基于V2G的充放电站建模及运行策略研究

目前大部分关于V2G技术的研究都是针对电动汽车侧或电网侧的，而对于电动汽车和电网之间的充放电站侧的研究则较少。在分析充放电站建模的五个要素前提下对考虑V2G的充放电站进行建模，并给出其V2G容量及充放电量计算模型。然后针对V2G模式下充放电站运行研究一种基于双荷电状态临界的V2G策略，并通过对比充放电站运行在无序充电策略和基于双荷电状态临界的V2G策略下的充放电量和充放电费用，验证基于双荷电状态临界的V2G策略有效性。

张宏伟　张向锋　文传博／上海电机学院电气学院

张宏伟／硕士研究生

关键词／Keywords

V2G·
电动汽车·
充放电站·

0　引言

随着电动汽车数量逐渐达到一定规模[1]，电动汽车大规模入网给电力系统的稳定运行带来不可忽视的影响[2-3]。首先，其充电地点的分散性、充电时间的随机性和充电频率的变化等，使得电网对这些负荷难以预测和控制；其次，由于电动汽车充放电的随机性和不确定性，其接入后将对电网装机容量及变压器运行能力等提出更高的要求[2-4]。

为了减小大量电动汽车充放电对电网的影响，V2G(Vehicle to Grid)技术应运而生。V2G的核心思想是利用电动汽车自带的储能电池为电网和微电网提供电能缓冲，电动汽车既可以在用电低谷时从电网中吸收能量，同时，其动力电池也可作为储能系统，在电网负荷离峰时段，反向供电，实现电动汽车与电网能量互动。

目前关于V2G技术已有一些研究。文献[5-6]利用V2G 技术帮助电网系统调峰、调频和经济运行。文献[7]考虑了用户起始充放电时刻的Poisson分布特性，基于经济学理论提出了电动汽车放电需求函数。文献[8]定义了“V2G可用容量”概念，同时研究了引入私家 EV 电池群集、公交 EV 电池集群和梯次利用EV电池集群参与微网V2G服务的方案。文献[9]在考虑电动汽车用户的充电需求、动力电池的充电约束和传输线的功率约束的基础上，以配电网负荷曲线波动方差最小为目标，构建了优化分析模型。文献[10]提出了考虑放电模式的单台电动汽车迟滞控制模型。在此基础之上，研究一种基于迟滞控制模型的集群电动汽车参与实时需求响应的V2G 控制策略。文献[11]提出了基于优先级的集群电动汽车实时需求响应控制策略。文献[12]提出了一种电动汽车V2G放电负荷时空分布预测方法。以城市停车需求预测模型为基础，分析了工商业区和居住区内电动汽车在时空上的停放分布特性。文献[13]研究了停车场应用场合下，电动汽车用户V2G运行如何实现收益最大化的问题。文献[14]提出一种V2G模式下计及开断概率和负荷转移概率的配电网可靠性评估算法。文献[15]在充分考虑电V2G作用前提下，建立合理的电价机制，引导电动汽车用户在负荷高峰期合理有序地充放电。文献[16]总结了大规模电动汽车接入对配电网的影响，同时从市场、服务以及存在的挑战等几方面对V2G技术做了详细介绍。文献[17]系统地总结了电

动汽车接入对电源发展、电网运行和充电设施影响，并分析了电动汽车V2G的研究现状和应用难点。

充放电站是电动汽车充放电的主要场所，也是电动汽车和电网之间实现V2G的重要媒介。然而，目前有关V2G技术的研究大多数是针对电动汽车侧的，而有关充放电站方面的研究又主要针对充放电站的选址定容[18-21]、运营模式[20]和入网[22]等方面，而对充放电V2G模式下的建模和充放电策略方面研究较少。

与受诸多不确定因素影响的电动汽车侧相比，充放电站侧充放电量更大，且更具规律性，尤其是当充放电站具备一定规模的时候，充放电站进行V2G调度对电网削峰填谷效果更好。本文将对充放电站的建模要素进行分析，研究充放电站V2G容量和充放电量的计算模型，并提出基于双荷电状态临界的充放电站V2G策略，通过与无序充电策略的对比，验证该策略的有效性。

