

考虑替代效应的电动汽车负荷参与调频辅助 服务市场出清方式

崔 杨¹,周飞杰¹,赵钰婷¹,刘新元²,韩传鼎³

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;
2. 国网山西省电力公司电力科学研究院,山西 太原 030001;3. 中国南方电网超高压输电公司,广东 广州 510000)

摘要:在新能源并网比例不断提高的背景下,按需扩大调频辅助服务提供主体,引入负荷侧资源提供高性能调频服务,并逐步使市场竞争多元化是市场化探索调频辅助服务机制的重要趋势。为此,分析了当前出清方式与补偿机制下电动汽车(EV)参与调频辅助服务市场的市场竞争力,并提出了考虑替代效应的调频资源报价修正方式。分别建立了调频辅助服务市场与电能量市场顺次出清及联合出清模型;分析了EV的出行数据,根据当前电池售价形成基于电池损耗成本的补偿价格响应模型;结合联合出清模型及补偿价格响应模型计算EV以当前价格排序及考虑快速调频资源替代效应后的价格排序参与调频辅助服务市场的利用率。算例仿真结果表明,当前的补偿价格不能很好地调动EV参与调频辅助服务市场的积极性,需要合理改善价格排序方式,而考虑替代效应的价格排序方式能提高EV的中标率,同时减少调频辅助服务市场的支出。

关键词:电动汽车;调频辅助服务;电力市场;出清方式;快速调频资源;替代效应;联合出清

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202018

0 引言

新能源渗透率不断提高是当前电网结构最显著的变化特征之一,随之而来的是更加频繁且剧烈的净负荷波动,给电网频率稳定带来了新的挑战。为了应对不断扩大的调频需求,我国从“9号文”出台后开启了市场化探索调频辅助服务的新阶段。

建设调频辅助服务市场是我国电力市场化改革中的重要组成部分,对于降低电力供应成本、理顺价格形成机制具有重要意义^[1]。与澳大利亚、美国等国相比,我国电力市场化改革起步较晚,亟需对运营实践进行总结并提出后续的改进方向。相关学者对此进行了研究:文献[2]梳理了美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰州联合电力系统(PJM)、加利福尼亚州独立系统运营商(CAISO)、美国德克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)的调频辅助服务市场定价机制,提出了不同市场阶段下调频辅助服务的可行建议;文献[3]总结山西省调频辅助服务市场的运营实践经验得出,山西省调频辅助服务市场的准入主体种类单一,竞争同质化问题开始显现,仅有火电与储能被允许参与辅助服务市场,对机组调频性能改造的积极性不高,与我国市场化改革的目标不符,需要扩大调频辅助服务的参与主体。与此同时,我国出台的相关政策文件也正在倡导“按需扩大电力辅助

服务提供主体”。而需求侧的可调度资源如空调、电采暖以及电动汽车EV(Electric Vehicle)等可控负荷参与调频辅助服务市场的具体形式仍有待研究。

EV作为解决能源枯竭、实现节能减排的重要方式^[4],正在全球范围内得到大力推广。截至2020年,我国EV保有量达到414万辆。已有研究表明,双向EV充电器^[5]及EV内部的电力电子设备^[6]能够通过充放电很好地响应电网的频率偏差。基于数据库的EV充电监管系统^[7]及充电桩的远程控制^[8]取得的成果也为EV参与调频辅助服务市场提供了技术支撑。EV参与调频从本质上而言是电池储能参与调频。与传统的火电调频机组相比,EV参与调频具有响应速度更快、调节精度更高、频率跟随性更好等优势^[9];与新建火储调频电站相比,EV参与调频具有接入地点灵活、投资成本低等优势。如果补偿得当,则能够实现电网与EV用户的双赢,并进一步促进EV的推广。

目前,已有较多关于EV参与电力系统辅助服务市场的研究:文献[10]提出了在EV大量普及后可以形成电动汽车聚合商(EVA)与传统发电厂共同参与电力系统调控,并指出可以在竞价上优先对待EVA;文献[11]提出了一种时滞环境下应用EV和电热泵协同参与系统负荷频率控制的调控策略;文献[12]建立了基于电动汽车入网(V2G)技术提供辅助服务的2层配电网最优经济调度模型。但上述研究大多从策略角度入手,所提高补偿费用并未考虑实际电网的运营规范,不符合现行市场细则,而从实际电网的运行细则及运行数据入手研究EV参与调频辅

收稿日期:2021-08-04;修回日期:2021-12-23

在线出版日期:2022-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777027)

助服务市场具体形式的文献尚鲜有报道。

在出清方式上,我国大多数省份目前仍实行辅助服务市场与电能市场顺次出清^[3,13],在结算中需要补偿机组的机会成本,而这增加了调频支出。研究调频辅助服务市场与电能市场联合出清有助于减少总调度支出,文献[14]提出了一种区域电网下能量与备用服务联合出清模型,为探索辅助服务市场与电能市场联合出清提供了参考。在此基础上,本文梳理了顺次出清、联合出清2种方式的具体运行步骤,对其成本构成进行分析,量化了所减少的购电成本。

本文以我国某电网现行调频辅助服务市场细则为依据,给出了含EV参与的调频辅助服务市场与电能市场联合出清模型,考虑EV电池充放电成本,对现行补偿价格下EV参与调频辅助服务的可行性进行分析,提出了考虑快速调频资源替代效应的报价修正方式,并基于IEEE 39节点系统对所提方案的有效性进行了验证。

1 EV聚合及补偿价格响应模型构建

1.1 含EV参与的日前调频辅助服务市场组织流程

EV具有自身容量小、调节效果差等特点,通常通过聚合形成EVA的形式参与电网调节。EV用户将自身车辆状态以及可以接受的充放电价格上传给EVA;EVA经过聚合后得到实时可调节容量,以报价、报量的形式参与调频辅助服务等电力市场;电网调控中心综合考虑各参与方的报价、历史性能等参数进行排序,由低到高购买辅助服务直至满足各时段需求。EVA参与电力市场的组织流程如图1所示。图中: M 为EVA聚合的EV数量。

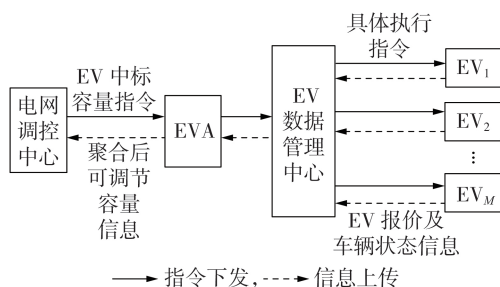


图1 EVA参与电力市场的组织流程

Fig.1 Organization process of EVA participating in electricity market

本文以山西省电力辅助服务市场实施细则为依据,给出了如下含EV参与的日前调频辅助服务市场的实施流程:

1)竞价日09:00前,电网调控中心公布次日可参与调频辅助服务市场的主体、次日调频辅助服务市场需求、负荷预测曲线(以15 min为时间间隔,将1 d分为96个时段);

2)竞价日09:00—09:30各参与方进行报价,现行市场规定报价上、下限分别为10、5元/MW,报价可选择的最小单位为0.1元/MW,EVA采取适当报价策略参与此阶段的报价;

3)竞价日09:30—10:00进行日前市场出清,结合市场需求、各方申报数据及历史调频性能等,以调频辅助服务购买成本最小为目标得到各机组的中标容量及调频容量收益,其中调频容量价格无需申报,统一取为10元/(MW·h)。

1.2 基于实际出行数据的EV聚合

EV出行数据主要包括离网时刻、入网时刻以及日行驶里程。

1.2.1 离网时刻分布

美国联邦交通管理局FHWA(Federal Highway Administration)统计的数据显示,EV第一次出行时刻(即离网时刻 T^{leave})大致符合式(1)所示正态分布。

$$f_1(T^{\text{leave}}) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(T^{\text{leave}} - \mu_1)]^2}{2\sigma_1^2}} \quad (1)$$

式中: $f_1(T^{\text{leave}})$ 为离网时刻的概率密度函数; μ_1 、 σ_1 分别为均值、标准差,取值分别为8.92、3.24。

1.2.2 入网时刻分布

为了简化分析,本文假设EV用户在回家后即将EV接入电网,并根据文献[15]所得结论,认为EV最后一次出行结束时刻(即入网时刻 T^{in})满足式(2)所示的对数正态分布。

$$f_2(T^{\text{in}}) = \frac{1}{(T^{\text{in}} - \mu_2) \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(T^{\text{in}} - \mu_2)]^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2)$$

