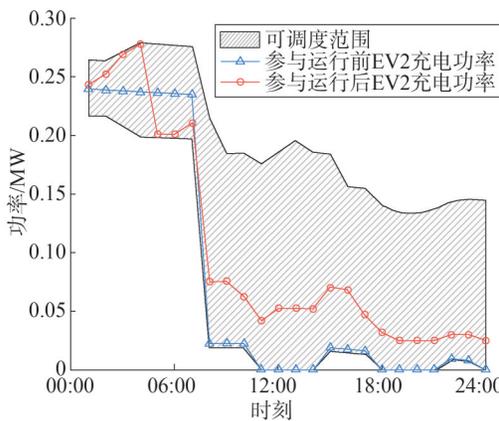


图9 场景3 EV2 充电功率及范围

Fig.9 Charging power and range of EV2 in scenario 3

3.2.2 经济性分析

系统初始弃风惩罚和电动汽车集群参与调节后三种场景的总成本对比如图10所示,由于分散式电动汽车集群参与调节后,基本实现了风电的全额消

纳,故对比电动汽车集群的激励成本。系统24 h初始弃风惩罚成本为1 870元,远高于电动汽车集群的激励总价。不考虑电动汽车集群用户响应意愿时,对电动汽车集群参与协同运行的充电功率范围估计过于乐观,集群充电功率的可调度范围较大,导致总成本高于静态响应意愿和动态响应意愿时的成本。考虑静态响应意愿时,激励总费用为1 220元,高于动态响应意愿时的激励总费用940元,这是由于静态响应意愿未充分挖掘电动汽车集群的响应潜力,导致激励费用升高。

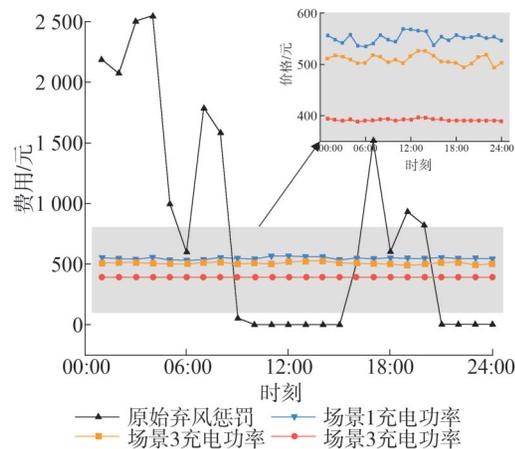


图10 考虑响应意愿前后运行费用对比

Fig.10 Comparison of the incentive price after considering response willingness

3.3 风电-抽水蓄能-电动汽车集群协同运行分析

考虑到不同配电网运行情况,针对风电与负荷时序特性呈现正/反调峰的不同状况,进行抽水蓄能与风电-EV集群协同运行效果分析。

3.3.1 反调峰条件下协同运行结果及分析

在风电-负荷呈现反调峰的情况下,抽水蓄能参与“风-储-荷”协同运行后,抽水/发电功率如图11所示,功率正值代表发电功率,功率负值代表抽水功率。在计及电动汽车集群动态响应意愿的条件下,以节点7的电动汽车集群为例,抽水蓄能参与运行前后,电动汽车集群的充电功率如图12所示。

在01:00—05:00,由于风电出力水平高,风力发电水平高于负荷,且电动汽车集群可调节功率受限于电池SOC和激励价格约束,抽水蓄能电站参与运行,该时段处于抽水蓄能状态进行水量储备。在01:00—07:00,电动汽车集群受限于较小的调节范

围,而抽水蓄能由于其灵活的调节特性,可以代替电动汽车集群进行调节。在 08:00—21:00,抽水蓄能够代替一部分电动汽车集群的调节量,09:00—15:00,风电出力下降,抽水蓄能电站放水发电,16:00—20:00,风电出力水平上升,而电动汽车集群由于出行需求,响应意愿偏低,参与调节的动力不足,导致原始负荷难以消纳。因此,优先考虑抽水蓄能电站抽水储能。21:00—24:00,随着电动汽车用户响应意愿的提高,参与系统协同运行,抽水蓄能电站放水发电以实现日内抽水蓄能调节量的平衡。