1 充放电站建模的要素分析

1.1 充放电站的性质

根据停车场所服务对象的不同，可将停车场分为以下几个类型。

1）居民区停车场。这类停车场主要是服务于小区的居民业主或者租户等。

2）机关单位或企业的停车场。这类停车场主要服务于上班族。

3）服务性行业停车场（服务性行业例如酒店、餐馆、网吧、酒吧和电影院等）。这类停车场主要服务于进行购物、娱乐和消遣的人们。

这三类停车场使用情况有明显的差异：由于人们大部分遵守白天上班，晚上回家的生活规律，居民区停车场和机关单位或企业的停车场都有明显的昼夜特征。服务性行业停车场使用情况则与其他两种停车场不同，尽管白天服务性行业停车场使用率会比夜晚服务性行业停车场使用率稍高，但之间差距较小，远没有其他两种停车场那么大。图1为某地区三种不同类型停车场的停车位使用情况[23]。

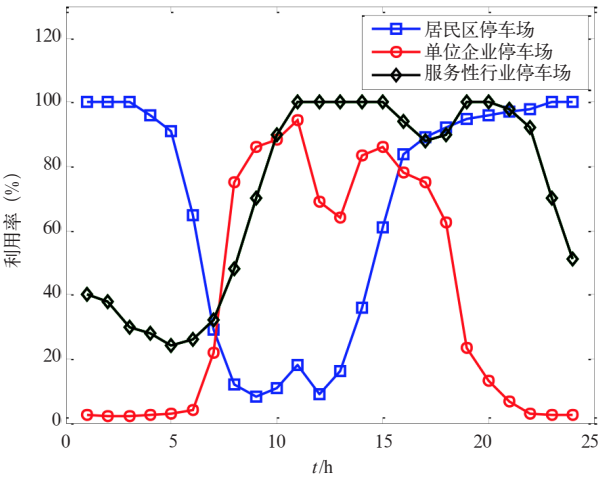


图1 某地区三种不同类型停车场的停车位使用率

与停车场类型划分相似，把充放电站分为：居民区充放电站、机关单位或企业的充放电站和服务性行业充放电站。这些不同类型的充放电站的使用特点与上述讨论的停车场使用特点相同。

1.2 站内进行充放电的电动汽车数量

站内进行充放电的车辆数决定着充放电站电动汽车V2G的容量，为方便建模，进行如下假设：①假设每一辆停在含充电桩的停车位的电动汽车都会立即进行充放电；②含充放电桩的停车位与其所处的停车场停车位使用率相等；③含充放电桩的停车位只能被电动汽车使用。

通过以上假设，即可计算得某时刻充放电站内进行充放电的电动汽车数量，计算公式为

$$evCarMum_i(t)=total_stop\eta\beta(t) \quad (1)$$

式中，evCarMum(t)为t时刻该充放电站内进行充放电的电动汽车数量；total_stop为该停车场总的停车位数量；η为该停车场内含充放电桩的停车位数量占总停车位数量的百分比；$\beta(t)$为该时刻停车场内停车位使用率。

1.3 站内进行充放电的电动汽车的电池容量及充放电功率

电动汽车的电池容量及充放电功率与该电动汽车的参数有关，目前市场上几种常见的电动汽车参数如表1所示。

表1 几种常见的电动汽车型号及参数

指标	特斯拉 MODELS70	日产 Altra	日产 leaf	荣威 E50	比亚迪 E6
电池容量/kW·h	70	33	24	18	60
百公里耗能/(kW·h/100 km)	15.5	14.2	12	10	19.5
续航能力/km	420	200	161	180	300
常规充电功率/kW·h	8.75	5	4.8	3.6	12

假设以上五种电动汽车出现在停车场的概率相等，则可得某一时刻停车场内不同类型的电动汽车数量及总的电池容量，计算公式分别为

$$\mathrm{evCarNum}_i(t)=0.2\mathrm{evCarNum}(t)\quad i\in\{1,2,3,4,5\} \tag{2}$$

$$\mathrm{total_battery}(t)=\sum_{i=1}^{5}\mathrm{evCarNum}_i(t)C^i_{\mathrm{battery}}\quad i\in\{1,2,3,4,5\} \tag{3}$$

式中，i为电动汽车的种类，电动汽车从表1中选择；$\mathrm{evCarMum}_i(t)$为t时刻停车场内第i种电动汽车的数量；C^i_{battery}为第i种电动汽车的储能电池容量；total_battery(t)为t时刻停车场内电动汽车储能电池总容量。

1.4 站内进行充放电的电动汽车储能电池的荷电状态

电动汽车储能电池的荷电状态是决定电动汽车充放电行为的依据，也是决定电动汽车V2G充放电容量的因素。在文献[24]提出的V2G可用容量的基础上，进一步对电动汽车荷电状态作如下划分，如图2所示。