式中: $f_2(T^{\text{in}})$ 为入网时刻的概率密度函数; μ_2 、 σ_2 分别为均值、标准差,取值分别为17、1。

1.2.3 日行驶里程分布

日行驶里程数据取自我国某地EV的实际行驶数据,其分布见附录A图A1。本文认为日行驶里程 l 在各分段内服从均匀分布,绘制其累积分布函数 $f(l)$ (表达式如式(3)所示),并对累积分布函数的反函数进行拟合,拟合结果见附录A图A2。

$$f(l) = \sum_{i=1}^9 p_i l^{9-i} \quad (3)$$

式中: p_i 为拟合参数,具体取值见附录A表A1。

1.2.4 EV负荷的聚合

本文选用比亚迪e6型纯EV为研究对象,该型号EV电池容量约为80 kW·h,每行驶100 km的耗电量约为19.5 kW·h。现有充电桩包含8 h慢充及1.5 h快充2种充电模式,为了简化分析,本文假设EV用户从第一次离网出发后直至最后一次行程结束才会再一次接入电网接受调度,即认为在用户办公期间EV不接入电网,可调度时段主要在夜间。由于快充充电桩的普及率低,可认为EV用户在家中均

采用慢充模式与电网进行功率交换。采用蒙特卡罗方法对上述离网时刻、入网时刻、日行驶里程分布进行模拟,得到2000辆EV的出行数据。结合日行驶里程耗电量、离网时刻、出行前荷电状态(SOC)约束,根据式(4)计算EV退出调频辅助服务市场的时刻。

$$T_m^{\text{reg, off}} = T_m^{\text{leave}} - 19.5D_m / 1\ 000 \quad (4)$$

式中: $T_m^{\text{reg, off}}$ 为EV退出调频辅助服务市场的时刻; T_m^{leave} 为蒙特卡罗方法生成的EV的离网时刻; D_m 为蒙特卡罗方法生成的EV的日行驶里程。同时假设EVA在1 d内提供调频辅助服务的上调频容量与下调频容量大致相等,则每一辆入网的EV均可提供10 kW的调频容量,对2000辆EV的调频容量进行聚合后得到可调节容量分布如附录A图A3所示。

1.3 基于充放电成本的补偿价格响应模型

比亚迪e6型纯EV搭载的磷酸铁锂电池为锂电池的一种,本文假设电池购置成本为80 000元,未来该成本有望低廉化。按照比亚迪官方公布的电池测试数据,该电池在进行了10 000次充放电后的容量下降为初始容量的70%,但仍能继续使用,同时结合文献[16]得到的电池循环寿命与放电深度之间的关系,本文所提以成本为基础的报价确定方法如下。

1) 确定各时段EV参与调频辅助服务的充放电功率(EV调频出力) P_i^{EV} 。

2) 设定参与调频辅助服务的调频里程-调频容量比 n 。

3) 基于电池在该调频容量下的调频里程-调频容量比 n 及电池购置成本,根据式(5)确定各时段EV用户提供单位调频容量造成的电池寿命损失成本 $C_{\text{loss}}^{\text{EV}}$ 。

$$C_{\text{loss}}^{\text{EV}} = nC_{\text{buy}}^{\text{EV}} / (N_L L_{\text{DoD}}) \quad (5)$$

式中: $C_{\text{buy}}^{\text{EV}}$ 为EV电池购置成本; L_{DoD} 为提供调频辅助服务时EV的充放电深度,即单位时段内充放电功率 P_i^{EV} 下充放电电量占EV电池容量的比值; N_L 为充放电深度 L_{DoD} 下的电池循环次数。

t 时段EV充放电功率 P_i^{EV} 应满足如下约束:

$$0 \leq P_i^{\text{EV}} \leq \frac{Q_{\text{EV}}}{0.25} \times \min \{0.9 - S_{\text{SOC}, t-1}, S_{\text{SOC}, t-1} - 0.1\} \quad (6)$$

$t = 2, 3, \dots, 96$

式中: $S_{\text{SOC}, t-1}$ 、 $S_{\text{SOC}, t}$ 分别为 $t-1$ 、 t 时段EV电池的荷电状态; Q_{EV} 为EV电池容量。

4) 结合辅助服务市场实施细则中规定的容量补偿及里程补偿机制确定以成本为基础的报价,并将其记为基准补偿价格 W ,如式(7)所示。

$$W = (C_{\text{loss}}^{\text{EV}} - C^{\text{cap}}) / (nK_f) \quad (7)$$

式中: C^{cap} 为市场机制下的容量补偿; K_f 为EV电池的综合调频性能指标。

对于不同补偿价格下的EV响应情况:假设当补偿价格达到1.2W时,开始有EV用户参与调频辅助服务市场;当补偿价格达到2W时,几乎所有EV用户

参与调频辅助服务市场;当补偿价格位于(1.2W, 2W)范围内时,参与辅助服务市场的EV用户数量采用线性函数表示。上述构建思路参考不同激励水平下的激励型需求响应^[17]。

2 调频辅助服务市场的出清方案

2.1 调频辅助服务市场与电能量市场顺次出清

2.1.1 调频辅助市场的出清方案

以山西省调频辅助服务市场流程为例,调频容量价格统一规定为10元/(MW·h),各参与主体需要在日前申报各时段的调频容量 $P_{i,t}^{\text{offer}}$ 及调频里程价格 $C_{i,t}^{\text{mil}}$,电网调控中心参考各参与主体的历史调频性能归一化指标 λ_i 对报价数据进行修正,如式(8)所示。在非联合出清模式下,需计算机组因提供调频辅助服务偏离经济运行点而造成的经济损失(即机会成本),如式(9)所示。

$$C_{i,t}^{\text{a, mil}} = C_{i,t}^{\text{mil}} / \lambda_i \quad (8)$$

$$C_{i,t}^{\text{opp}} = \int_{T_s}^{T_e} P_i^{\text{cap}} (W^{\text{chqing}} - W_i^{\text{cost}}) dt \quad (9)$$

式中: $C_{i,t}^{\text{a, mil}}$ 为 t 时段机组 i 调整后的调频里程报价; λ_i 为机组 i 的归一化综合调频性能指标; $C_{i,t}^{\text{opp}}$ 为 t 时段机组 i 的机会成本; W^{chqing} 为出清电价; W_i^{cost} 为机组 i 的单位容量运行成本; P_i^{cap} 为机组 i 的中标容量; T_s 、 T_e 分别为辅助服务开始、结束时段。

考虑价格、调频效果对修正后的报价进行重新排序得到新的报价曲线,在满足系统调频容量需求及调频里程需求的前提下,以调频辅助服务总支出最小为目标函数,如式(10)所示。需满足的约束条件如式(11)~(13)所示。

$$\min W^{\text{reg}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{i,t}^{\text{a, cap}} + nC_{i,t}^{\text{a, mil}} + C_{i,t}^{\text{opp}}) P_{i,t}^{\text{cap}} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{cap}} \leq P_{i,t}^{\text{cap, max}} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{cap}} \geq P_t^{\text{cap, demand}} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N nP_{i,t}^{\text{cap}} \geq P_t^{\text{mil, demand}} \quad (13)$$

式中: W^{reg} 为调频辅助服务总支出; $C_{i,t}^{\text{a, cap}}$ 为 t 时段机组 i 经修正后的调频容量报价; $P_{i,t}^{\text{cap}}$ 为 t 时段机组 i 的中标容量; $P_{i,t}^{\text{cap, max}}$ 为 t 时段机组 i 可中标容量上限,辅助服务市场实施细则中规定其为装机容量的20%; $P_t^{\text{cap, demand}}$ 、 $P_t^{\text{mil, demand}}$ 分别为 t 时段系统的调频容量需求、调频里程需求; T 为时段总数; N 为系统机组总数。

机组在调频辅助服务市场的收益分为调频容量收益、调频里程收益两部分,日前市场均只执行预出清,而在实时市场按照实际贡献进行正式出清,其中考虑机组 i 综合调频性能指标 K_i 的总收益为:

$$L_i^{\text{reg}} = \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^{\text{d, mil}} P_{i,t}^{\text{cap}} nK_i + C_{i,t}^{\text{cap}} P_{i,t}^{\text{cap}}) \quad (14)$$

式中: L_i^{reg} 为机组 i 在调频辅助服务市场的总收益; $C_i^{\text{d,mil}}$ 为 t 时段调频里程的出清价格。

对于 EV 调频出力 P_t^{EV} , 其除了需满足式(6)所示约束外, 还需满足不同补偿价格下的响应上限约束:

$$0 \leq P_t^{\text{EV}} \leq \left(\frac{5W'}{4W} - \frac{3}{2} \right) P_{\max}^{\text{EV}} \quad (15)$$

式中: W' 为实际补偿价格; $P_{\max}^{\text{EV}}$ 为 EV 集群可调度容量上限。

2.1.2 现货电能量市场的出清方案

在日前, 首先通过机组组合优化目标函数式(16)确定次日的机组开机方式; 然后, 进行日前经济预调度, 为调频辅助服务市场确定节点电价; 最后, 进行调频辅助服务市场日前出清, 确定次日提供调频服务的机组及其出力, 各机组在各自剩余容量下进行次日经济调度以确定电能量市场的边际价格。

$$\min F = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (F_{i,t}(P_{i,t}) + F_{i,t}^{\text{U}}) \quad (16)$$

