B2G模式下电动汽车与燃气轮机的调峰分析

针对目前电动汽车与电网互动的随机性、移动性等诸多问题，提出了一种基于Battery to Grid（B2G）模式的电动汽车与燃气轮机调峰的合作博弈模型。通过参与电力公司日前调度的方式，根据电站以及燃气轮机的实时运行情况，以电动汽车运营商和燃气轮机构成的大联盟经济效益与环境效应综合最优为目标，实现大联盟收益最高，采取均分策略、Shapley值策略和等MDP值策略对收益进行分配，求解出在满足策略稳定情况下最优分配方式。算例分析表明，Shapley值策略、等MDP值策略实现了参与调峰下收益在参与者之间的合理分配，满足了个体理性与整体理性，保证了联盟的稳定性，同时也有效降低了参与者各自的运行成本，对系统起到了削峰填谷的作用。

钟奎鑫　王德意　杨国清　付　菁/西安理工大学水利水电学院

钟奎鑫/硕士研究生

关键词/Keywords
B2G·
燃气轮机·
合作博弈·
调峰·

0　引言

目前，V2G作为电动汽车参与电网互联的主要手段，已有较多文献对其进行了研究，其中文献[1-2]就电动汽车广泛接入电力系统后机组最优组合问题进行了研究。文献[3]建立了以电网总负荷波动最小为目标，以满足用户充放电时间需求等行为约束下的电动汽车参与V2G最优峰谷电价模型。文献[4-6]则从微电网的角度入手，分别研究了电动汽车充换电模式的运行优化、最优的经济调度方式以及针对“V2G可用容量”概念提出了各集群V2G可用容量的实时评估模型。文献[7]提出了一种计及V2G备用服务的备用交易新模式，并基于顺序投标法给出了具体求解方法。文献[8]提出了一种基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度模型，通过负荷聚合商参与需求侧放电竞价可以起到削峰填谷的作用。文献[9]给出了含电动汽车与风电机组的虚拟发电厂的竞价策略。文献[10-11]则从博弈的角度出发，研究了电动汽车代理商的竞争及定价策略。

然而，V2G是以强调电动汽车整体为研究对象的运行方式，将充放电主体默认为车辆本身，但考虑到V2G电动汽车本身具有的随机性以及接入点的不确定性，作为分布式电源参与电网势必会造成电网潮流的复杂变化，由此文献[12]在V2G的基础上提出了B2G的概念，将电动汽车与动力电池进行了解耦，讨论了B2G的运营、管理和技术等方面的挑战及解决方法。而文献[13]在其基础上探讨了B2G模式下电动汽车参与电网调互动的运行策略。文献[14]采用粒子群算法对含有分布式电源和B2G模式下电动汽车的配电网进行重构研究。

由于风电、电动汽车等分布式电源大规模接入电网等多重因素的影响，我国电力峰谷差正逐年增大，目前常用的调峰电源之一为燃气轮机，其具备起停迅速、体积小、成本低和效率高等特性。文献[16]研究了电力市场环境下燃气轮机调峰交易模式，并在此基础上分析了调峰合约的实施过程。

以B2G模式为基础，引入古诺模型合作博弈理论，在充分考虑双方经济与环境成本效益的基础上，建立了以电站与燃气轮机联盟收益最大为目标的容量配置模型，采用均分策略、Shapley值分配策略和等MDP分配策略进行收益分配。最后通过数据分析，验证了模型的合理性。

1 电动汽车B2G模式

B2G模式是指集中充电下的动力电池直接参与电网的能量交互，将电池与电动汽车解耦，取代整车充电方式。其中最主要的特点体现在三个方面：资产关系的解耦、时间解耦和地点解耦。

在V2G模式下，实现有序充放电调度需要考虑大量不确定因素，因此只能借助政策手段以及需求侧管理的方法去引导用户实现有序充放电管理，但因此需要克服的技术难度与成本都是非常巨大的。而在引入B2G模式后，大量的电池将直接由电站所管理，可以直接参与到电网互动运行中，其中上级电网调度对于运营商可调度信息以及预测准确度都将提升到一个很高的档次，省去了许多不必要的技术管理成本。