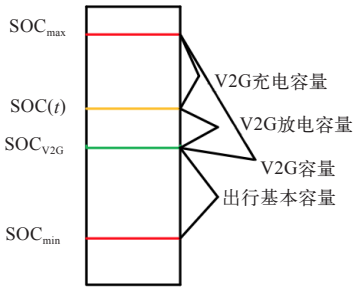


图2 对电动汽车荷电状态的划分一

图2中，$\mathrm{SOC}_{\min}$为正常使用情况下电动汽车电池荷电状态下限；$\mathrm{SOC}_{\max}$为正常使用情况下电动汽车荷电状态上限。正常情况下电动汽车的荷电状态都会在上下限之间，本文中$\mathrm{SOC}_{\max}$=0.85，$\mathrm{SOC}_{\min}$=0.20，后文均按照此约束。$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$为电动汽车荷电状态的V2G临界，当电动汽车停在含充电桩的停车位时若其荷电状态低于该临界值时，则该电动汽车立即充电，该临界值由用户自行设定。SOC(t)为电动汽车储能电池当前荷电状态。

图2中，将电动汽车SOC在[$\mathrm{SOC}_{\min}$，$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$]之间的荷电状态区间称为电动汽车的基本出行容量区间；将SOC在[$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$，$\mathrm{SOC}_{\max}$]之间的荷电状态区间称为电动汽车V2G容量区间。若充放电站内的任意一辆电动汽车的荷电状态在基本出行容量区间，则该电动汽车会立即进行充电；若充放电站内的任意一辆电动汽车荷电状态在V2G区间，则电动汽车将按照设定的V2G充放电策略进行充放电。

由图2的荷电状态划分可得出单辆电动汽车的基本出行容量、V2G容量、V2G充电容量和V2G放电容量的计算公式。

当SOC(t)∈[$\mathrm{SOC}_{\min}$，$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$]时，有

$$C_{\mathrm{base}}=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}-\mathrm{SOC}_{\min}) \tag{4}$$

$$C_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\max}-SOC_{\mathrm{V2G}}) \tag{5}$$

$$C^{\mathrm{In}}_{\mathrm{V2G}}(t)=0 \tag{6}$$

$$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)=0 \tag{7}$$

当SOC(t)∈[$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$，$\mathrm{SOC}_{\max}$]时，有

$$C_{\mathrm{base}}=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}-\mathrm{SOC}_{\min}) \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\max}-\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}) \tag{9}$$

$$C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}[\mathrm{SOC}_{\max}-\mathrm{SOC}(t)] \tag{10}$$

$$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}[(\mathrm{SOC}(t)-\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}] \tag{11}$$

式中，C_{base}为电动汽车的出行基本容量；$C_{\mathrm{V2G}}(t)$为t时刻电动汽车的V2G容量；$C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)$为$t$时刻电动汽车的V2G充电容量；$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)$为$t$时刻电动汽车的V2G放电容量。

由式（8）～式（11）可得，当SOC(t)∈[$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$，$\mathrm{SOC}_{\max}$]、$C_{\mathrm{V2G}}(t)$和$C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)$及$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)$三者之间存在如下关系，即

$$C_{\mathrm{V2G}}(t)=C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)+C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t) \tag{12}$$

由式（4）～式（11）亦可看出，对于单辆电动汽车来说，在荷电状态的V2G临界确定的情况

下，其出行基本容量和V2G容量是定值，而其V2G充电容量和V2G放电容量则是随电动汽车此刻荷电状态变化而变化的。

1.5 站内电动汽车车辆的充放电时长

电动汽车的充放电时长，影响着电动汽车的充放电量，两者之间关系式为

$$C_{\text{power}}^{\text{in}} = P_{\text{in}} T_{\text{in}} \tag{13}$$

$$C_{\text{power}}^{\text{out}} = P_{\text{out}} T_{\text{out}} \tag{14}$$

式中，$C_{\text{power}}^{\text{in}}$为电动汽车的充电电量；$C_{\text{power}}^{\text{out}}$为电动汽车的放电电量；$P_{\text{in}}$为电动汽车的充电功率；$P_{\text{out}}$为电动汽车的放电功率；$T_{\text{in}}$为电动汽车充电时间；$T_{\text{out}}$为电动汽车的放电时间。