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = \sum_{k=1}^K C_{i,k,t}^{\text{energy}} P_{i,k,t} \quad (17)$$

$$F_{i,t}^{\text{U}} = |y_{i,t}| U_i \quad (18)$$

$$y_{i,t} = x_{i,t} - x_{i,t-1} \quad (19)$$

式中: F 为调度成本; $F_{i,t}(P_{i,t})$ 为 t 时段机组 i 的运行成本; $F_{i,t}^{\text{U}}$ 为 t 时段机组 i 的启停机成本; $C_{i,k,t}^{\text{energy}}$ 为 t 时段机组 i 申报的第 k 段出力的电价; $P_{i,k,t}$ 为 t 时段机组 i 在第 k 段出力下的中标容量; K 为机组申报出力的分段数; $y_{i,t}$ 为 t 时段机组 i 的状态变量; U_i 为机组 i 的单次启停机成本; $x_{i,t}$ 为 t 时段机组 i 的开停机状态变量, 处于开机状态时取值为 1, 处于停机状态时取值为 0。

需满足的约束条件如下。

各段出力下的中标容量 $P_{i,k,t}$ 不得超过该段出力上限 $P_{i,k,t}^{\max}$, 即满足:

$$P_{i,k,t} \leq P_{i,k,t}^{\max} \quad (20)$$

机组各段出力下的中标容量总和如式(21)所示, 其不能超过机组出力上限, 即满足式(22); 且满足式(23)所示功率平衡约束。

$$P_{i,t} = \sum_{k=1}^K P_{i,k,t} \quad (21)$$

$$x_{i,t} P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq x_{i,t} P_{i,t}^{\max} \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = P_t^{\text{demand}} \quad (23)$$

式中: $P_{i,t}$ 为 t 时段机组 i 各段出力下的中标容量之和; P_t^{demand} 为 t 时段的负荷用电量需求; $P_{i,t}^{\min}$ 、 $P_{i,t}^{\max}$ 分别为 t 时段机组 i 的最小、最大技术出力。

机组爬坡约束如式(24)所示, 假设下爬坡与上爬坡功率相等, 均为 $R_{\text{up},i}$

$$|P_{i,t+1} - P_{i,t}| \leq R_{\text{up},i} \quad (24)$$

机组最小启停机时间约束为:

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{open}}-1} (1 - x_{i,\tau}) \geq T_{\text{off},\min}^i (x_{i,t-1} - x_{i,t}) \quad (25)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{down}}-1} x_{i,\tau} \geq T_{\text{on},\min}^i (x_{i,t} - x_{i,t-1}) \quad (26)$$

式中: $T_{\text{off},\min}^i$ 、 $T_{\text{on},\min}^i$ 分别为机组 i 的最小停机时间、最小开机时间; T_{open} 、 T_{down} 分别为距离 t 时段最近的开机、停机决策发生时刻。

传输线路容量约束为:

$$-P_{gh}^{\max} \leq P_{gh,t} \leq P_{gh}^{\max} \quad (27)$$

$$P_{gh,t} = (\delta_{g,t} - \delta_{h,t}) / x_{gh} \quad (28)$$

式中: $P_{gh,t}$ 为 t 时段线路 gh 的传输功率, 可由简化后的直流潮流计算得到, $P_{gh}^{\max}$ 为其最大值; $\delta_{g,t}$ 、 $\delta_{h,t}$ 分别为 t 时段节点 g 、 h 的电压相角; x_{gh} 为线路 gh 的电抗。

2.2 调频辅助服务市场与电能量市场的联合出清方案

联合出清方式下以电能量市场的购置成本与调频辅助服务市场的购置成本之和 F' 最小为目标函数确定机组开机计划以及承担调频辅助服务的机组, 如式(29)所示。

$$\min F' = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [F_{i,t}(P_{i,t}) + (C_{i,t}^{\text{a,cap}} + n C_{i,t}^{\text{a,mil}}) P_{i,t}^{\text{cap}} + F_{i,t}^{\text{U}}] \quad (29)$$

求解目标函数式(29)后机组组合中最后 1 台机组的报价即为出清电价。约束条件除了需满足式(12)、(13)、(20)、(22)——(27)外, 还需满足电能量市场出力与调频辅助服务市场出力协调情况下调频容量约束, 如式(30)所示。

$$P_{i,t}^{\text{cap}} \leq \min \{ P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}, P_{i,t} - P_{i,t}^{\min} \} \quad (30)$$

3 快速调频资源的替代效应

3.1 当前调频辅助服务市场的价格排序方式

目前, 我国调频辅助服务市场采取的报价修正指标包括调节速率、调节精度及响应时间, 计算式分别为:

$$K_1^{i,j} = v_{i,j} / v_{N,i} \quad (31)$$

$$K_2^{i,j} = 2 - \Delta P_{i,j} / \Delta P_{i,j}^{\text{D}} \quad (32)$$

$$K_3^{i,j} = 2 - t_{i,j} / t_N \quad (33)$$

式中: $K_1^{i,j}$ 、 $K_2^{i,j}$ 、 $K_3^{i,j}$ 分别为机组 i 在选择运行日内提供第 j 次调频时的调节速率、调节精度、响应时间指标, 选取最近一个运行日(向前排查不超过 15 d)的数据进行计算; $v_{i,j}$ 为机组 i 在选择运行日内提供第 j 次调频时的速率; $v_{N,i}$ 为机组 i 的标准调节速率; $\Delta P_{i,j}$ 、 $\Delta P_{i,j}^{\text{D}}$ 分别为机组 i 在选择运行日内第 j 次调频时的实际响应功率、调节指令需求响应量; $t_{i,j}$ 为机组 i 在选择运行日内第 j 次调频时的调节时间; t_N 为标准调节时间。

计算所有调频资源供应商提供辅助服务时的上述 3 种指标, 以修正各资源的报价并用于结算。为了不同的资源具有可比性, 需要对 3 个指标进行

归一化处理,得到各调频资源归一化后的综合调频性能指标,如式(34)所示。

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & K_i \geq K_{\text{saturation}} \\ 0.5 + \frac{0.5(K_i - K_{\min})}{K_{\text{saturation}} - K_{\min}} & K_{\min} \leq K_i \leq K_{\text{saturation}} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $K_{\min}$ 为市场最小准入指标,本文中取值为1; $K_{\text{saturation}}$ 为设定的最高性能指标值,本文中取值为4。最后,基于式(8)决定考虑机组综合调频性能指标的价格排序。

3.2 考虑替代效应的EV价格排序方式

虽然目前我国调频辅助服务市场的价格排序方式已为调节速度快、调节性能高的调频资源提供了更易中标的政策环境,但仍缺少对快速调频资源的合理补偿。

美国PJM市场发展较早,机制也比较完善,其针对调频辅助服务市场设定了常规调频信号(RegA)与快速调频信号(RegD),分别采购用于常规调频的火电机组资源与调频速度较快的储能及需求侧快速调频资源。研究表明:在自动发电控制评价指标CPS(Control Performance Standard)下,在达到相同的调频效果条件下,快速调频资源参与调节时能够产生不同于传统调频资源的效果,被称为效益因子(benefit factor),本文将之称为替代效应。具体计算过程为:在仿真软件中对系统进行建模以观测频率响应,得出达到相同调频效果时快速调频资源与传统调频资源所占比例,具体的调频效果取决于快速调频资源所占比例^[18]。当前调频辅助服务市场仅包含传统调频机组,EV负荷的引入必然会显著减少系统总调频容量的购买量。本文提出采用替代指标修正当前价格排序方式下的报价,从而得到考虑替代效应的价格排序,如式(35)所示。

$$C_{i,t}^{\text{a,mil}^*} = C_{i,t}^{\text{mil}} / (K^{\text{replace}} \lambda_i) \quad (35)$$

式中: $C_{i,t}^{\text{a,mil}^*}$ 为计及替代效应后的修正里程报价; K^{replace} 为替代效应指标,具体取值见附录A表A2。

引入式(34)能够在原有报价顺序的基础上,进一步计及替代效应进行再排序,这样能够使调频能力强的快速调频资源(如EV、储能等)在价格修正后更具有竞争力,使市场规则更能体现对不同调节能力调频资源的“优胜劣汰”。

3.3 求解流程

本文选用商用优化软件CPLEX对含EV参与的不同出清方案下的市场模型进行求解,分析EV的具体调度结果。

4 算例分析

4.1 基础参数介绍及场景构建

本文采用改进的IEEE 39节点系统计算EV参与调频辅助服务可能获得的收益及其降低电网购电

成本的潜力。IEEE 39节点系统的拓扑结构取自文献[19],为了模拟实际数据所在地区的风电渗透率,在节点9、19分别接入300 MW风电场,机组运行参数见附录A表A3,申报信息见附录A表A4,改进系统的拓扑结构见附录A图A4。改进系统的总装机容量为2262 MW,机组启停机成本的最小值、最大值分别为210、35000元。