在电站参与电网互动时，应充分考虑未来换电所需要的电池总量，以及备用电池数量与更换后电池的剩余电量作为该时刻下电站内电池存储的电量，即

$$Q_i(t)=Q_i(t-1)+P_{ev}(t-1)\Delta t-wD(t-1)+L(t-1) \tag{1}$$

$$P_{ev}(t)=P_{ev}^{c}(t)\eta_c-\frac{P_{ev}^{d}(t)}{\eta_d} \tag{2}$$

式中，$Q_i(t)$为t时刻站内电池可调度电量电量；$D(t)$为t时段换电池数量需求（将（t，$t-1$）时段内的换电池需求归算到t时刻）；$L(t)$为t时刻换下电池的剩余电量；w为换下的电池组的额定容量；$P_{ev}^{c}(t)$、$P_{ev}^{d}(t)$分别为t时段内换电站注入和吸收电网的功率；η_c、η_d分别为换电站充、放电效率。

采用日前调度与实时调度计划模型，通过电力公司公布次日某时段所需调度容量，根据自身运行情况作出调整，申报参与调度的容量，并从中获取相应的报酬。电站通过合理的手段引导用户的换电需求，并且及时根据电池情况作出相应的更换与维护。同时，电力公司将根据电站执行情况进行结算与考核，当电站出力大于或等于调度计划按照调度计划结算，但倘若小于调度计划将按实际出力结算，如若超过最大调度偏差，电力公司将会对其进行处罚。

2 模型建立

由于合作博弈模型是考虑联盟的收益最大化，为此将燃气轮机与电站整体构成一个联盟，并设定其目标函数为

$$F_{总}=F_{气}+F_{电} \tag{3}$$

式中，$F_{气}$为燃气轮机的总收益；$F_{电}$为电站的总收益。

其约束条件满足双方各自的约束条件。下面分别对燃气轮机与电站的模型进行讨论。

2.1 燃气轮机

（1）目标函数

以燃气轮机经济与环境收益最高为目标函数，影响该目标函数的主要因素是燃气轮机的发电成本，以参与调度时段内所有燃气轮机运行成本与CO_2排放量之和为燃气轮机的总发电成本，最小目标函数可表示为

$$\min F=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\{\Delta TC_{f,i}[P_i(t)]+C_{s,i}(t)+C_{e,i}[P_i(t)]\} \tag{4}$$

式中，$C_{f,i}[P_i(t)]$为第i台燃气轮机t时段的燃料成本函数；$C_{s,i}(t)$为第i台燃气轮机t时段的起停成本函数；$C_{e,i}[P_i(t)]$为第i台燃气轮机t时段的CO_2排放量函数；$P_i(t)$为第i台燃气轮机t时段的出力；N为燃气轮机总数；T为总优化时段。

1）燃气轮机燃料成本为

$$C_{f,i}[P_i(t)]=a_i+b_iP_i(t)+c_iP_i^2(t) \tag{5}$$

式中，a_i、b_i和c_i为第i台燃气轮机燃料成本系数。

2）燃气轮机起停成本为

$$C_{s,i}(t)=(C_s+t_g\Delta C_s)n_{tv} \tag{6}$$

式中，C_s为燃气轮机的单位起停成本；t_g为燃气轮机在关停前的等效发电时间；ΔC_s为燃气轮机与火电机组单位电量发电成本的差值；n_{tv}为需投入有偿调峰的时段总数。

