第 40 卷 第 2 期 2016 年 1 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20150209011
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.40 No.2 Jan.25，2016

计及电动汽车接入电网的备用服务多目标竞价优化

李士动[1]，施泉生[2]，赵文会[2]，余金龙[3]，于浩明[4]
（1. 国网泰安供电公司，山东省泰安市 271000；2. 上海电力学院经济与管理学院，上海市 200090；
3. 国网黄山供电公司，安徽省黄山市 245000；4. 国网烟台供电公司，山东省烟台市 264000）

摘要：研究了电动汽车接入电网（V2G）提供备用服务与备用资源的优化配置问题。首先，建立了 V2G 备用服务的市场交易机制，并提出一种能够准确估计 V2G 备用服务实时可调度容量的等效变换方法。然后，以机会约束规划反映负荷波动、发电机停运、V2G 出力偏差等随机性因素，构建了考虑备用经济性、可靠性及碳排放的多目标竞价模型。接着采用交互式决策方法处理该多目标优化问题，并结合随机模拟与改进粒子群算法进行求解。最后，进行了仿真分析，仿真结果证明了所提等效变换方法与备用服务多目标竞价模型的有效性。

关键词：备用服务；竞价；电动汽车；等效变换；机会约束规划；多目标优化；随机模拟

0 引言

市场环境下，大都采用竞价方式获取备用服务，然而传统竞价模型一般仅追求购买成本的最小化。这类以经济性为主导的交易模式，可能使一些停运概率大、污染排放重的机组因为报价较低而过多的中标，从而导致备用服务的可靠性与碳排放问题。因此，从保证系统可靠运行与电力低碳发展的角度，备用服务的获取就有必要兼顾经济性、可靠性与碳减排的协调统一[1-2]。

近年来，电动汽车（electric vehicle，EV，本文指可入网 EV）以其节能、环保的优势而得以快速发展[3]。绝大多数 EV 在 1 d 中 96%的时间都是被闲置的，因此将 EV 作为移动储能装置，借助电动汽车接入电网（vehicle-to-grid，V2G）技术为系统提供备用服务潜力巨大[4-5]。然而，分散接入方式下，受电池容量限制，可靠的 V2G 备用服务只有在聚集大量 EV 基础上才能实现；此外，EV 作为交通工具，满足车主行驶需求仍为其首要功能，车主出行随机性也就必然会影响 V2G 备用服务的可靠性[6]。为了充分利用 V2G 备用资源，就有必要分析其备用服务特性。

对于如何提高备用服务的可靠性并降低碳排放，文献[1-2]分别构建了多目标的备用竞价模型，但都采用了确定性的备用容量决策方法。文献[7-8]在引入碳交易与碳排放成本的基础上构建了备用竞价模型，兼顾了备用服务的经济性与碳减排要求。关于 EV 参与电网互动的研究，目前主要集中于 EV 充/放电的优化调度，多以降低系统运行成本、平抑常规负荷或可再生能源发电波动为目标[9-10]，方法则是依据数据统计得到相关行驶模型后，直接优化 EV 充/放电策略[11]。此外，也有文献研究了 EV 参与频率调整的控制策略[12-13]。然而，以上文献都没有考虑车主的参与意愿与经济激励问题，所得最优调度或控制方案并不一定被车主所接受。为此，文献[14]对 V2G 提供备用服务的交易模式进行了探讨，同时考虑了备用服务的可靠性问题。文献[15-17]则研究了 EV 代理商参与电能市场与辅助服务市场（尤其是调频市场）的最优竞价策略问题。

在上述背景下，本文在建立 V2G 备用服务市场交易机制基础上，主要针对 EV 提供备用服务的不确定性，提出了一种能够准确估计 V2G 备用服务实时可调度容量（achievable power capacity，APC）等效变换方法，进而从调度机构的角度出发，研究了考虑 V2G 备用服务经济性、可靠性与碳排放的多目标竞价优化问题。

1 V2G 备用服务的市场交易机制与 APC

当采用竞价交易方式时，类似发电机构，车主在日前电能市场出清后提交其次日每时段（1 h）的 V2G 备用服务投标。车主收益包括容量收益、电量收益与环保补偿收益，成本则主要包括充电成本、电池损耗与资本成本[4-5]，此外还应包括因 EV 响应失