现货电能量市场采取分段报价方式,设定分段数量为3,综合报价曲线见图2。预测负荷采用山西省某地区2019年某日实际运行负荷数据,负荷曲线见附录A图A5,负荷峰值为1327.02 MW。风电场的预测数据采用该地区风电场的实际运行数据,出力曲线见附录A图A6。参考文献[20]确定日前市场所需调频容量,求得本文所需96个时段的调频容量需求见附录A图A7。假设该地区共有2000辆EV形成EVA。

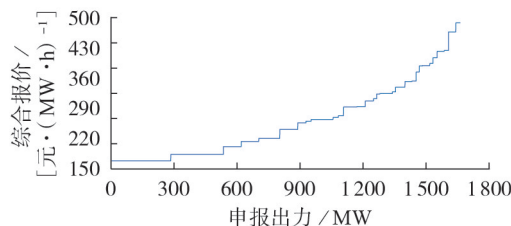


图2 综合报价曲线图

Fig.2 Comprehensive quotation curve

根据辅助服务市场与电能量市场的出清方案以及调用EV负荷的价格排序方式设定以下4种场景。需要说明的是,山西省电力辅助服务市场实施细则规定在市场建设初期不允许1台机组同时参与任意辅助服务市场与电能量市场,本文假设已度过初期阶段,即允许机组同时参与2个市场。场景1为调频辅助服务市场与电能量市场顺次出清(基础场景);场景2为调频辅助服务市场与电能量市场联合出清;场景3为调频辅助服务市场与电能量市场联合出清,同时以当前价格排序方式调用EV参与调频辅助服务;场景4为调频辅助服务市场与电能量市场联合出清,同时以计及EV作为快速调频资源替代效应的价格排序方式调用EV参与调频辅助服务。

4.2 算例结果及分析

各场景下的购电成本如表1所示。

表1 各场景下的购电成本

Table 1 Electricity purchase cost of each scenario

场景	电能量市场 购电成本 / 元	调频辅助服务市场 购电成本 / 元	总成本 / 元
1	4066930.60	758476.69	4825407.29
2	4066990.30	201880.00	4268870.30
3	4067251.26	201370.00	4268621.26
4	4067012.70	188680.00	4255692.70

4.2.1 基础场景分析

场景1是对我国当前已开启的大多数调频辅助服务市场的模拟。先执行一次日前机组组合得到各机组的经济运行点,出清电价与净负荷如图3所示。由图可以看出,电能量市场的出清电价与净负荷的变化情况基本一致。得到出清电价之后,计算机组在提供调频辅助服务时需要补偿的机会成本,最终得到调频辅助服务市场和电能量市场中各机组的中标容量见附录A图A8。由附录A表A4中修正后各机组报价与图A8(a)所示调频辅助服务市场中各机组实际中标容量可以发现, G_1 作为一台报价与性能均比较好的机组,其在所有时段均未中标,这是因为其发电成本参数 b 较小,使得在同一时段相同出清电价情况下调用其需要更加高昂的机会成本,综合考虑调频性能与机会成本后, G_1 无法中标。

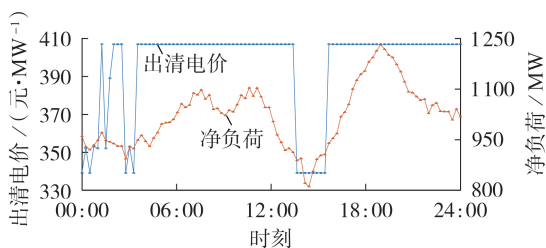


图3 电能量市场的出清电价与净负荷

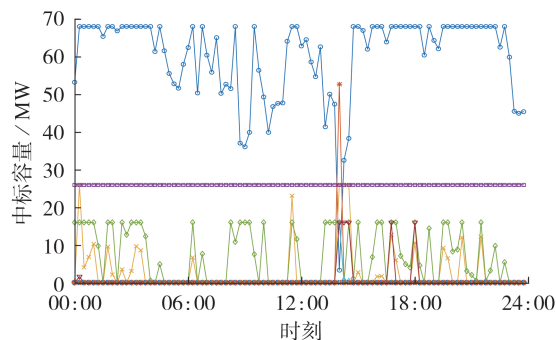
Fig.3 Clearing price and net load of electricity energy market

4.2.2 场景2分析

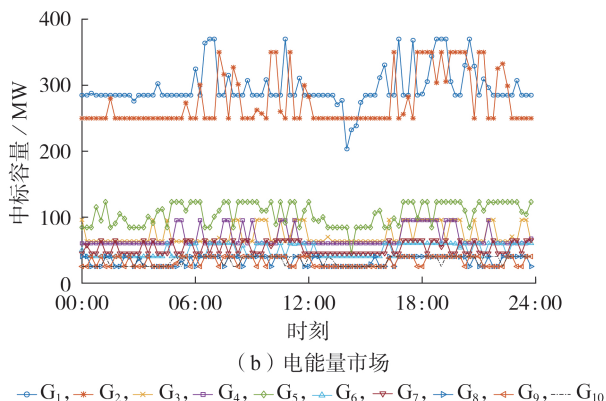
场景2是电力市场化进行到一定的阶段、市场成员具有较高的市场意识之后必然会采取的出清方案,山西省电力辅助服务市场实施细则中亦有如此规划。本文设置场景2以量化区域级电网采取调频辅助服务市场与电能量市场联合出清方案后能减少的购电成本,场景2的出清结果见图4。由图可看出,调频辅助服务市场与电能量市场联合出清后,基本基于各机组的容量报价及其性能决定承担调频任务的机组。由于机组 G_2 、 G_8 — G_{10} 考虑综合性能修正后的调频容量报价过高而无法被调用参与调频辅助服务市场。联合出清后由于不需要补偿机组的机会成本,其综合购电成本相比场景1降低了11.5%。

4.2.3 场景3分析

场景3考虑EV参与调频辅助服务报价并与电能量市场联合出清。本文认为EV参与调频辅助服务市场时的调频里程-容量比 n 的值也为10,EV参与调频辅助服务的综合调频性能指标归一化数值为1,则可以计算得到慢充方式下补偿电池损耗的EV基准补偿价格 $W=5.660$ 元/MW。结合前文的假设分析可知,在不计及用户响应不确定性的情况下,当补偿价格达到 $1.2W$,即 6.792 元/MW时,开始有EV用户响应调频辅助服务市场;当补偿价格达到 $2W$,



(a) 调频辅助服务市场



(b) 电能量市场

图4 场景2下调频辅助服务市场、电能量市场中各机组的中标容量

Fig.4 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market and electricity energy market under Scenario 2

即 11.320 元/MW时,几乎全部EV用户响应调频辅助服务市场且其间满足线性变化关系。定义EV参与调频辅助服务市场的容量与可调度容量之比为EV调频容量利用率,可得到不同补偿价格下EV调频容量利用率如图5所示。

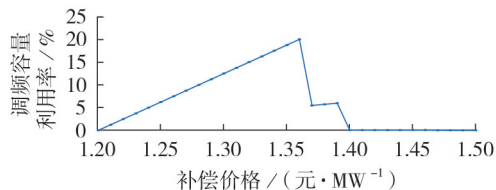


图5 EV调频容量利用率随补偿价格的变化曲线

Fig.5 Change curve of EV frequency regulation capacity utilization rate vs. compensation price

由图5可以看出,当市场机制对参与其中的EV使用与火电机组相同的出清规则时,EV并没有太大的优势。具体地,当补偿价格在 $1.2W$ ~ $1.35W$ 范围内时,由于补偿价格较低,与火电机组相比,EV有报价上的优势,故随着补偿价格的增大,用户响应度(即可调度EV容量)增大且这部分廉价容量均会被优先调用,EV调频容量利用率呈现恒定斜率的上升趋势;当补偿价格超过 $1.35W$ 后,出现了调频容量利用

率大幅度下降的情况,主要是因为此时的补偿价格已经超过了一部分火电机组的报价。其中当补偿价格在1.37W~1.39W范围内时,EV调频容量利用率有小幅度的回升,这主要是因为:随着补偿价格的增大,各时段可调度EV容量均增大,部分时段可能存在高调频需求而仍需要调用价格不算太高的EV容量的情况,从而使整体EV调频容量利用率表现出缓慢的上升趋势。总体而言,若EVA以火电机组的价格排序方式参与调频辅助服务市场,则存在因补偿价格过低而无法调动用户积极性以及因补偿价格过高而无法在竞价中胜出的矛盾。

由图5可以看出EV调频容量利用率最大值仅为20%,该情况下调频辅助服务市场与电能量市场各机组的中标容量如图6所示。由于EV报价与传统火电相比相差不大,调频辅助服务市场仅减少了0.253%的支出。