3）燃气轮机CO_2排放量为

$$C_{e,i}[P_i(t)]=\alpha_i+\beta_iP_i(t)+\gamma_iP_i^2(t) \tag{7}$$

式中，α_i、β_i和γ_i为第i台燃气轮机碳排放系数。

（2）约束条件

1）燃气轮机出力限制为

$$P_{i,\min}\leqslant P_i\leqslant P_{i,\max} \tag{8}$$

式中，$P_{i,\min}$为第i台燃气轮机的出力下限；$P_{i,\max}$为第i台燃气轮机的出力上限。

2）起停机时间约束为

$$\sum_{k=t-T_i^{su}+1}^{t} u_{i,k}^{su} \leqslant u_{i,t} \tag{9}$$

$$\sum_{k=t-T_i^{sd}+1}^{t} u_{i,k}^{sd} \leqslant 1-u_{i,t} \tag{10}$$

式中，$u_{i,k}^{su}$与$u_{i,k}^{sd}$为燃气轮机i的开、停机量；T_i^{su}、T_i^{sd}分别为燃气轮机i的最小开、停机时间。

3）燃气轮机爬坡率限制为

$$-P_i^{rd}(t) \leqslant P_i(t)-P_i(t-1) \leqslant P_i^{ru}(t) \tag{11}$$

式中，$P_i^{rd}(t)$为燃气轮机i的最大下调有功功率；$P_i^{ru}(t)$为燃气轮机i的最大上调有功功率。

2.2 B2G模式下电动汽车模型

考虑到电站为电池充电问题，国内外主要采用的两种方式分别为功率连续调节方式与通断控制方式。本文采用后者即通断控制方式作为电站为电池的充电手段，具体运行方式为：电站为电池充电仅有0与1两种状态，充电状态下，充电机以额定功率P进行充电。同时考虑在B2G模式下电站运营商采用统一的电池进行置换与维护，当前国内绝大多数电动汽车使用锂电池，因此本文将采用锂电池，并认为充换电电站内电池冗量足以满足其基本需求且能够参与调度。

（1）B2G模式下电站实时调度偏差

假设电站i获得的次日t时段调峰容量为$H_i(t)$，根据式（1）所示电站在t时刻可调度容量为$Q_i(t)$，则电站i在t时段内放电量与日前调度计划下的的偏差为

$$e_i(t)=H_i(t)-Q_i(t) \tag{12}$$

（2）B2G模式下的电站成本

电站参与调度下的成本模型为

$$F_2(i)=C_{el}+C_{bl}+C_{wl} \tag{13}$$

式中，C_{el}为电动汽车充放电过程中的电能损失成本；C_{bl}为充放电过程中的电池寿命损耗折算成本，元/kW·h；C_{wl}为年固定成本。

1）电能损失的成本为

$$C_{el}=p_c\left(\frac{1}{\eta_c\eta_d}-1\right) \tag{14}$$

式中，p_c为电动汽车的充电电价。

2）电池损耗成本为

$$C_{bl}=\sum_{t=1}^{T} C_{dis}\frac{E[P_{ev}^{d}(t)]}{\eta_d}\Delta t \tag{15}$$

$$C_{dis}=\frac{0.042\text{美元}/\text{MW}\cdot\text{h}}{5000\text{美元}}C_{bat}\times 10^3 \tag{16}$$

式中，$E[P_{ev}^{d}(t)]$为电池放电功率的函数；C_{bat}为电池购买成本。

（3）目标函数

电站的收入根据参与电力公司日前调度计划的完成情况进行结算，其中电力公司允许的最大调度偏差为$\delta_{\max}$，当超过最大值将会予以罚款，设超出部分的罚款为μ，则电站的收入分为两种情况。