2 充放电站V2G容量及V2G充放电容量的计算模型

充放电站V2G容量表示某时刻站内所有电动汽车能参与V2G的最大容量，而V2G充放电容量表征着充放电站某时刻站内电动汽车能够按照V2G策略充放电的最大容量。式（4）和式（5）给出了单台电动汽车V2G容量和V2G充放电容量的计算模型，本节将据此给出充放电站的某时刻的V2G容量和V2G充放电容量的计算模型。

充放电站的V2G容量和V2G充放电容量的计算公式为

$$C_{\text{V2G_}s}(t) = \sum_{i}^{m} C_{\text{V2G}} \quad , \quad m = \text{evCarNum}(t) \tag{15}$$

$$C_{\text{V2G_}s}^{\text{in}}(t) = \sum_{i=1}^{m} C_{\text{V2G}}^{\text{in}}(t) \quad , \quad m = \text{evCarNum}(t) \tag{16}$$

$$C_{\text{V2G_}s}^{\text{out}}(t) = \sum_{i=1}^{m} C_{\text{V2G}}^{\text{out}}(t) \quad , \quad m = \text{evCarNum}(t) \tag{17}$$

式中，$C_{\text{V2G_}s}(t)$为充放电站t时刻V2G容量；$C_{\text{V2G_}s}^{\text{in}}(t)$为充放电站$t$时刻V2G充电容量；$C_{\text{V2G_}s}^{\text{out}}(t)$为充放电站$t$时刻的V2G放电容量。

3 充放电站充放电量计算模型

对电动汽车充放电站建模不同于对电动汽车建模：电动汽车可以通过使用者的出行习惯及电动汽车的参数建立模型预测其日行里程和充放电时长，而电动汽车充放电站无法预测其站内电动汽车的充放电时长。本节将研究一种考虑V2G技术的电动汽车充放电站充放电量的计算模型。

本节考虑V2G技术的电动汽车充放电站充放电量的计算模型是基于以下两个基本假设的。

1）如果ΔT_{set}为模型设定的单位计算时间长度，且$t_1 - t_2 = \Delta T_{\text{set}}$，则如果$t_1$时刻某辆电动汽车在充放电站进行充放电，那么$t_2$时刻该电动汽车仍在充放电站进行充放电。

2）如果ΔT_{set}为模型设定的单位计算时间长度，且$t_1 - t_2 = \Delta T_{\text{set}}$，则如果$t_1$时刻某辆电动汽车处于充电状态，那么$t_2$时刻该电动汽车仍处于充电状态；或者如果$t_1$时刻某电动汽车处于放电状态，则$t_2$时刻该电动汽车仍处于放电状态。

有了以上两个假设，就可以得到$t_1 \sim t_2$时间段内，充放电站的总充放电电量的计算公式为

$$C_{\text{power_total}}^{\text{in}}(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^{m} [\lambda_i^1 P_i^{\text{in}} T_i^{\text{in}}(t_1, t_2)] \quad m = \text{evCarNum}(t_1) \tag{18}$$

$$C_{\text{power_total}}(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^{m} [\lambda_i^2 P_i^{\text{out}} T_i^{\text{out}}(t_1, t_2)] \quad m = \text{evCarNum}(t_1) \tag{19}$$

$$t_2 - t_1 = T_{set} \tag{20}$$

式中，$C_{\text{power_total}}^{\text{in}}(t_1, t_2)$和$C_{\text{power_total}}^{\text{out}}(t_1, t_2)$分别为$t_1 \sim t_2$时间段内，充放电站的总充电电量和总放电电量；$\lambda_i^1$为$t_1$时刻第$i$辆电动汽车的充电状态指示，若$t_1$时刻，该电动汽车处于充电状态，则$\lambda_i^1$值为1，否则为0；$\lambda_i^2$为$t_1$时刻第$i$辆电动汽车的放电状态指示，若$t_1$时刻，该电动汽车处于放电状态，则$\lambda_i^2$值为1，否则为0；$P_i^{\text{in}}$和$P_i^{\text{out}}$分别为第$i$辆电动汽车的充电功率和放电功率；$T_i^{\text{in}}(t_1, t_2)$、$T_i^{\text{out}}(t_1, t_2)$分别为$t_1 \sim t_2$时间段内，第$i$辆电动汽车的充电时长和放电时长，h。

由于t_1和t_2之间的时间间隔等于计算单位时间长度ΔT_{set}，故由基本假设2）可得

$$T_i^{\text{in}}(t_1, t_2) = T_i^{\text{out}}(t_1, t_2) = \Delta T_{\text{set}} \tag{21}$$