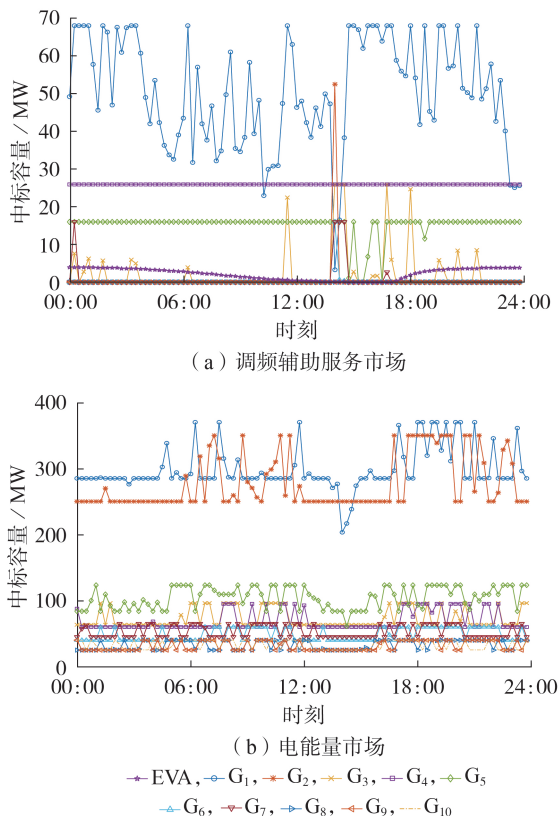


图6 场景3下调频辅助服务市场、电能量市场中各机组的中标容量

Fig.6 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market and electricity energy market under Scenario 3

4.2.4 场景4分析

场景4中将快速调频资源对传统自动发电控制(AGC)机组的替代作用量化为替代指标,并用现行各调频资源排序方式修改后的报价除以替代指标得到综合考虑快速调频资源替代效应的调频资源排

序。场景4下调频辅助服务市场中各机组的中标容量如图7所示。

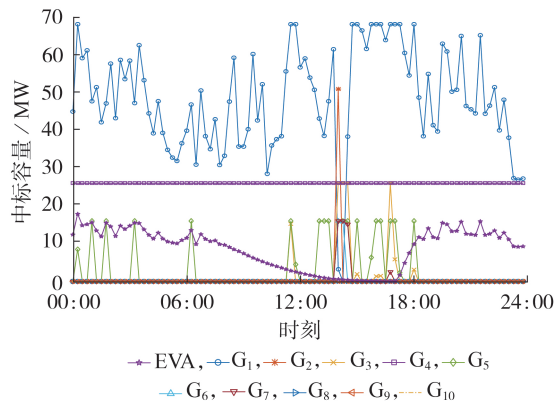


图7 场景4下调频辅助服务市场中各机组的中标容量

Fig.7 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market under Scenario 4

对比图7与图6(a)可以看出:在采用计及快速调频资源替代效应的排序方式下,EV表现出强大的竞争力,图7为最高报价下调频辅助服务市场中各机组的中标容量结果,可见EV负荷几乎全部被调用;在调用EV负荷的时段,调频容量购置量有一定程度的减少,体现了替代效应为电网购置调频容量的贡献,调频辅助服务市场减少了6.3%的支出;由于调频容量购置量减少及EV负荷中标容量增加,部分在场景3下能中标的火电机组在场景4下无法中标,实现了对调频性能差的火电机组的筛选,迫使其采用联合储能等措施以提高机组的调频性能。

4.2.5 EVA规模对出清结果的影响分析

由于替代效应与提供调频辅助服务主体中快速调频资源的占比强相关,且EVA的规模对本文所提策略而言是一个无法回避的问题,所以通过改变EVA规模进行敏感性分析。本文的负荷数据来源于某市级电网的实际数据,因此从一个城市包含的EV数量角度出发,对500、1000、3000、5000辆EV进行聚合模拟,得到不同EVA规模下调频辅助服务市场中各机组的中标容量结果分别如附录A图A9—A12所示。不同EVA规模下的购电成本如表2所示。

表2 不同EVA规模下的购电成本

Table 2 Electricity purchase costs with different EVA scales

EV数量/ 辆	能量市场 购电成本/元	调频辅助服务市场 购电成本/元	总成本/元
500	4066882.45	194310.00	4261192.45
1000	4066844.32	190250.00	4257094.32
2000	4067012.70	188680.00	4255692.70
3000	4067009.26	188100.00	4255109.26
5000	4066968.77	187530.00	4254498.77

由上述结果可以看出:随着EVA规模的增大,各时段可调度容量不断增加,但当EV数量达到

2 000 辆左右后,夜间的调频需求达到饱和;随着EVA规模的增大,调频辅助服务市场的成本不断降低,但降低的幅度不断减小,当EV数量超过2 000 辆后,只是在白天调度容量紧缺的时段调用容量增大。因此,在计及替代效应下,快速调频资源的需求容量也是有限的,利用储能提供调频容量也不应过量投资,国家政策应该向着引导投资合理的调频资源比例倾斜。

5 结论

我国调频辅助服务市场起步晚,需要对运营实践进行总结并对其中存在的问题进行总结改进。本文从出清方式及扩大准入主体的角度出发,分别对调频辅助服务市场与电能量市场顺次出清及联合出清方式进行建模,对EV负荷采取当前报价排序方式及考虑快速调频资源替代效应的报价排序方式的可行性进行了分析,所得结论如下:

1)与顺次出清方式相比,调频辅助服务市场与电能量市场联合出清可显著降低购电成本,以某区域级电网为例,能大约降低11.5%的综合购电成本;

2)山西省现行调频出清方式仍不能合理补偿EV等快速调频资源对频率调节的贡献,且未在出清方式中考虑快速调频资源减少调频容量购置量的作用,补偿价格亦不能很好地调动EV用户的积极性;

3)若能引入计及替代效应的调频辅助服务市场出清方式,则能够通过适量采购快速调频资源,在降低调频支出的同时为EV用户带来盈利;

4)当参与调频辅助服务市场时,应对EVA的规模以及构成特点加以考虑,若聚合的EV用户过多,则可能会导致夜间调频容量过剩,所以在聚合时可以考虑选择不同用车方式的EV用户,以此弥补白天调频容量不足的缺陷。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. (2015-03-31)[2021-03-05]. <https://news.ncepu.edu.cn/xxyd/llxx/52826.htm>.
- [2] 陈中飞,荆朝霞,陈达鹏,等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(12):1-10.
CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 1-10.
- [3] 刘永奇,邹鹏,燕争上,等. 山西电力调频市场机制设计与运营实践[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):175-182.
LIU Yongqi, ZOU Peng, YAN Zhengshang, et al. Mechanism design and operation practice of Shanxi power frequency regulation market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 175-182.
- [4] 杨健维,董鸿志,廖凯,等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):200-206.
YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 200-206.
- [5] KWON M, CHOI S. An electrolytic capacitorless bidirectional EV charger for V2G and V2H applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6792-6799.
- [6] MERRILL C H, LAM V H, VAN VLEET M J, et al. Modeling and simulation of fleet vehicle batteries for integrated logistics and grid services[C]//2015 Systems and Information Engineering Design Symposium. Charlottesville, VA, USA: IEEE, 2015: 255-260.
- [7] 王博. 电动汽车充电监控管理系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
WANG Bo. Design and implementation of charging monitoring and management system for electric vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [8] 伍福平,王小军,袁泉,等. 基于物联网的电动汽车充电桩远程控制方法研究[J]. 自动化与仪器仪表,2020(7):65-68.
WU Fuping, WANG Xiaojun, YUAN Quan, et al. Research on remote control method of electric vehicle charging pile based on Internet of Things[J]. Automation & Instrumentation, 2020(7): 65-68.
- [9] 李清,张孝顺,余涛,等. 电动汽车充换电站参与电网AGC功率分配的成本一致性算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):80-87,95.
LI Qing, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Cost consensus algorithm of electric vehicle charging station participating in AGC power allocation of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 80-87, 95.
- [10] 于娜,刘甲利,孙莉,等. 电动汽车作为主动负荷参与需求响应的研究[J]. 东北电力大学学报,2017,37(4):20-26.
YU Na, LIU Jiali, SUN Li, et al. Research on electric vehicle access demand response as active load[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(4): 20-26.
- [11] 李晓萌,贾宏杰,穆云飞,等. 时滞环境下基于电动汽车与电热泵的协调频率控制[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):88-95,110.
LI Xiaomeng, JIA Hongjie, MU Yunfei, et al. Coordinated frequency control based on electric vehicles and heat pumps considering time-delay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 88-95, 110.
- [12] 郝丽丽,王国栋,王辉,等. 考虑电动汽车入网辅助服务的配电网日前调度策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):35-43.
HAO Lili, WANG Guodong, WANG Hui, et al. Day-ahead scheduling strategy of distribution network considering electric vehicle-to-grid auxiliary service[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 35-43.
- [13] 甘肃能源监管办. 甘肃省电力辅助服务市场运营规则(修订稿)[EB/OL]. (2020-01-31)[2021-03-05]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20200131/1039037-3.shtml>.
- [14] 周华锋,胡亚平,聂涌泉,等. 区域互联电网能量与备用辅助服务联合优化模型研究[J]. 电网技术,2020,44(3):991-1001.
ZHOU Huafeng, HU Yaping, NIE Yongquan, et al. Co-optimization model of energy and reserve auxiliary service for regional interconnected power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 991-1001.
- [15] 王辉,文福拴,辛建波. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报,2011,38(5):17-24.
WANG Hui, WEN Fushuan, XIN Jianbo. Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 17-24.