收稿日期：2015-02-09；修回日期：2015-07-23。
国家自然科学基金资助项目（71403163）。

败而导致的违约惩罚[6]，具体惩罚机制由调度机构确定。

本文假设车主能够在成本效益分析基础上确定其竞价策略，以保证获取 V2G 备用服务收益，显然这是激励 EV 参与提供备用服务的前提条件。其中，文献[4]详述了具体的成本效益分析过程。文献[5]则以纽约电力市场为例，利用实际电价与成本数据，验证了由 EV 提供备用服务在经济性上的可行性。

1.1　V2G 备用服务的市场交易机制

在市场力方面，EV 数量多、容量小，单辆 EV 无法影响市场价格，因此 V2G 备用服务市场满足完全竞争的供给市场结构，具体表现为竞价曲线更为连续、平滑；在技术方面，稳定的 V2G 备用服务需要协调大量 EV 参与提供，因此尚有待于智能电网建设与 EV 的大量普及。考虑到直接调度或控制的复杂性，本文假设存在某种智能代理终端作为 EV 与调度机构之间联系的纽带[14]。调度机构通过该终端可在线分析 V2G 备用服务市场反应状况（统计 EV 报价与参与数量），依托其实时的通信架构，监测 EV 实时接入电网的状态与荷电状态（state of charge，SOC）。同时，该终端还能够记录 EV 以往的报价、违约等历史数据。基于此，设计以下 V2G 备用服务的市场交易机制。

1）调度机构借助智能代理终端向 EV 发布次日备用需求时段、容量及价格等数据。

2）车主自愿选择是否参与 V2G 备用服务，并根据 EV 特性与出行计划，提交其备用服务价格、具体参与时段、放电功率与最小 SOC 约束数据。

3）智能代理终端根据所有参与 EV 的竞价数据，拟合得到各时段的 V2G 备用服务的市场特征曲线：

$$\overline{P}_{\mathrm{EV}}=f_1(\overline{R}_{\mathrm{EV}})\qquad \overline{R}_{\mathrm{EV}}\leqslant \overline{R}_{\mathrm{EV}}^{\max} \tag{1}$$

$$\overline{n}=f_2(\overline{R}_{\mathrm{EV}}) \tag{2}$$

式中：$\overline{P}_{\mathrm{EV}}$为 V2G 备用服务的容量价格（本文采用以容量价格作为竞价依据的备用市场出清方法[1-2]）；$\overline{R}_{\mathrm{EV}}$为 V2G 备用服务容量（即 EV 放电功率之和）；f_1 为容量-价格曲线，根据 EV 容量价格报价数据由低到高排序得出；$\overline{R}_{\mathrm{EV}}^{\max}$为 V2G 备用服务最大投标量；$\overline{n}$ 为 EV 参与数量；f_2 为容量-数量曲线，表示某一 V2G 备用服务容量下的 EV 参与数量，需对应于曲线 f_1 而得出。

对于某备用竞价时段，给定 V2G 备用服务中标量 R_{EV}，则可以根据式(1)和式(2)确定 V2G 备用服务市场出清价格 P_{EV}、EV 中标数量 n 以及具体中标 EV。上述 3 个参数描述了该时段 V2G 备用服务的市场特征，可记为特征点(R_{EV}，P_{EV}，n)。

4）当需要实时调用 R_{EV}时，由智能代理终端判断日前中标 EV 是否满足调度条件（是否接入电网、SOC 是否满足要求），如果满足调度条件，则由调度机构远程控制 EV 放电。

上述机制下，由车主主动参与备用服务投标，其优点在于既统一了系统调度目标与车主参与的经济意愿，又有效地确定了 EV 放电控制策略。

需要指出的是，由于 EV 的首要功能仍是用于出行，因此即使 EV 日前中标，如果车主有实时的行驶需求，调度机构也没有权力强制要求车主将 EV 接入电网，但对于车主而言，不能按约定提供备用服务即会违约，将会因此而承受经济惩罚。

此外，SOC 不足也是导致中标 EV 调度失败的一个重要原因，但考虑到车主能够根据其出行经验或计划估计其次日行驶耗电量，进而确定可用于投标的备用服务放电电量及放电时段数，因此本文认为 SOC 能够满足 EV 在所中标时段内的备用服务放电需求，而重点分析 EV 接入电网随机性的影响。