结合式（15）～式（20）亦可知，若$t_1 \sim t_2$的时间间隔等于设定的模型计算单位时长ΔT_{set}，那么$t_1 \sim t_2$时间段内的充放电站内的总的充放电量仅与t_1时刻充放电站内电动汽车的状态有关，与t_2时刻

无关。

下面利用式（18）～式（21）计算一家服务性行业充放电站在16:00～17:00时间段内的充放电总量。该充放电站里面有200个带充放电桩的停车位，由图1可得，该类型停车场16:00时刻的停车位利用率为94%，则16:00时刻停车场内共有192辆电动汽车在进行充放电。设ΔT_{set}=1 h，则可得16:00～17:00的充放电电量计算公式为

$$C^{in}_{power_total}(16:00,\ 17:00)=\sum_{I=1}^{192}P_i^{in}\lambda_i^1 \quad (22)$$

$$C^{out}_{power_total}(16:00,\ 17:00)=\sum_{I=1}^{192}P_i^{out}\lambda_i^2 \quad (23)$$

结合实际，很明显，若设ΔT_{set}=1 h，则充电站内电动汽车有不少电动汽车可能不遵守上面提到的两个基本假设，这就会使得模型计算出来的结果与实际相比有很大误差。为了减小这种误差应该将ΔT_{set}设置的小些，如设ΔT_{set}=0.05 h，这样即使把16:00～17:00的时间段分为20个计算单位时间长度，每个计算单位时间长度为3 min。按照式（18）～式（21）把每个计算单位长度内的充放电总量计算出来，然后相加，即可得到16:00～17:00内充放电站充电总量和放电总量。由于ΔT_{set}设置的非常小，因此，在ΔT_{set}内充放电站里绝大部分电动汽车都满足上面提到的两个基本假设。

4 基于双荷电状态临界的充放电站V2G策略

4.1 策略介绍

如果不加V2G充放电策略进行引导的话，电动汽车用户会在到达充电站后即开始充电，不考虑峰谷分时电价的影响，这将加剧系统负荷高峰时的电能需求。而且用户一般不会主动放电，来帮助电网削峰填谷，这种情况叫做无序充电。

显然无序充电会加剧电网负荷的波动，影响其稳定性。人们寄希望于V2G策略能削弱这样问题。本节将在分时电价下讨论一种用户侧和电网侧共享充放电决策权的V2G策略，即基于双荷电状态临界的V2G策略。

基于双荷电状态临界的V2G策略在对电动汽车荷电状态划分的基础上，增加一个V2G价格临界SOC_{V2G_price}，如图3所示。

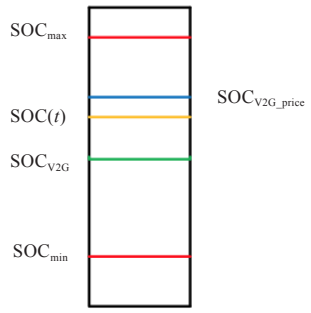


图3 对电动汽车荷电状态的划分二

由图3可以看出，相比图2，其多了一条SOC_{V2G_price}分界线，其中$SOC_{V2G_price}\in[SOC_{V2G},\ SOC_{max}]$，$SOC_{V2G_price}$的设立将帮助电动汽车更合理地充放电。

基于双荷电状态临界的V2G策略具体如下。

1）当$SOC(t)\in[SOC_{min},\ SOC_{V2G}]$时，电动汽车只充电不放电。

2）当$SOC(t)\in[SOC_{V2G},\ SOC_{V2G_price}]$时，若此时充放电站电价为峰电价时，电动汽车放电，若此时充放电站电价为平电价和谷电价时，电动汽车充电。

3）当$SOC(t)\in[SOC_{V2G_price},\ SOC_{max}]$时，若此时充放电站电价为峰电价和平电价时，电动汽车放电，若此时充放电站电价为谷电价时，电动汽车充电。

充放电站是该策略的执行者，电动汽车进入充放电站充放电时会被强制执行此策略。

4.2 策略分析

从4.1节基于双荷电状态临界的V2G策略中可以看出：

1）用户侧和电网侧均对电动汽车充放电有决策权：用户侧可以通过改变SOC_{V2G}、SOC_{V2G_price}这两个临界值来改变电动汽车充放电；电网侧则可通过改变发给充放电站的分时电价来改变电动汽车

充放电。

2）当充放电站当前分时电价处于谷电价时，电动汽车不管荷电状态和SOC_{V2G}、SOC_{V2G_price}这两个临界值如何，都会进行充电；而当荷电状态在[SOC_{V2G}，SOC_{max}]区间内而充放电站内分时电价为峰电价时，电动汽车不管荷电状态和SOC_{V2G}、SOC_{V2G_price}这两个临界值如何，都会进行放电。