- [16] 梁子鹏,陈皓勇,王勇超,等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术,2017,41(8):2647-2658.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Yongchao, et al. Robust economic dispatch of microgrids containing electric vehicles[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2647-2658.
- [17] 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.
- [18] 陈新仪. 大容量风电资源接入后的电网调频服务交易研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
CHEN Xinyi. Study on regulation reserve trading mechanism considering large-scale wind power integration[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [19] 崔杨,曾鹏,惠鑫欣,等. 考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的低碳经济调度[J]. 电网技术,2021,45(5):1877-1885.
CUI Yang, ZENG Peng, HUI Xinxin, et al. Low-carbon economic dispatch considering the integrated flexible operation

mode of carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1877-1885.

- [20] 仇进,吴继平,滕贤亮,等. 适应辅助服务市场化的自动发电控制调频容量实时计算方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(8):16-21.
QIU Jin, WU Jiping, TENG Xianliang, et al. Real-time calculation method for frequency modulation capacity of automatic generation control adapting to auxiliary service marketization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 16-21.

作者简介:



崔 杨

崔 杨(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析、新能源联网发电关键技术等(E-mail: cuiyang0432@163.com);

周飞杰(1996—),男,硕士研究生,通信作者,研究方向为新能源并网、电力市场(E-mail: 295668081@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Clearing mode of electric vehicle load participating in frequency regulation ancillary service market considering substitution effect

CUI Yang¹, ZHOU Feijie¹, ZHAO Yuting¹, LIU Xinyuan², HAN Chuanding³

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;

3. China Southern Power Grid EHV Transmission Company, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In the context of continuous increasing grid-connected proportion of new energy sources, it is an important trend of market exploration of frequency regulation auxiliary service mechanism to expand the main providers of frequency regulation auxiliary service on demand, introduce load-side resources to provide high-performance frequency regulation services, and gradually diversify the market competition. Therefore, the market competitiveness of EV (Electric Vehicle) participating in frequency regulation auxiliary service market under current clearing mode and compensation mechanism is analyzed, and a bidding price correction method of frequency regulation resources considering substitution effect is proposed. The sequential and joint clearing models of frequency regulation auxiliary service market and electricity energy market are established respectively. Based on the analysis of EVs' travel data, a compensation price response model based on battery loss cost is established according to the current battery selling price. Combined with the joint clearing model and compensation price response model, the utilization rates of EV participating in the frequency regulation auxiliary service market are calculated based on the current price ranking and the price ranking considering the substitution effect of fast frequency regulation resources. The simulative results show that the current compensation price can not motivate EVs to participate in the frequency regulation auxiliary service market, so the price ranking method needs to be improved reasonably. While the price ranking method considering the substitution effect can increase the bidding rate of EVs and reduce the expenditure of frequency regulation auxiliary service market.

Key words: electric vehicles; frequency regulation auxiliary service; electricity market; clearing mode; fast frequency regulation resources; substitution effect; joint clearing

附录 A

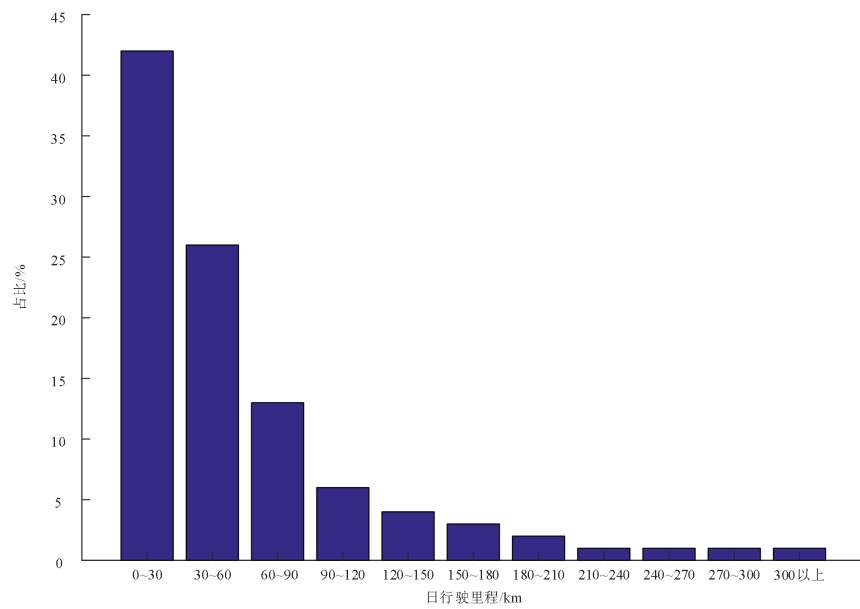


图 A1 EV 日行驶里程分布
Fig.A1 Daily mileage distribution of EVs

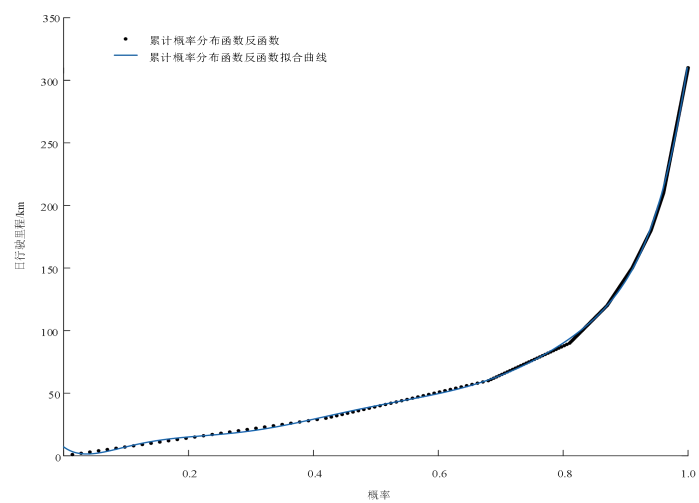


图 A2 EV 日行驶里程累积概率分布的反函数
Fig.A2 Inverse function of cumulative probability distribution of EV daily mileage

表 A1 日行驶里程的拟合参数
Table A1 Fitting parameters of daily mileage

参数	数值	参数	数值	参数	数值
p_1	90850	p_4	-448600	p_7	7390
p_2	-345900	p_5	209700	p_8	-361.1
p_3	541900	p_6	-54730	p_9	7.085

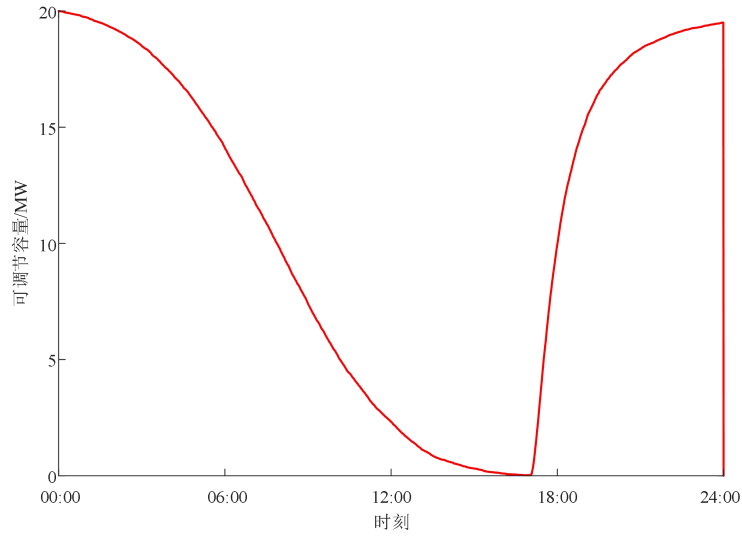


图 A3 2000 辆 EV 聚合后的可调节容量
Fig.A3 Adjustable capacity of 2000 EVs after polymerization

表 A2 快速调频资源的替代效应指标
Table A2 Substitution effect index of fast frequency modulation resources

快速调频资源占比	替代效应指标	快速调频资源占比	替代效应指标	快速调频资源占比	替代效应指标
0	2.9	0.14	1.885	0.28	0.870
0.01	2.828	0.15	1.813	0.29	0.798
0.02	2.755	0.16	1.740	0.30	0.725
0.03	2.683	0.17	1.668	0.31	0.653
0.04	2.610	0.18	1.595	0.32	0.580
0.05	2.538	0.19	1.523	0.33	0.508
0.06	2.465	0.20	1.450	0.34	0.435
0.07	2.393	0.21	1.378	0.35	0.363
0.08	2.320	0.22	1.305	0.36	0.290
0.09	2.248	0.23	1.233	0.37	0.218
0.10	2.175	0.24	1.160	0.38	0.145
0.11	2.103	0.25	1.088	0.39	0.072
0.12	2.030	0.26	1.015	0.40	0.001
0.13	1.958	0.27	0.943	0.41~1.00	0