1.2　APC 概率分布的计算方法

受车主出行随机性影响，某些中标 EV 可能无法按相应中标时段实时接入电网，因此 V2G 备用服务日前中标量并不等于其 APC，APC 无法准确确定，但 APC 受 EV 出行规律影响，可以采用随机变量来描述[6,18]，为此需要建立其概率模型。

若某时段特征点为(R_{EV}，P_{EV}，n)，首先考虑一种理想情况，假定所有中标 EV 具有相同的接入电网概率，则次日该时段能够实时接入电网的 EV 数量 k 服从二项分布[6]，其概率分布 $p_{\mathrm{r}}(k)$为：

$$p_{\mathrm{r}}(k)=\mathrm{C}_n^k p^k(1-p)^{n-k}\qquad k=0,1,\cdots,n \tag{3}$$

式中：p 为每辆 EV 接入电网的概率。

根据棣莫弗-拉普拉斯中心极限定理知，当 n 足够大时($np>30$)，可以用连续的正态分布准确估计上述离散的二项分布，即 $k\sim N(np,np(1-p))$。

若再进一步假定所有中标 EV 具有相同的放电功率 η，则根据正态分布随机变量的线性变换关系，可以得到该时段 APC 所服从的概率分布为：APC$\sim N(\eta np,\eta^2 np(1-p))$。

然而，现实中上述理想 EV 是不存在的，实际 EV 的 p 和 η 彼此间并不相同，并且每辆 EV 在不同时段的 p 也不同（本文认为 p 为单个时段的平均值，各时段 p 值可以通过观察统计 EV 出行规律得出[6,18]）。因此，无法直接得出 APC 的概率分布。

为此，文献[6]基于概率学理论推导，建立了 APC 的正态分布模型；文献[9]则采用蒙特卡洛模拟仿真得到了 APC 的正态分布模型。文献[6]与文

献[9]均证明了 APC 服从正态分布，但所用方法需要对 EV 进行分组或需要大量模拟试验，从而导致求解过程的繁琐与费时，为此本文提出一种等效变换方法，能够快速、准确地得出 APC 概率分布。

等效变换方法的实现以下述 2 点为前提条件。

1)APC 可以通过正态概率分布模型描述。文献[6]与文献[9]已对此进行了证明，本文假设 APC 概率分布为 $N(\mu,\varphi^2)$，μ 和 φ^2 分别为 APC 的均值与方差。

2)由中心极限定理反推，能够找到与该正态分布相对应的二项分布 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$。就本文而言，需能够满足下式：

$$\begin{cases}\mu=\eta_{\mathrm{all}}n_{\mathrm{all}}p_{\mathrm{all}}\\ \varphi^2=\eta_{\mathrm{all}}^2n_{\mathrm{all}}p_{\mathrm{all}}(1-p_{\mathrm{all}})\\ 0<p_{\mathrm{all}}<1\end{cases}\tag{4}$$

式中：n_{all}，η_{all}，p_{all} 分别为 EV 统一中标数量、统一放电功率与统一接入电网概率。

式(4)含有 3 个变量与 2 个等式约束，因此满足条件的解一定存在，即能够找到该二项分布 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$，这也相当于得到了放电功率、接入概率都相同的理想 EV。等效变换方法的思路如图 1 所示。

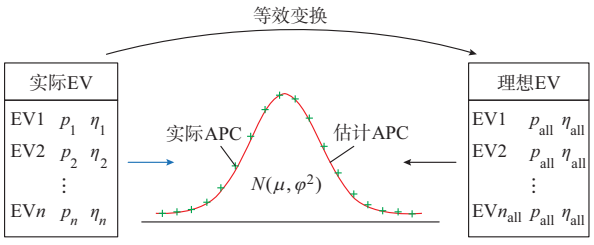

图 1　等效变换

Fig.1　Equivalent transformation

由于放电功率、接入概率彼此间不相同，因此根据实际 EV 很难直接、快速地得到 APC 服从的正态分布 $N(\mu,\varphi^2)$，而利用理想 EV 服从的二项分布 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$，则能够快速地对 APC 进行估计。因此，当直接求解 $N(\mu,\varphi^2)$ 比较困难时，可以转化为先求解 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$，再求解 $N(\mu,\varphi^2)$。而等效变换的作用即为将实际 EV 等效处理为理想 EV，从而获取 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$。

显然，对这一等效变换的基本要求则是保证变换后 $N(\mu,\varphi^2)$ 不能够发生变化，同时能够确定 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$ 所涉及的 3 个参数 n_{all}，η_{all}，p_{all}。因此，从保证 $N(\mu,\varphi^2)$ 不变的角度设计如下变换规则。