1）当$Q_i(t)\geqslant H_i(t)$时

$$F_1(i)=\sum_{t=1}^{M} P_{mp}(t)H_i(t)\Delta t \tag{17}$$

2）当$Q_i(t)<H_i(t)$时

$$F_1(i)=\sum_{t=1}^{M} P_{mp}(t)Q_i(t)-\mu\delta_i(t)\Delta t \tag{18}$$

$$\delta_i(t)=\max\{0,[e_i(t)-\delta_{\max}]\} \tag{19}$$

式中，$P_{mp}(t)$为t时段的需求侧边际成本；$\delta_{\max}$为竞价成功者中的最高报价；Δt为时段间隔。

此处以电站收益最大为目标函数对电站进行实时调度，即

$$\max F(i)=F_1(i)-F_2(i) \tag{20}$$

（4）约束条件

约束条件包括

1）电站容量约束为

$$Q_{i,\min} \leqslant Q_i(t) \leqslant Q_{i,\max} \tag{21}$$

式中，$Q_{i,\min}$为电站的负荷调整容量下限；$Q_{i,\max}$为电站的负荷调整容量上限。

2）电站调度允许时间为

$$T_{Ld,\min} \leqslant T_{Ld,i} \leqslant T_{Ld,\max} \tag{22}$$

式中，$T_{Ld,i}$为负荷的调度允许时间；$T_{Ld,\min}$为负荷最小调度允许时间；$T_{Ld,\max}$为负荷最大中断允许时间。

3）荷电状态约束为

$$S_{\min} \leqslant S_i(t) \leqslant S_{si} \tag{23}$$

式中，$S_{\min}$为允许的最小荷电状态，一般取0.2。

第i辆电动汽车在t时刻的荷电状态如下。

充电状态为

$$S_i(t) = S_i(t-1) + [\eta_c P_{ev}^c(t-1)\Delta t]/V_{Ci} \tag{24}$$

闲置状态为

$$S_i(t) = S_i(t-1) \tag{25}$$

放电状态为

$$S_i(t) = S_i(t-1) + [-P_{ev}^d(t-1)\Delta t]/(\eta_d V_{Ci}) \tag{26}$$

式中，V_{Ci}为第i辆电动汽车的电池容量。

3 基于合作博弈的最优分配

在当前电力市场的大环境下，博弈论作为解决混合电力系统规划分配问题具有得天独厚的优势。合作博弈作为博弈论的一个分支，主要研究博弈参与者之间的联盟形式和通过联盟所获得效用的分配。文献[15]对于混合电力系统下合作博弈规划的分配策略作了较为详细的研究，并通过具体算例证实了其合理性。

与非合作博弈不同，合作博弈更关注于联盟之间的合作与讨价还价的过程，以及分配大联盟所得到的收益。所探讨的合作博弈均是支付可转移的合作博弈。

在实际应用中，对于混合电力系统合作博弈收益的分配，主要有以下三种典型的分配策略。分别为均分策略、Shapley值分配策略和等MDP分配策略。接下来将具体分析这三种分配策略的分配方式与特点。

3.1 均分策略

均分策略即指参与分配的所有个体均可平均分配联盟收益，即

$$x(W) = x(B) = \frac{v(\{W,B\})}{2} \tag{27}$$

3.2 Shapley值分配策略

按容分配是指参与分配的个体以其所占容量的比例进行分配，即

$$x(W) = \frac{v(\{W,B\}) + v(\{W\}) - v(\{B\})}{2} \tag{28}$$

$$x(B) = \frac{v(\{W,B\}) + v(\{B\}) - v(\{F\})}{2} \tag{29}$$

3.3 等MDP分配策略

对于大部分分配策略而言，MDP值越小越好，但实现这一条件又是极为苛刻的，所以采用MDP值等分的方式进行分配

$$x(W) = \frac{\overline{x}(W)}{\overline{x}(W) + \overline{x}(B)} v(W,B) \tag{30}$$

$$x(B) = \frac{\overline{x}(B)}{\overline{x}(W) + \overline{x}(B)} v(W,B) \tag{31}$$

式中，$\overline{x}(B) = v(W,B) - v(W)$；$\overline{x}(W) = v(W,B) - v(B)$。

4 算例分析

4.1 算例数据

以某市参与电网调度电站与燃气轮机为例，设该地区有两台轻型燃气轮机参与电网调峰。由文献[16]可知，单位起停成本为520元/MW，燃气轮机与火电机组单位电量发电成本差值为0.267元/kW·h。

电站主要服务对象为电动出租车，采用换电模式进行电池更换。设该市可调用电池数量为10 000块，一辆电动汽车电池组由5块锂电池构成，每块锂电池容量为5 kW·h。锂电池最大充放电功率为3 kW，平均充放电效率为0.95。

根据文献[17]所研究的电动汽车电池损耗成本与电池替代成本之间的关系，规定替代成本为5 000美元的电池组电池损耗成本为0.042美元/kW·h。单位电池购买成本为400美元/kW·h，电站固定成本折算成单位电能固定成本价格为0.074元/kW·h。