注意：在模型和策略中，电网发给充放电站的分时电价可以与电网的分时电价相同，也可以不相同，为了达到调度目的，不同的充放电站收到电网发来的分时电价也可以不同。

5 算例及仿真分析

5.1 算例

某大型酒店（服务性行业）的停车场共有100个安装有充放电桩的停车位，这些停车位组成一个充放电站。该停车场出现电动汽车类型如表2（表2中没给出放电功率，本文按放电功率等于充电功率的0.65倍计算）所示，并假定每种电动汽车出现概率相同。假定每时刻充放电站内的电动汽车的荷电状态满足期望方差如表2所示的正态分布。该停车场的分时电价如图4所示，所有电动汽车荷电状态的V2G临界定为SOC_{V2G}=50%，V2G价格临界SOC_{V2G_price}=0.65。

表2 充放电站内电动汽车的荷电状态正态分布在不同时刻的期望和方差

时刻	期望	方差
1:00	51	7
2:00	51	8
3:00	50	7
4:00	50	7
5:00	49	6
6:00	49	6
7:00	50	7
8:00	52	7
9:00	54	7
10:00	54	8
11:00	52	7
12:00	50	9
13:00	48	9
14:00	46	9
15:00	45	8
16:00	46	6
17:00	46	7
18:00	45	8
19:00	47	6
20:00	47	6
21:00	48	8
22:00	49	7
23:00	50	6
24:00	50	7

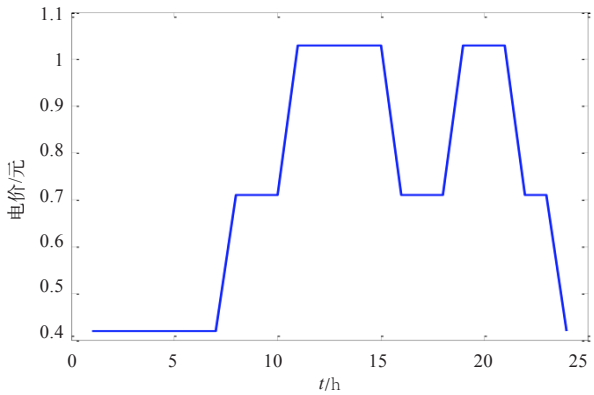


图4 充放电站分时电价

5.2 充放电站V2G容量及V2G充放电容量的计算

任一时刻充放电站的V2G容量和V2G充放电容量计算步骤如下。

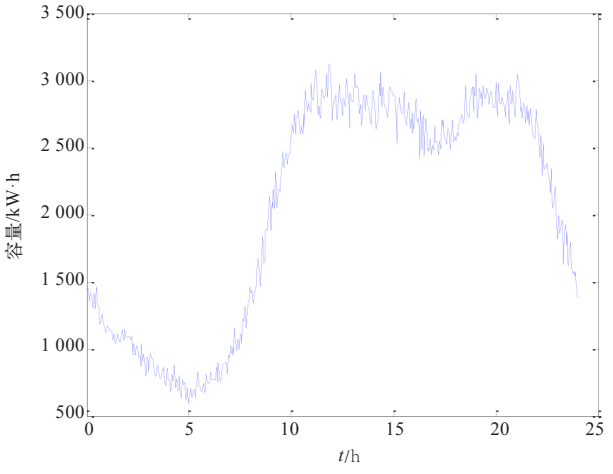
1）获得该时刻充放电站内车辆数evCarMum(t)。

2）从表1中随机抽取不同类型的电动汽车，抽取evCarMum(t)次，得到t_1时刻充放电站内这evCarMum(t)辆电动汽车的参数（主要有用的参数是电池容量和充放电功率）。

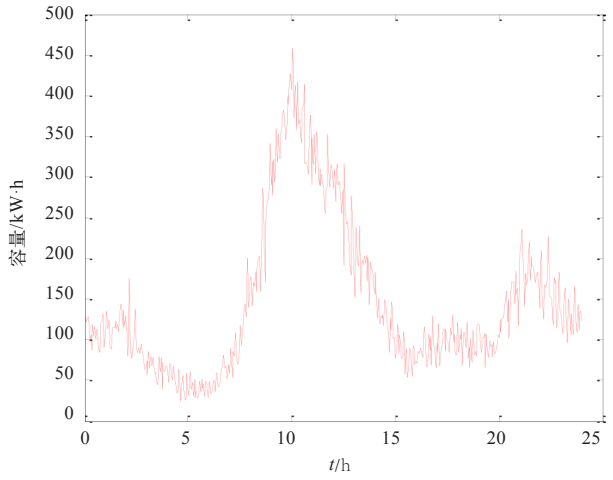
3）得到t_1时刻充放电站内evCarMum(t)量电动汽车每辆车的荷电状态；根据式（4）～式（11）即可以计算出单台电动汽车的V2G容量、V2G放电容量和V2G充电容量，然后按式（15）～式（17）即可得充放电站的V2G容量、V2G充放电容量。