规则 1：所有中标 EV 接入电网的概率与其放电功率乘积之和 E_{APC} 可以表示 APC 的期望值，E_{APC} 将直接影响 $N(\mu,\varphi^2)$ 的均值(即影响 $N(\mu,\varphi^2)$ 的位置)，因此保持变换前后 E_{APC} 不变。

规则 2：所有中标 EV 的放电功率之和 M_{APC}(即 V2G 备用服务中标量 R_{EV})表示 APC 的最大可能值，M_{APC} 影响 APC 的取值范围。若变换前后 M_{APC} 变大或变小，可能导致 $N(\mu,\varphi^2)$ 的方差变大或变小(即影响 $N(\mu,\varphi^2)$ 的形状)，因此保持变换前后 M_{APC} 不变。

规则 3：在保证 E_{APC} 与 M_{APC} 不变的情况下，EV 中标数量 n 也会影响 APC 的方差(即影响 $N(\mu,\varphi^2)$ 的形状)，因此变换前后也保持 n 值不变，即 n_{all} 等于 n。

上述 3 条变换规则代表了 3 个等式，据此可唯一确定 $B(n_{\mathrm{all}},p_{\mathrm{all}})$ 的 3 个关键参数。其中，由规则 1 和 2 得到：

$$p_{\mathrm{all}}=\frac{E_{\mathrm{APC}}}{M_{\mathrm{APC}}}\tag{5}$$

由规则 2 和 3 得到：

$$\eta_{\mathrm{all}}=\frac{M_{\mathrm{APC}}}{n}\tag{6}$$

经过上述等效变换(有效性验证见 5.2 节)，可以得到所求二项分布 $B(n,p_{\mathrm{all}})$，也就解决了实际中标 EV 接入电网概率、放电功率彼此间不相同的问题。此时可直接由 $B(n,p_{\mathrm{all}})$ 快速对 $N(\mu,\varphi^2)$ 进行估计，则 V2G 备用 APC 服从的概率分布为：APC～$N(\eta_{\mathrm{all}}np_{\mathrm{all}},\eta_{\mathrm{all}}^2np_{\mathrm{all}}(1-p_{\mathrm{all}}))$。

综上，某时段特征点(R_{EV}，P_{EV}，n)确定后，也就可以得到中标 EV 的实际接入电网概率与放电功率数据，进而可以通过等效变换将 EV 理想化，最终快速得出该时段 APC 概率分布。

2　备用服务多目标竞价模型的建立

机会约束规划(CCP)主要用于处理含随机变量约束条件问题，采用 CCP 方法建立备用需求模型，能够有效计及负荷波动、发电机停运等多种随机性事故因素，从而反映系统备用需求的不确定性[19]。

各竞价机构的备用中标量为本文决策变量。从调度机构角度出发，以最小化备用购买成本 F、机组备用不足期望值 E_{r} 及碳排放量 E_{m} 为目标，构建以下备用服务多目标竞价 CCP 模型。

$$\min F=\sum_{i\in G}P_iR_i+P_{\mathrm{EV}}R_{\mathrm{EV}}\tag{7}$$

$$\min E_{\mathrm{r}}=\sum_{i\in G}\lambda_iR_i\tag{8}$$

$$\min E_{\mathrm{m}}=\sum_{i\in G}e_iR_i\tag{9}$$

$$\mathrm{prob}\left\{\sum_{i\in G}(Q_i^{\mathrm{en}}+R_i)d_i+\widetilde{D}_{\mathrm{EV}}\geqslant\widetilde{D}_{\mathrm{L}}\right\}\geqslant\alpha\tag{10}$$