表 A3 机组运行参数
Table A3 Operation parameters of units

机组	最大出力/MW	最小出力/MW	启停成本/元	成本参数			最小启停时间/h	机组爬坡/(MW/h)
				$a/(\text{元}/\text{MW}^2)$	$b/(\text{元}/\text{MW})$	$c/\text{元}$		
G ₁	455	200	31500	0.00336	113.4	7000	6/6	1000
G ₂	455	150	35000	0.00217	121.1	6790	5/5	1000
G ₃	130	30	3850	0.014	116.2	4900	5/5	500
G ₄	130	25	3920	0.01477	115.5	4760	5/5	500
G ₅	162	45	6300	0.02786	137.9	2450	5/5	500
G ₆	80	20	1190	0.04984	156.1	2590	3/3	300
G ₇	85	25	1820	0.00553	193.9	3360	3/3	255
G ₈	55	10	210	0.02891	181.3	4620	1/1	200
G ₉	55	10	210	0.01554	191.1	4655	1/1	200
G ₁₀	55	10	210	0.01211	194.6	4690	1/1	200

表 A4 机组报价及性能参数
Table A4 Unit quotation and performance parameters

机组	申报价格/(元/MW)	申报容量/MW	申报容量占比	历史里程-容量比 n	综合调频性能	修正后的报价/(元/MW)
G ₁	6	68	0.15	10	0.8	7.500
G ₂	6.5	68	0.15	10	0.8	8.125
G ₃	7	26	0.20	10	0.9	7.778
G ₄	5.5	26	0.20	10	0.8	6.875
G ₅	6	16	0.10	10	0.8	7.500
G ₆	5.5	16	0.20	10	0.7	7.857
G ₇	7	16	0.20	10	0.9	7.778
G ₈	7.5	11	0.20	10	0.9	8.333
G ₉	6.5	11	0.20	10	0.8	8.125
G ₁₀	7	11	0.20	10	0.7	10.000

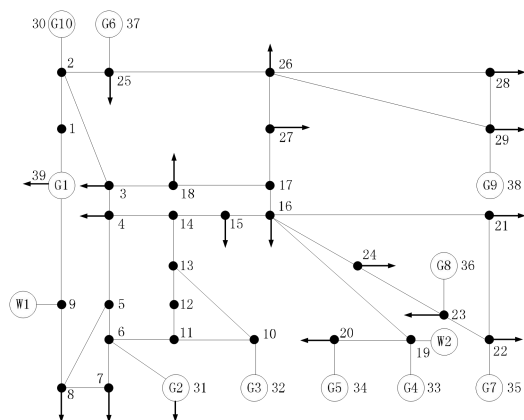


图 A4 改进的 IEEE 39 节点系统拓扑结构图

Fig.A4 Topology structure diagram of improved IEEE 39-bus system

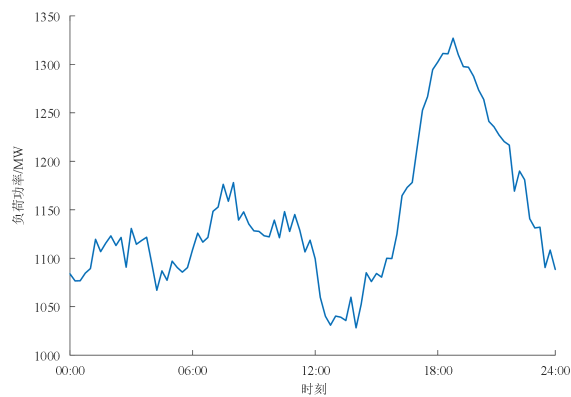


图 A5 负荷曲线

Fig.A5 Load curve

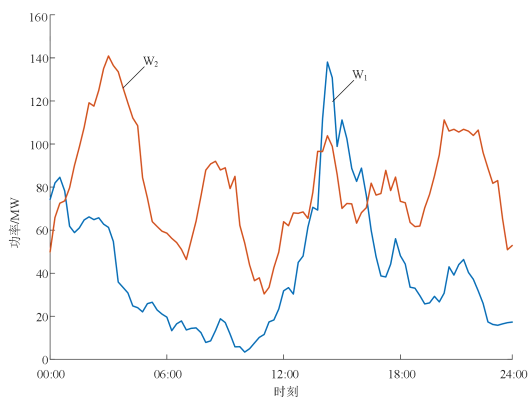


图 A6 风电预测出力曲线

Fig.A6 Forecast output curves of wind power

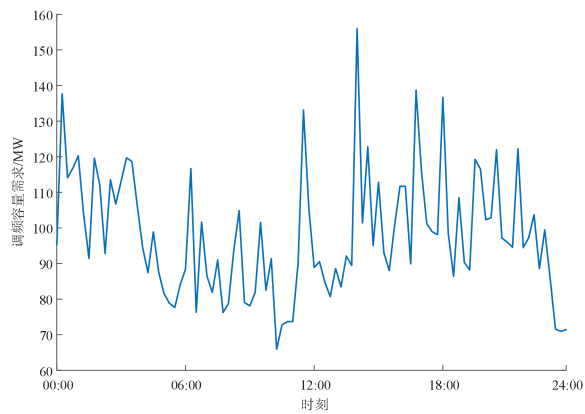


图 A7 次日的调频需求曲线

Fig.A7 Next day's frequency regulation demand curve

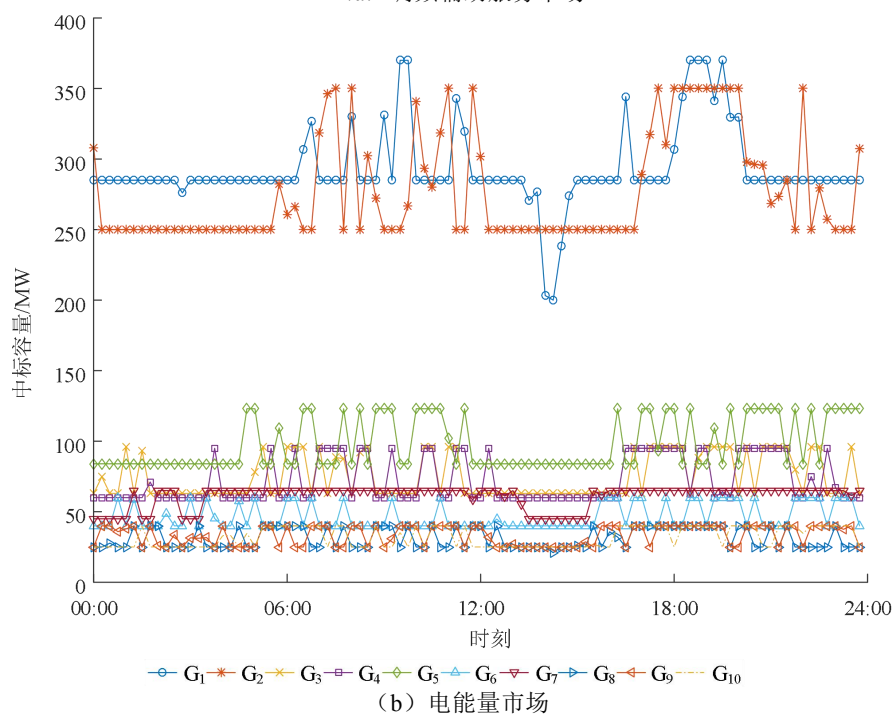
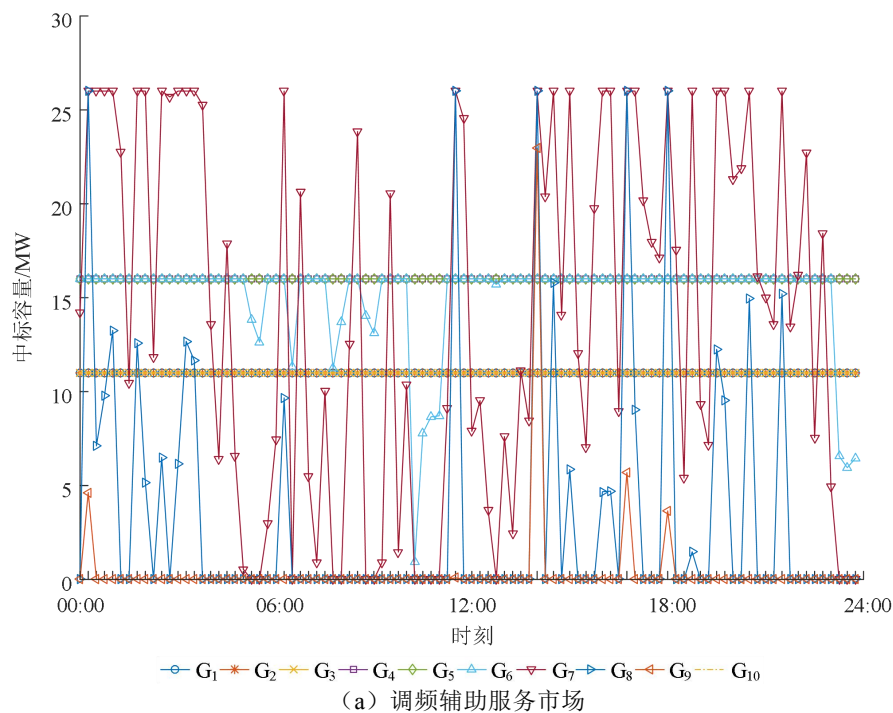