规定电站从电网购电采用国内工业用电分时电价的形式，对用户的充电费用收取，实行统一的充电电价，具体数据如表1所示。

表1 电站充换电电价

时段	峰谷电价/(元/kW·h)	换电价格/(元/块)
峰时段	0.61	4
平时段	0.42	4
谷时段	0.3	4

4.2 电力公司日前调度计划制定

假设电站与燃气轮机都参与了电力公司的日前调度，此时电力公司为了缓解电力不平衡问题，确保电网安全可靠运行，向参与调度方购买电能。

根据负荷曲线，电力公司公布次日9：30～11：30需要参与者介入调峰，将其分为八个时段，各时段所需投入的调峰量分别为75 MW、80 MW、85 MW、90 MW、95 MW、90 MW、85 MW和80 MW，其中调度计划允许最大偏差值δ_{max}=0.1 MW，超出部分罚款为μ=2 000元/MW·h。

4.3 结果分析

电站与燃气轮机可以看作博弈的双方，对比分析了古诺模型与合作博弈理论下双方的优化结果。

当采取双寡头古诺模式参与调峰，由文献[18]的方法可求得出力分配，如表2所示。各时段博弈的双方均实现了自身利益最大化，但从联盟的角度出发，在这八个时段的总体收益仅为57 987.45元。为了实现联盟收益的最大化，采取合作博弈的方式进行研究。

表2 分配策略

时段	燃气轮机/MW	电站/MW
9：30～9：45	54.20	20.80
9：45～10：00	57.82	23.68
10：00～10：15	60.43	24.57
10：15～10：30	65.04	24.96
10：30～10：45	68.66	26.34
10：45～11：00	65.04	24.96
11：00～11：15	60.43	24.57
11：15～11：30	57.82	23.68

首先，将电站与燃气轮机看作一个联盟，考虑到电站与燃气轮机的出力阈值，以及未完成调度出力要求的惩罚因素，得到合作博弈下的纳什均衡解及相应的收益，与古诺模型下的分配方式进行比较，如表3所示。在采取合作博弈计算中，由于计及了双方的成本，加大燃气轮机的出力实现了总成本的减少，虽然电站分配的调峰容量有所减少，但联盟的总收益上升了4 111.03元，从联盟的角度出发，合作博弈才是资源利用效率最高的分配方式。

表3 合作博弈下的分配方式与收益

	燃气轮机分配总容量/MW	电站分配总容量/MW	燃气轮机不转移收益/元	电站不转移收益/元	总收益/元
合作博弈模式	546.4	133.6	45 329.14	16 769.34	62 098.48
古诺模式	486.44	193.56	39 832.2	18 155.25	57 987.45

由于所研究的合作博弈属于支付可转移的联盟型博弈，所以如何分配联盟所获得的收益才是所关心的问题，为此提出了以下三种分配策略，并通过计算分别求出了三种分配策略下的收益与MDP值，如表4所示。

表4 三种分配策略下的收益与MDP值

策略	参与者得到的总收益/元		MDP值	
均分策略	31 049.24	31 049.24	1.42	0.18
Shapley值	35 048.35	27 050.13	0.65	0.39
等MDP值	35 311.92	26 786.92	0.51	0.51

均分策略下参与者得到了等值的收益分配，其中燃气轮机的MDP值达到1.42，而电站的MDP值更是小于零。显然该分配策略下会因燃气轮机一方的拒绝而使联盟变得极为不稳定，且不满足联盟理性，所以均分策略不属于核心的集合，是一种不稳定的策略。

Shapley值分配策略是当下合作博弈较为常见的一种分配策略，等MDP值分配策略则是通过限制MDP值大小来控制参与者对于分配策略的喜好程度。由表4可以看出，两者的MDP值均大于零且小于1，其中电站与燃气轮机的收益相较于之前均有了一定提升，满足个体理性，整体理性以及联盟理性。所以这两种分配策略是参与者均可接受的稳定策略，属于集合中的元素。