$$Q_i^{en}+R_i\leqslant g_i^{max} \tag{11}$$

$$0\leqslant R_i\leqslant R_i^{max} \tag{12}$$

$$0\leqslant R_{EV}\leqslant \overline{R}_{EV}^{max} \tag{13}$$

$$0\leqslant R_i\leqslant 10U_i^{ramp} \tag{14}$$

式中：G 为竞价备用机组集合；P_i 为机组 i 的备用容量价格；R_i 为机组 i 备用中标量；λ_i 为机组 i 实时停运概率[1]；e_i 为机组 i 单位发电量的碳排放量；Q_i^{en} 为机组 i 在该时段电能市场的中标量；d_i 为该时段机组 i 所处状态，取值为 0 或 1，表示停运或正常，通过蒙特卡洛模拟方法确定；$\widetilde{D}_{EV}$ 为 V2G 备用服务的 APC，通过 1.2 节等效变换方法得到，即 $\widetilde{D}_{EV}\sim N(\eta_{all}np_{all},\eta_{all}^2np_{all}(1-p_{all}))$；$\widetilde{D}_L$ 为实际负荷值，一般以正态分布随机变量描述；prob{·}为概率函数；α 为系统可靠性置信水平；g_i^{max} 为机组 i 的最大容量；R_i^{max} 为机组 i 的最大备用容量；U_i^{ramp} 为机组 i 的爬坡速率。

实时运行时，若机组因强迫停运而无法提供预先中标的备用容量，则会威胁系统安全，为此构造式(8)所示目标函数，E_r 越小，表明低停运概率机组备用容量中标越多，从而区分不同机组的可靠性差异，体现出对备用服务的可靠性激励。同理，通过式(9)也可以体现出碳减排激励。

式(10)表明考虑随机性事故因素后，系统可用发电容量满足负荷要求的概率须大于一定的可靠性置信水平，在本文中代表了备用容量需求量约束。通过改变 α 值，$\alpha\in[0,1]$，可使系统处于不同的可靠性水平之下，从而能够实现系统可靠性与经济性的协调。应指出，备用服务交易之前，在电能市场中确定发电计划(即 Q_i^{en})时，需要充分考虑系统有功功率平衡、线路潮流等约束。

式(11)—式(14)表示机组容量约束与备用容量约束、V2G 备用服务容量约束、机组 10 min 爬坡速率约束。

3　交互式多目标决策模型的建立

将各目标模糊化处理，以解决多个目标间无法直接比较的问题，则定义线性满意度函数为：

$$u(F)=\begin{cases}0 & F\geqslant F^{max}\\ \dfrac{F^{max}-F}{F^{max}-F^{min}} & F^{min}<F<F^{max}\\ 1 & F\leqslant F^{min}\end{cases} \tag{15}$$

式中：$u(F)$ 为经济性满意度；F^{max} 和 F^{min} 分别为容量成本 F 的最大值和最小值。

同理，定义 $u(E_r)$ 和 $u(E_m)$。各目标越接近单目标优化下的最优值，求解结果越好，因此采用距离函数构建目标总体协调度为：

$$\rho=((u(F)-1)^2+(u(E_r)-1)^2+(u(E_m)-1)^2)^{\frac{1}{2}} \tag{16}$$

但 ρ 仅仅是一种物理上的客观距离，由于模糊处理导致了目标间相对重要性的无法区分，仅以 ρ 为决策目标可能会造成求解结果偏离决策者的主观意愿[20]，为此构建以下交互式决策模型。

$$\begin{cases}\min\ \rho\\ \text{s.t.}\quad u(F)\geqslant \underline{u}(F)\\ \qquad\ \ u(E_r)\geqslant \underline{u}(E_r)\\ \qquad\ \ u(E_m)\geqslant \underline{u}(E_m)\\ \qquad\ \ \text{式(10)—式(14)}\end{cases} \tag{17}$$

式中：$\underline{u}(\cdot)$为决策者满意度下限要求。

通过设定 $\underline{u}(\cdot)$，能够直接有效地体现出各目标的重要程度差别，实现对决策目标的“精确”控制。

4　模型求解

采用随机模拟方法校验备用中标结果是否满足 CCP 条件，具体过程可参照文献[19]进行。

文献[21]提出了一种高速收敛的改进粒子群(PSO)算法，结合随机模拟，本文采用该改进算法求解式(17)所示优化问题，约束条件采用罚函数方法处理，种群规模取 30，迭代次数取 400，学习因子 c_1 和 c_2 均取 0.5，惯性因子由 0.9 线性递减到 0.4，算法停滞变异条件依据不同竞价目标需要确定。本文竞价模型的具体求解流程见附录 A。

5　算例仿真

5.1　算例描述

算例中假设某竞价时段，$\widetilde{D}_L\sim N(1\ 520,25)$，$\alpha$ 取 0.85，日前市场上包含 16 台机组，附录 B 表 B1 给出了具体数据，同时假设该时段的 V2G 备用市场特征曲线 f_1 与 f_2 可拟合为线性函数 $\overline{P}_{EV}=0.2\overline{R}_{EV}+10$，$\overline{n}=333\overline{R}_{EV}$，$\overline{R}_{EV}^{max}$ 为 50 MW。由于 EV 数量庞大，为简化计算，因此将 EV 接入电网概率统一取为 0.8。