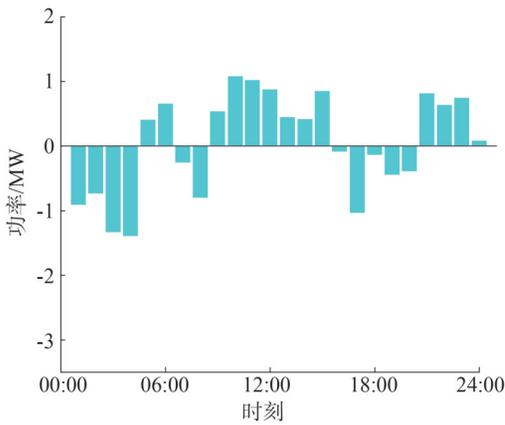


图 11 反调峰条件下抽水蓄能电站功率
Fig.11 Power of pumped storage plant under inverse peak regulation

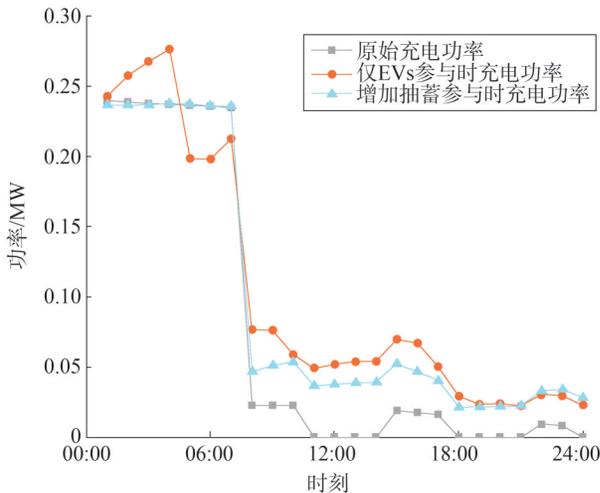


图 12 反调峰条件下节点 7EV 集群充电功率对比
Fig.12 EV cluster charging power at node 7 under inverse peak regulation

3.3.2 正调峰条件下协同运行结果及分析

在风电-负荷呈现正调峰的情况下,单台 2 MW 风机出力如图 13 所示。

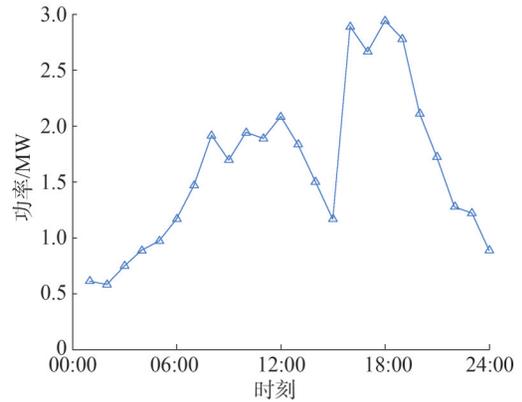


图 13 正调峰条件下单台 2 MW 风机出力
Fig.13 Power of a single 2 MW wind turbine under positive peak regulation

抽水蓄能参与“风-储-荷”协同运行后,抽水/发电功率如图 14 所示。此时,在计及电动汽车集群动态响应意愿的条件下,以节点 7 的电动汽车集群为例,抽水蓄能参与运行前后,电动汽车集群的充电功率如图 15 所示。

正调峰时,风机出力曲线趋势与负荷曲线基本吻合,仅 EV 参与调度情况下的日间充电功率相比反调峰时明显增大。在 01:00—07:00,由于夜间风电出力较小,导致无论抽水蓄能是否参与协同,EV 相比于反调峰条件下的响应度均明显下降。08:00—12:00,风电出力上升,且此时为负荷的午高峰时段,电动汽

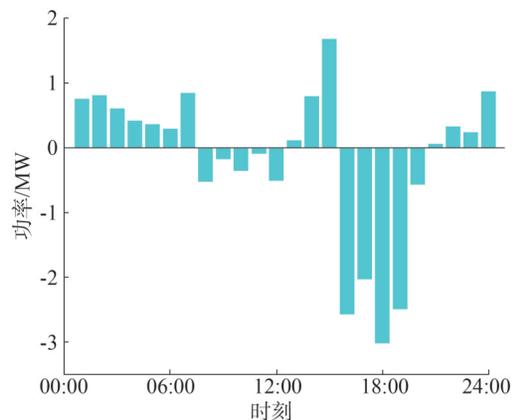


图 14 正调峰条件下抽水蓄能电站功率
Fig.14 Power of pumped storage plant under positive peak regulation