以3 min为时间间隔（即每1 h 20个计算时刻），计算全天480个不同计算时刻的充放电站的V2G容量和V2G充放电容量。

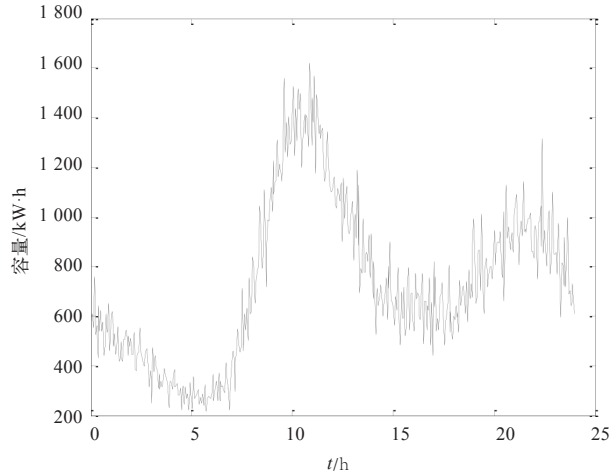
已知充放电站每个小时的电动汽车数量和电动汽车荷电状态分布参数，为了获得每个计算时刻的充放电站内的电动汽车数量和荷电状态分布参数，分别对图1和表2中的数据进行样条插值，获得计算时刻充放电站内的电动汽车数量和荷电状态的分布参数，并将其带入到式（4）～式（11），求得计算时刻的充放电站内电动汽车V2G容量、V2G充电容量和V2G放电容量，所得结果如图5所示。



（a）V2G容量随时间的变化



（b）V2G充电容量随时间的变化



（c）充放电站V2G放电容量随时间的变化

图5　充放电站V2G容量随时间变化

5.3　充放电站充放电量的计算

（1）无序充电策略下的充放电站运行

无序充电策略下充放电站只有充电负荷，而没有放电负荷。对无序充电策略下的充放电站运行进行仿真，结果如表3所示。

表3　无序充电策略下充放电站各时段的总充电电量和电费

时段	充电电量/kW·h	充电电费/元
0:00～1:00	308.230	129.47
1:00～2:00	267.475	112.34
2:00～3:00	236.687 5	99.41
3:00～4:00	196.260	82.43
4:00～5:00	178.375	74.92
5:00～6:00	167.360	70.29
6:00～7:00	202.595	85.09
7:00～8:00	275.792 5	115.83
8:00～9:00	404.495	287.19
9:00～10:00	544.777 5	386.79
10:00～11:00	639.267 5	453.88
11:00～12:00	685.797 5	706.37
12:00～13:00	674.670	694.91
13:00～14:00	684.245	704.77
14:00～15:00	682.942 5	703.43
15:00～16:00	657.202 5	676.92
16:00～17:00	618.725	439.29
17:00～18:00	612.415	434.81
18:00～19:00	637.622 5	452.71
19:00～20:00	676.752 5	697.06
20:00～21:00	677.850	698.19
21:00～22:00	645.485	664.85
22:00～23:00	562.087 5	399.08
23:00～24:00	410.175	291.22
总计	11 647	9 461

（2）基于双荷电状态临界的V2G策略下的充放电站运行

基于双荷电状态临界的V2G策略下的充放电站既有充电电量也有放电电量，所以要计算充电费用也要计算放电收入。对基于双荷电状态临界的V2G策略运行充放电站进行仿真，结果如表4所示。

对比表3和表4可以发现，基于双荷电状态临界的V2G充放电策略下，该酒店充放电站运行一天净充电电量相比无序充电策略下的情况减小了3 560 kW·h，减幅达到30.56%（由于无序充电策略下，充放电站只有充电电量没有放电电量，所以其充电电量可视为净充电电量，充电电费可视为净充电电费），净充电电费相比无序充电策略下的情况减少了3 597元，减幅达到38.02%。可见基于双荷电状态临界的V2G策略能够减小充放电站净充电负荷量，同时减小净充电费用，证明了其策