5.2　等效变换的蒙特卡洛模拟验证

假设有 1 000 辆 EV 中标，且 EV 经车载充/放电设备(慢充方式，充/放电功率一般小于 4 kW)接入电网，每辆 EV 放电功率在 1～4 kW 范围内随机产生，接入电网概率在[0,1]内随机产生。由此，计算得到 APC 的期望值 E_{APC} 与最大值 M_{APC} 分别为 1 255 kW 和 2 503 kW。

采用蒙特卡洛模拟方法模拟 10 000 次得到实际 APC 的概率分布如图 2 所示。由图 2 可以看出

实际 APC 近似为正态分布形状。图 2 中同时给出了由等效变换方法估计得到的 APC 概率密度曲线，其中，理想 EV 的 p_{all} 和 η_{all} 值分别为 0.501 和 2.503 kW，由此可以得到估计 APC 服从正态分布 $N(1\ 255, 1\ 566)$。附录 C 图 C1 给出了实际 APC、估计 APC 的累积概率值、累积概率分布函数。

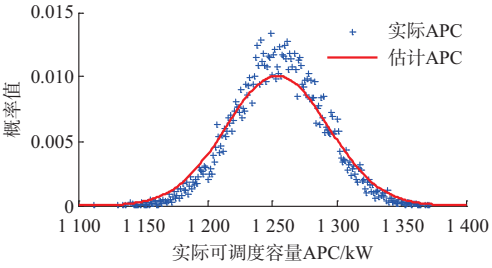

图 2　实际 APC 与估计 APC 概率值
Fig.2　Probability value of actual APC and approximated APC

由图 2 可以看出，估计 APC 非常接近实际 APC，即等效变换方法能够准确得出 APC 所服从的正态分布。附录 C 图 C2 和图 C3 给出了 2 个反例（违反等效变换规则 2 与规则 3）的仿真结果，该结果与前文理论分析相一致。当 3 条等效变换规则不满足时，估计结果出现了明显偏差。为了进一步验证方法的有效性，附录 C 图 C4 和 C5 分别给出了 EV 数量为 100 辆与多种放电方式下的仿真结果，从该结果来看，即使 EV 数量较少或放电功率跨度较大，等效变换方法仍能够保证很高的准确度。即使与文献[6]方法的仿真结果相对比，本文方法仿真结果的准确度也是很高的。

综上所述，相比于文献[6]和文献[9]中的 APC 正态分布确定方法，所提出等效变换方法能够快速得出 APC，并能够适应与粒子群优化（PSO）等启发式搜索算法相结合使用。

5.3　备用服务多目标竞价模型分析

附录 D 表 D1 给出了各单目标竞价及本文多目标竞价模型下的优化结果。从优化结果可知，仅追求经济性最优的传统竞价模式虽能实现备用购买成本 F 最小化，但也将导致较高的备用不足期望值 E_r 与碳排放量 E_m，即导致停运概率大、污染排放重的机组更多的中标，因此传统竞价模式无法实现各目标之间的平衡。另外，传统模式下 V2G 备用服务中标量仅为 15.2 MW，闲置了较多的 V2G 资源。

采用多目标竞价模式时，根据优化结果可以得到 $u(F)$，$u(E_r)$ 及 $u(E_m)$ 最优值分别为 0.61，0.55，0.68，实现了各目标间的兼顾与协调。此时，V2G 备用中标量为 35.8 MW，有效地利用了 V2G 资源。

由附录 D 图 D1 中的满意度迭代变化趋势可以看出，交互决策方法能够有效反映决策者的主观意愿。当对求解结果不满意或者不符合要求时，通过改变 $u(F)$，$u(E_r)$ 及 $u(E_m)$，最终可以得到理想的解。

5.4　V2G 备用影响分析

附录 D 表 D2 给出了不考虑 V2G 备用服务时各单目标竞价下的优化结果。

从优化结果可以看出：考虑 V2G 备用服务时的各目标最优值要优于不考虑时的最优值，同时，V2G 备用服务对各目标的改善程度是不同的，F，E_r，E_m 最优值降低的幅度分别为 1.9%，21.3%，22.0%。产生上述差异的原因在于：①为使 EV 参与 V2G 备用服务，需要付出较高的经济激励成本；②以 V2G 备用代替机组备用，可使 E_r 降低；③V2G 备用的直接碳排放效果为 0，以 V2G 备用代替机组备用，可使 E_m 降低。