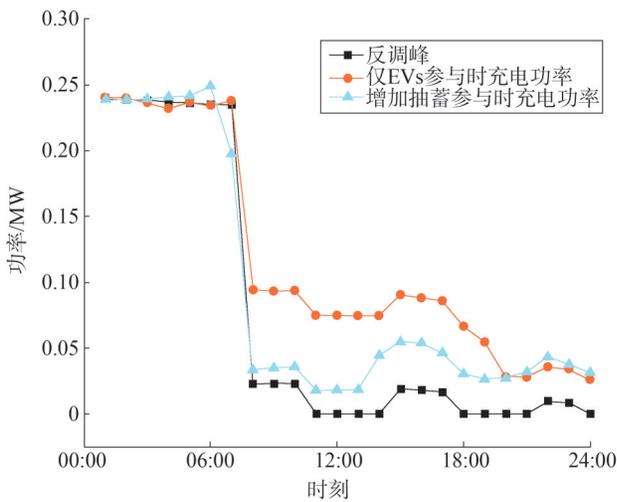


图 15 正调峰条件下7号节点电动汽车集群充电功率对比
Fig.15 EV cluster charging power at node 7 under wind-load positive peak regulation

车由于在午间行驶需求较低,相比反调峰条件下,调度更多的充电功率消纳风电;抽水蓄能处于抽水蓄能状态,配合消纳风电。13:00—15:00,风力发电水平呈下降趋势,与反调峰条件下相比,电动汽车充电功率较高;抽水蓄能机组处于放水发电状态,与电动汽车充电联合,在平衡水库库容的同时消纳风电。16:00—20:00,风电出力保持较高水平,而此时的负荷水平不高,电动汽车由于其行驶需求,充电功率呈下降趋势;抽水蓄能电站抽水蓄能,储存未能消纳的风电。21:00—24:00,风力发电水平下降,而负荷水平上升,此时电动汽车集群的调节意愿不高,抽水蓄能电站放水发电,补偿风电出力的同时进行日内调度的水量平衡。从图 15 协同运行中节点 7 电动汽车集群的充电功率可以看出,抽水蓄能代替一部分电动汽车集群的调节量,较风电-负荷反调峰情况,由于抽水蓄能灵活的调节特性,电动汽车参与调度的充电功率下降。

风电-负荷正/反调峰情况下,抽水蓄能参与运行前后电动汽车集群激励费用对比如图 16 所示。由于抽水蓄能参与协同运行代替一部分电动汽车充电功率调整量,配电网正/反调峰两种运行情况下,相比于抽水蓄能参与调节前,反调峰情况下,电动汽车集群的激励总费用为 9 400 元;正调峰情况下,电动汽车集群的激励总费用为 8 090 元。抽水蓄能参与运行后,随着电动汽车集群的调度功率被抽水蓄

能部分代替,激励总费用均有显著降低,风电-负荷呈现反调峰情况下,电动汽车集群参与调度的功率较高,激励总费用为 5 730 元;风电-负荷呈现正调峰情况下,由于风电出力趋势和负荷曲线相同,电动汽车集群参与调度的功率下降,激励总费用为 5 360 元。

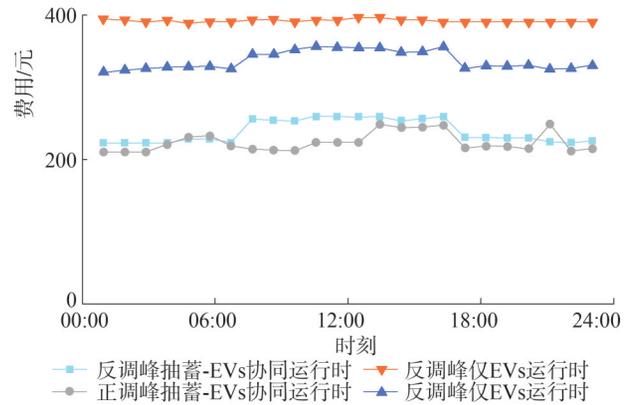


图 16 电动汽车集群激励费用对比

Fig.16 Comparison of EV cluster incentive price

4 结论

为挖掘和量化电动汽车集群在运行中的调节能力,协同提升配电系统中风电的消纳能力,文中基于 TSK 模糊化方法,构建了计及意愿不确定性的激励型电动汽车群需求响应模型,并在此基础上,提出风电-抽水蓄能-电动汽车群联合运行模型。通过算例仿真得出如下结论:

1) 计及电动汽车用户响应意愿不确定性的激励型需求响应可以明显调动用户的积极性,调整用户充电行为,有效应对风电的反调峰特性,改善局部配电网内风电的消纳情况,在日间充电功率可调节范围较大时实现风电的全消纳。

2) 在反调峰条件下,抽水蓄能出力弥补夜间电动汽车调节范围不足,在日间电动汽车出行需求较高的时段,通过抽水蓄能充电使总体激励费用降低;在日间电动汽车出行需求较低的时段,与电动汽车集群协同运行达到局部配电网内各时段风电全消纳。在正调峰条件下,仅 EV 参与调度时日间充电功率相比反调峰时增大,夜间响应度显著降低。抽水蓄能参与协同后,EV 相比于反调峰条件下大部分时段响应度明显下降,同时也具有更

低的总激励费用。

参考文献

- [1] 国家发改委,国家能源局.关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案[EB/OL].(2022-05-30)[2023-09-18].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/30/content_5693013.htm.
- [2] 边晓燕,丁杨,买坤,等.低风速分散式风电并入配电网的双层电压优化模型[J].太阳能学报,2021,42(1):157-165.
BIAN Xiaoyan, DING Yang, MAI Kun, et al. A double-layer model for distribution network voltage optimization with dispersed wind power integrated under low wind speed [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(1): 157-165.
- [3] 胥栋,叶傲霜,张少迪,等.基于电动汽车价格弹性需求响应的综合能源系统优化调度[J].电力需求侧管理,2023,25(4):73-79.
XU Dong, YE Aoshuang, ZHANG Shaodi, et al. Optimal dispatch of integrated energy system with electric vehicle demand response based on elastic price [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(4): 73-79.
- [4] 曾伟哲,曾启林,黎恒,等.基于混合粒子群优化遗传算法的多目标电动汽车充电优化策略[J/OL].南方电网技术:1-10 [2023-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20221201.1130.005.html>.
ZENG Weizhe, ZENG Qilin, LI Heng, et al. Multi-objective electric vehicle charging optimization strategy based on hybrid particle swarm optimization genetic algorithm [J/OL]. Southern Power System Technology: 1-10 [2023-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20221201.1130.005.html>.
- [5] 崔金栋,罗文达,周念成.基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4438-4450.
CUI Jindong, LUO Wenda, ZHOU Niancheng. Research on pricing model and strategy of electric vehicle charging and discharging based on multi view [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4438-4450.
- [6] 臧汉洲,叶宇剑,汤奕.基于内点策略优化的受约束电动汽车充放电策略[J/OL].电网技术:1-12 [2023-09-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1487>.
ZANG Hanzhou, YE Yujian, TANG Yi. Constrained electric vehicle charging and discharging strategy based on interior-point policy optimization [J/OL]. Power System Technology: 1-12 [2023-09-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1487>.
- [7] 刘东奇,张曦,钱奕衡,等.电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):84-93.
LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng, et al. Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 84-93.
- [8] 潘振宁,余涛,王克英.考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J].中国电机工程学报,2019,39(12):3528-3541.
PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3528-3541.
- [9] MING H, MENG J, GAO C W, et al. Efficiency improvement of decentralized incentive-based demand response: Social welfare analysis and market mechanism design [J]. Applied Energy, 2023, 331: 120317.
- [10] 郑若楠,李志浩,唐雅洁,等.考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估[J].电力系统自动化,2022,46(8):154-162.
ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, et al. Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 154-162.
- [11] 魏震波,张海涛,魏平桢,等.考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):1-10.
WEI Zhenbo, ZHANG Haitao, WEI Pingan, et al. Two-stage optimal dispatching for microgrid considering dynamic incentive-based demand response [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 1-10.
- [12] 宫鑫,苏禹,张小凤,等.计及激励型需求响应的电动汽车聚合商充电优化调度[J].现代电力,2019,36(6):16-22.
GONG Xin, SU Yu, ZHANG Xiaofeng, et al. Optimal charging scheduling for electric vehicle aggregator considering incentive demand response [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(6): 16-22.
- [13] WANG X J, WANG C J, ZHU K Y, et al. A mechanical equipment fault diagnosis model based on TSK fuzzy broad learning system [J]. Symmetry, 2022, 15(1): 83.
- [14] HUANG Z, FANG B L, DENG J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-8.
- [15] 彭春华,张金克,陈露,等.计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J].电力自动化设备,2020,40(3):1-7.
PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7.
- [16] 郑焕坤,孙耀斌,韦凯国.经多端柔性变电站互联的交直流混合配电网数据驱动分布鲁棒运行模型[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版):1-10 [2023-09-18]. <https://kns.cnki.net/kcmsz/detail/13.1212.TM.20230707.0854.002.html>. (下转第35页)