图 A8 场景 1 下调频辅助服务市场、电能量市场中各机组的中标容量
 Fig.A8 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market and electricity energy market under Scenario 1

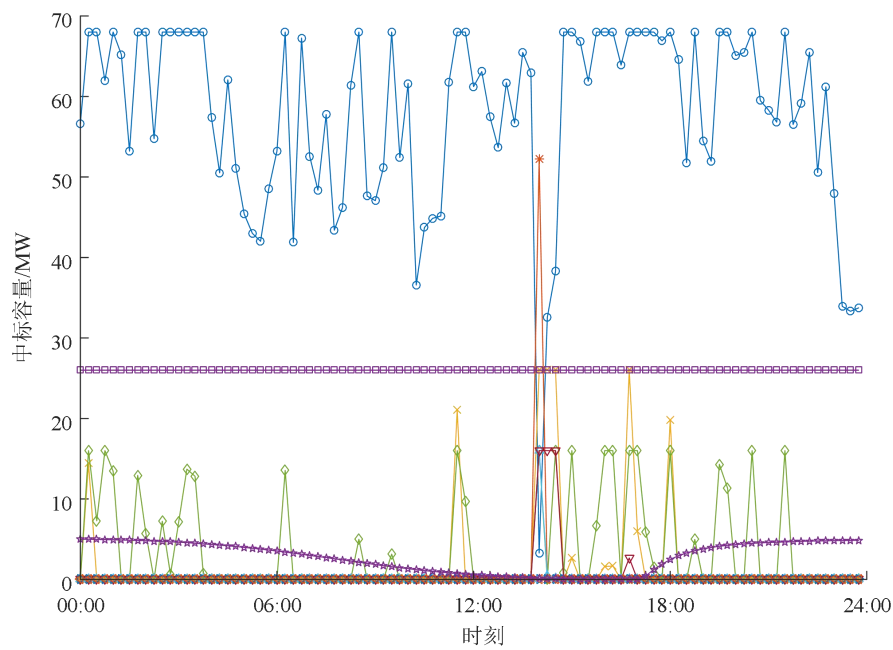


图 A9 调频辅助服务市场中各机组的中标容量 (500 辆 EV)

Fig.A9 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market(500 EVs)

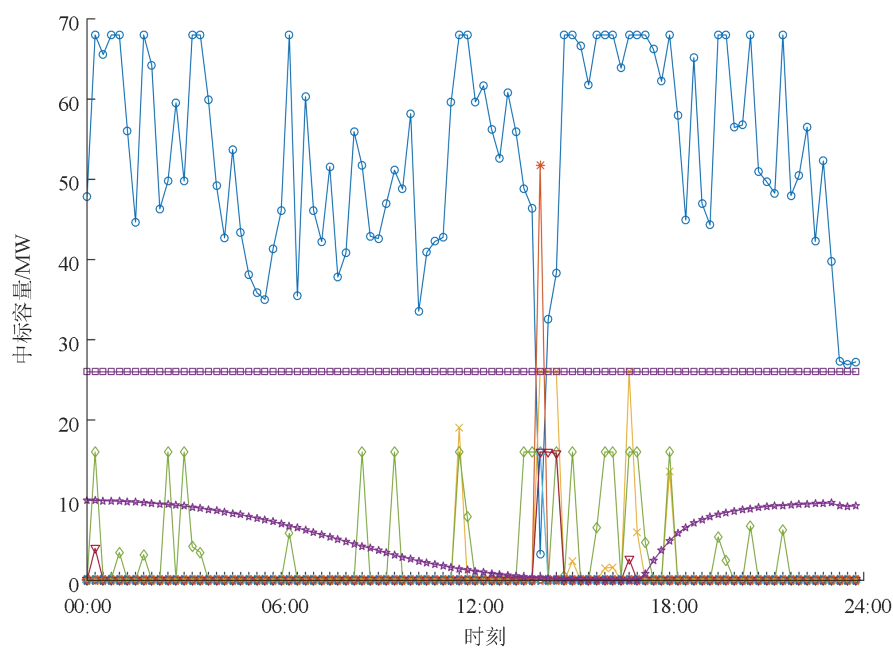


图 A10 调频辅助服务市场中各机组的中标容量 (1000 辆 EV)

Fig.A10 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market(1000 EVs)

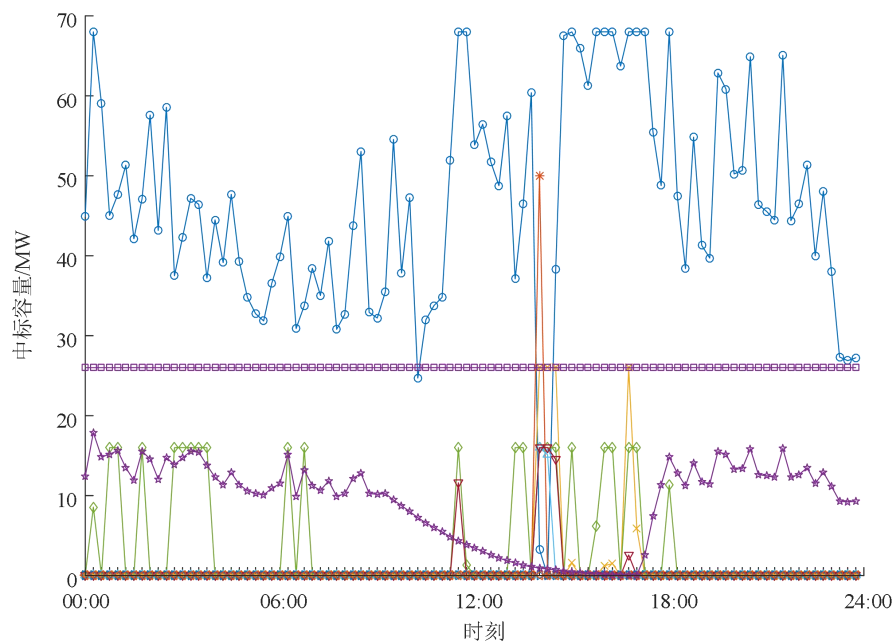


图 A11 调频辅助服务市场中各机组的中标容量 (3000 辆 EV)

Fig.A11 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market(3000 EVs)

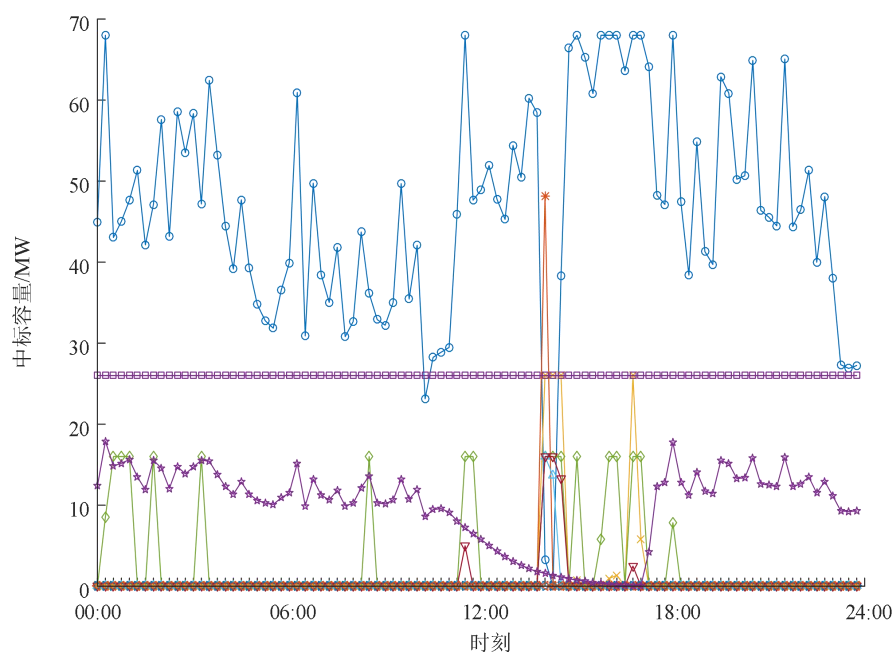


图 A12 调频辅助服务市场中各机组的中标容量 (5000 辆 EV)

Fig.A12 Bidding capacity of each unit in frequency regulation service market(5000 EVs)