由 APC 分布函数可以看出，p_{all} 直接影响 APC 所服从正态分布的均值与方差，进而影响 V2G 备用服务竞价，以购买成本 F 最小化为例分析这一影响，附录 D 图 D2 给出了不同 p_{all} 值下 V2G 备用中标量的敏感性分析结果。

由分析结果可以看出，V2G 备用服务中标量随 p_{all} 降低而减少，原因在于：尽管付出了较高的购买成本，但 EV 较高的违约率弱化了 V2G 备用服务的作用。由式(5)知，通过提高 EV 的实际接入电网概率，能够提高 E_{APC} 值，进而提高 p_{all} 值，因此为了充分利用 V2G 资源，有必要进一步分析 EV 接入概率的影响因素，尤其需要深入分析 EV 响应可靠性与经济惩罚之间的互动关系。

6　结语

本文在建立 V2G 备用市场交易机制基础上，提出了能够快速、准确确定 APC 所服从正态分布的等效变换方法，有效地反映了 EV 提供备用服务的不确定性。在此基础上构建了计及 V2G 的备用服务多目标竞价模型，有效地考虑了影响系统备用需求的随机性因素，同时实现了备用服务经济性、可靠性与碳减排多个目标的兼顾与协调。

EV 备用服务价格、接入电网概率是影响 V2G 备用服务效率的关键因素，设计能够激励 EV 可靠响应的奖惩机制仍是需要深入研究的问题。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参 考 文 献

[1] 蔡秋娜，文福拴，丁剑鹰，等.计及经济性、可靠性和排放因素的备用市场竞价模型[J].电力系统自动化，2012，36(8)：38-44.
CAI Qiuna，WEN Fushuan，DING Jianying，et al. A reserve market bidding model considering economics，reliability and emissions[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(8)：38-44.

[2] 丁明，齐先军，安玲.旋转备用市场中考虑可靠性的多目标分层决策[J].电力系统自动化，2007，31(13)：17-22.
DING Ming，QI Xianjun，AN Ling. The multi-objective and layered decision-making considering reliability in the market of spinning reserve[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(13)：17-22.

[3] 赵俊华，文福拴，杨爱民，等.电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J].电力系统自动化，2011，35(14)：2-10.
ZHAO Junhua，WEN Fushuan，YANG Aimin，et al. Impacts of electric vehicles on power system as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(14)：2-10.

[4] KEMPTON W，TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals：calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Source，2005，144(1)：268-279.

[5] 陆凌蓉，文福拴，薛禹胜，等.电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J].电力系统自动化，2013，37(14)：43-49.
LU Lingrong，WEN Fushuan，XUE Yusheng，et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(14)：43-49.

[6] HAN S，HAN S，SEZAKI K. Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation：case studies for market participation[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2011，2(4)：632-641.

[7] 刘晓，艾欣，杨俊.考虑未来碳排放交易的需求侧备用竞价与调度模式设计[J].电力系统自动化，2011，35(2)：38-42.
LIU Xiao，AI Xin，YANG Jun. Design of demand side reserve bid-scheduling strategy considering future carbon emission trading[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(2)：38-42.

[8] 施泉生，李士动.含碳捕集电厂的低碳备用市场竞价模型与碳捕集水平风险决策[J].电网技术，2014，38(11)：2999-3005.
SHI Quansheng，LI Shidong. Low-carbon reserve market bidding model and decision-making analysis incorporating carbon capture power plant[J]. Power System Technology，2014，38(11)：2999-3005.

[9] 赵俊华，文福拴，薛禹胜.计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J].电力系统自动化，2010，34(20)：22-29.
ZHAO Junhua，WEN Fushuan，XUE Yusheng. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(20)：22-29.

[10] 鲍谚，姜久春，张维戈，等.电动汽车移动储能系统模型及控制策略[J].电力系统自动化，2012，36(22)：36-43.
BAO Yan，JIANG Jiuchun，ZHANG Weige，et al. Model and control strategy of electric vehicle mobile energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(22)：36-43.