- [23] 王振宇,许静,胡文博,等.不确定性环境下园区风光储互动运行的PPO强化学习策略[J].电力需求侧管理,2022,24(5):44-50.
WANG Zhenyu, XU Jing, HU Wenbo, et al. PPO-based reinforcement learning strategy for interactive operation of wind-photovoltaic-storage in an uncertain environment[J].Power Demand Side Management,2022,24(5):44-50
- [24] 孙黎霞,白景涛,周照宇,等.基于双向长短期记忆网络的电力系统暂态稳定评估[J].电力系统自动化,2020,44(13):64-72.
SUN Lixia, BAI Jingtao, ZHOU Zhaoyu, et al. Transient stability assessment of power system based on bidirectional Long-short-term memory network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44 (13):64-72
- [25] 潮铸,段秦尉,钱峰,等.基于深度分布式强化学习的电力系统分散协调调度方法[J].电子器件,2022,45(4):947-953.
CHAO Zhu, DUAN Qinwei, QIAN Feng, et al. Decentralized coordinated dispatching method for power system based on deep distributed reinforcement learning[J].Chinese Journal of Electrom Devices,2022,45 (4):947-953.
- [26] 严梓铭,徐岩.结合深度强化学习与领域知识的电力系统拓扑结构优化[J].电力系统自动化,2022,46(1):60-68.
YAN Ziming, XU Yan. Topology optimization of power systems combining deep reinforcement learning and domain knowledge [J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46 (1):60-68.
-
- 收稿日期:2023-04-12
修回日期:2023-10-16
作者简介:
李子凯(1990),男,工程师,从事电力系统优化、AI技术在电力系统的应用研究;
杨波(1970),男,高级工程师,从事电力系统自动化技术、微电网技术研究;
周忠堂(1980),男,经济师,从事电力大数据分析、新能源并网运行研究;
张健(1968),男,硕士,正高级经济师,从事AI技术在电力系统的应用研究;
徐明珠(1976),男,高级工程师,从事微电网与主电网协同优化运行和保护控制研究。
- (责任编辑 姜婷婷)

(上接第11页)

- ZHENG Huankun, SUN Yaobin, WEI Kaiguo. Robust optimization and operation of hybrid AC/DC distribution grid interconnected by multiple flexible substations [J / OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-10 [2023-09-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20230707.0854.002.html>.
- [17] 刘练,马小龙,潘万宝,等.基于精英策略布谷鸟算法的主动配电网经济优化调度[J].山东电力技术,2023,50(5):14-20.
LIU Lian, MA Xiaolong, PAN Wanbao, et al. Economic optimal dispatch of active distribution network based on elite strategy cuckoo algorithm [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50 (5) : 14-20.
- [18] 鹿优,鹿存鹏,徐伟,等.含抽水蓄能电站的多能互补微网系统设计与研究[J].山东电力技术,2023,50(5):34-40.
LU You, LU Cunpeng, XU Wei, et al. Design and research of multi-energy complementary microgrid system with pumped storage power station [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50 (5) : 34-40.
- [19] 郭秉涛,谢宝昌,蔡旭.基于人工神经网络的海上风场双馈风机功率分配优化策略[J].电气自动化,2020,42(3):34-37.
GUO Bingtao, XIE Baochang, CAI Xu. Power distribution optimization strategy for offshore wind power plant DFIG based on artificial neural network [J]. Electrical Automation, 2020, 42 (3) : 34-37.
- [20] 孙辉,沈钟浩,周玮,等.电动汽车群响应的主动配电网阻塞调度研究[J].中国电机工程学报,2017,37(19):5549-5559.
SUN Hui, SHEN Zhonghao, ZHOU Wei, et al. Congestion dispatch research of active distribution network with electric vehicle group response [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (19) : 5549-5559.
-
- 收稿日期:2023-09-20
修回日期:2023-11-06
作者简介:
江建(1973),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力企业经营管理、电网规划建设、人力资源、安全生产等领域;
张树森(1982),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网调控、生产经营、安全生产等领域;
徐峰亮(1977),男,高级工程师,主要研究方向为电力企业安全生产、信息通信、科技创新、储能、微电网等领域。
- (责任编辑 车永强)