采取合作博弈对电站与燃气轮机进行实时调度后，电网的负荷曲线也发生了相应的变化，如下图所示。通过电站与燃气轮机合作参与调峰，可以起到削峰的作用。

5 结束语

基于V2G模式下电动汽车参与电网互动模型复杂，具有变量难以控制等诸多问题。采用将电

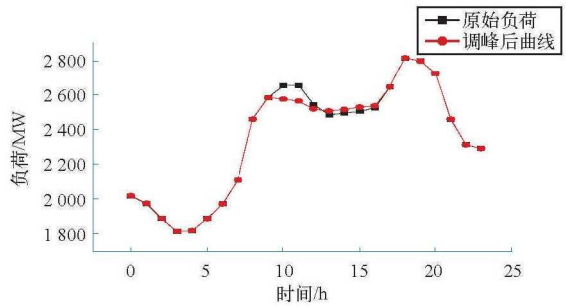

图 负荷曲线

池与电动汽车解耦的B2G运行模式，有效回避了电动汽车充放电时间的随机性，充电地点不确定性等问题。提出了一种基于B2G模式下电动汽车与燃气轮机调峰的合作博弈模型。通过日前调度的方式，结合电站以及燃气轮机的实时运行情况，以电动汽车运营商与燃气轮机构成的大联盟经济效益与环境效应综合最优为目标，求解出了合作博弈下收益的最优分配方式。通过算例分析不难看出，相较于各自为政的运行方式，以电站和燃气轮机构成的大联盟有效降低了运营成本，增加了联盟与个体的收益，实现了调峰资源的优化配置，缓解了负荷峰值曲线，起到了削峰填谷的作用。

参考文献

[1] 张舒，胡泽春，宋永华，等．考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (10)：49-55．

[2] 陆凌蓉，文福拴，薛禹胜，等．计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合 [J]．电力系统自动化，2011，35 (21)：16-20．

[3] 项顶，宋永华，胡泽春，等．电动汽车参与V2G的最优峰谷电价研究 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (31)：15-25．

[4] 张晓波，张保会，董梁，等．微电网中电动汽车充电模式与换电模式的运行优化 [J]．电力系统自动化，2016，40 (9)：56-63．

[5] 王璟，王利利，郭勇，等．计及电动汽车的微电网经济调度方法 [J]．电力系统保护与控制，2016，44 (17)：111-117．

[6] 翁国庆，张有兵，戚军，等．多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估 [J]．电工技术学报，2014，29 (8)：36-45．

[7] 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．

[8] 潘樟惠，高赐威，刘顺桂．基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度研究 [J]．电网技术，2016，40 (4)：1140-1146．

[9] 杨甲甲，赵俊华，文福拴，等．含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略 [J]．电力系统自动化，2014，38 (13)：92-102．

[10] 李牧青，宋依群，严正，等．电动汽车代理商的博弈竞争模型和算法研究 [J]．电网技术，2014，38 (6)：1512-1517．

[11] 魏韡，陈玥，刘锋，等．基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理 [J]．电网技术，2015，39 (4)：939-945．

[12] 薛飞，雷宪章，张野飚，等．电动汽车与智能电网从V2G到B2G的全新结合模式 [J]．电网技术，2012，36 (2)：29-34．

[13] 刘海璇，曾平良，马军，等．基于B2G模式下电动汽车参与电网互动运行策略 [J]．电力建设，2015，36 (7)：126-132．

[14] 卞栋，马俊毅，黄薛凌．考虑电动汽车B2G模式和分布式电源的配电网重构模型 [J]．智能电网，2016，4 (1)：33-38．

[15] 王莹莹，梅生伟，刘锋．混合电力系统合作博弈规划的分配策略研究 [J]．系统科学与数学，2012，32 (4)：418-428．

[16] 王娟娟，吕泉，李卫东，等．电力市场环境下燃气轮机调峰交易模式研究 [J]．电力自动化设备，2014，31 (1)：48-54．

[17] Peterson S B，Whitacre J F，Apt J．The economics of using plug-in hybrid electricvehicle battery packs for grid storage [J]．Journal of Power Sources，2010，195 (8)：2377-2384．

[18] 刘连光，刘鸿熹，刘自发，等．基于古诺模型的风火电合作容量优化 [J]．中国科学：技术科学，2016，46 (5)：467．

（收稿日期：2017－04－26） EA