[11] 李高望，钱斌，石东源，等.含插电式混合动力汽车的机组组合问题[J].电网技术，2013，37(1)：32-38.
LI Gaowang，QIAN Bin，SHI Dongyuan，et al. Unit commitment problem considering plug-in hybrid electric vehicle[J]. Power System Technology，2013，37(1)：32-38.

[12] 黄媛，刘俊勇，陈井锐，等.计及电动汽车入网的负荷频率控制[J].电力系统自动化，2012，36(9)：24-28.
HUANG Yuan，LIU Junyong，CHEN Jingrui，et al. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(9)：24-28.

[13] 鲍谚，贾利民，姜久春，等.电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J].电工技术学报，2015，30(11)：115-126.
BAO Yan，JIA Limin，JIANG Jiuchun，et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(11)：115-126.

[14] 张谦，史乐峰，任玉珑，等.计及 V2G 备用服务的交易模式[J].中国电机工程学报，2012，32(31)：59-67.
ZHANG Qian，SHI Lefeng，REN Yulong，et al. The reserve trading model considering vehicle-to-grid reserve[J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(31)：59-67.

[15] BESSA R J，MATOS M A，SOARES F J，et al. Optimized bidding of a EV aggregation agent in the electricity market[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2012，3(1)：443-452.

[16] VAGROPOULOS S I，BAKIRTZIS A G. Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(4)：4031-4041.

[17] ANSARI M，AL-AWAMI A T，SORTOMME E，et al. Coordinated bidding of ancillary services for vehicle-to-grid using fuzzy optimization[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2015，6(1)：261-270.

[18] SOOHYEONG J，SEKYUNG H，SOO H，et al. Optimal decision on contract size for V2G aggregator regarding frequency regulation[C]// 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment，May 20-22，2010，Brasov，Romania：54-62.

[19] 葛炬，王飞，张粒子.含风电场电力系统旋转备用获取模型[J].电力系统自动化，2010，34(6)：32-36.
GE Ju，WANG Fei，ZHANG Lizi. Spinning reserve model in the wind power integrated power system[J]. Automation of Electric Power Systems，2010，34(6)：32-36.

[20] 刘文颖，谢昶，文晶，等.交互式输电网检修计划多目标决策方法[J].电网技术，2013，37(2)：471-476.
LIU Wenying，XIE Chang，WEN Jing，et al. Multi-objective decision making method for maintenance scheduling of transmission network[J]. Power System Technology，2013，37(2)：471-476.

[21] 朱海梅，吴永萍.一种高速收敛粒子群优化算法[J].控制与决策，2010，25(1)：20-24.
ZHU Haimei，WU Yongping. A PSO algorithm with high speed convergence[J]. Control and Decision，2010，25(1)：20-24.

李士动（1989—），男，通信作者，硕士，主要研究方向：电动汽车接入电网、电力系统运行优化。E-mail：lsd.yes@163.com

施泉生（1961—），男，教授，主要研究方向：电力经济与管理科学。

赵文会（1977—），女，博士，教授，主要研究方向：电力能源经济、系统分析与优化。

（编辑　顾晓荣）

A Multi-objective Optimization Based Bidding Model with Vehicle-to-grid Reserve Provision Considered

LI Shidong[1], *SHI Quansheng*[2], *ZHAO Wenhui*[2], *YU Jinlong*[3], *YU Haoming*[4]

(1. State Grid Taian Power Supply Company, Taian 271000, China;
2. College of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
3. State Grid Huangshan Power Supply Company, Huangshan 245000, China;
4. State Grid Yantai Power Supply Company, Yantai 264000, China)

Abstract: The provision of vehicle-to-grid (V2G) reserve and the optimal allocation of reserve resources is studied. Firstly, the market trading mechanism of V2G reserve is developed, on the basis of which a kind of equivalent transformation capable of exactly estimating the real-time available power capacity of V2G is proposed. Secondly, chance constrained programming is adopted to reflect such stochastic factors as load fluctuation, unit outage and V2G output errors, and a bidding model considering economics, reliability and carbon emission is developed. Thirdly, an interactive optimization method is used to deal with the multi-objective model, which is solved by an advanced particle swarm optimization algorithm combined with stochastic simulation. Finally, simulation is conducted, and the results show the validity of the equivalent transformation method as well as the multi-objective reserve bidding model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71403163).

Key words: reserve service; bidding; electric vehicles; equivalent transformation; chance constrained programming; multi-objective optimization; stochastic simulation