表4 基于双荷电状态临界的V2G策略下充放电站各时段的总充放电电量和充放电费用

时间段	充电电量/kW·h	放电电量/kW·h	净充电电量/kW·h	充电电费/元	放电收入/元	净充电电费/元
0:00～1:00	316.842 9	0	316.842 9	133.074	0	133.07
1:00～2:00	262.983 4	0	262.983 4	110.453	0	110.45
2:00～3:00	227.754	0	227.754	95.656 7	0	95.66
3:00～4:00	195.175 9	0	195.175 9	81.973 9	0	81.97
4:00～5:00	175.816 5	0	175.816 5	73.842 9	0	73.84
5:00～6:00	172.690	0	172.690 0	72.529 8	0	72.53
6:00～7:00	202.513 5	0	202.513 5	85.055 7	0	85.06
7:00～8:00	273.265 4	0	273.265 4	114.771 5	0	114.77
8:00～9:00	385.782 5	12.486 5	373.296	273.905 6	8.865 4	265.04
9:00～10:00	491.412 5	30.267 3	461.145 2	348.902 9	21.489 7	327.41
10:00～11:00	611.100	27.837 9	583.262 1	433.881	19.764 9	414.12
11:00～12:00	305.225	242.736	62.489	314.381 7	250.018 1	64.36
12:00～13:00	383.340	194.668 5	188.671 5	394.840 2	200.508 6	194.33
13:00～14:00	424.075	166.068 5	258.006 5	436.797 2	171.050 6	265.75
14:00～15:00	479.785	128.222 2	351.562 7	494.178 5	132.068 9	362.12
15:00～16:00	495.985	108.395 6	387.589 4	510.864 6	111.647 5	399.22
16:00～17:00	617.712 5	0.669 5	617.043	438.575 9	0.475 3	438.10
17:00～18:00	601.202 5	2.804 8	598.397 7	426.853 8	1.991 4	424.86
18:00～19:00	645.550	1.7453	643.804 7	458.340 5	1.239 1	457.10
19:00～20:00	450.297 5	144.079	306.218 5	463.806 4	148.401 4	315.41
20:00～21:00	429.690	157.012 4	272.677 6	442.580 7	161.722 7	280.86
21:00～22:00	383.210	172.136 2	211.073 7	394.706 3	177.300 3	217.41
22:00～23:00	547.182 5	2.770 6	544.411 9	388.499 6	1.967 1	386.53
23:00～24:00	402.805	2.119	400.686	285.991 5	1.504 5	284.49
总计	9 481.4	1 394	8 087.40	7 274.5	1 410	5 864.4

略的有效性。

另外结合表4和图4可知，当电价处于谷电价时段（0:00～7:00），充放电站放电量为0；而当电价处平电价时段（7:00～10：00、15:00～18:00和21:00～23:00），放电量比较小；而当电价处于峰电价时段(10:00～15:00 和18:00～21:00)，放电量较大，这与4.2节中的策略分析的第三条相呼应。同时这也表明在V2G技术下，电网运营商可以通过改变发送给充放电站的分时电价来引导充放电站内的电动汽车负荷进行充放电，达到削峰填谷的目的。

6 结束语

在目前大多数V2G的研究中，充放电站所扮演的角色常被忽略。本文针对V2G的充放电站侧进行建模，分析了充放电建模的五个基本要素，并给出了充放电站V2G容量和充放电量计算的模型，然后针对V2G下充放电站的运行，研究了一种基于双荷电状态临界的V2G策略，并让充放电站分别按无序充电策略和基于双荷电状态临界的V2G策略运行，计算两种情况下充放电站的净充电容量和净充电费用。证明充放电站运行在基于双荷电状态临界的V2G策略下时净充电量和充电费用更少，且结合电站分时电价信息可以进一分析得出充放电站运行在基于双荷电状态临界的V2G策略下时，电网能够通过改变分时电价达到削峰填谷的目的。

参考文献

[1] 张文亮，武斌，李武峰，等．电动汽车我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]．电网技术，2009，33(4)：1-5．

[2] Qian Kejun，Zhou Chengke，Allan M，et al．Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2011，26(2)：802-810．

[3] Kristien C，Edwin H，Johan D．The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2010，25(1)：371-380．

[4] Clement-Nyns K，Haesen E，Driesen J．The impact of charging plug-in hybrid electric vehicle on a residential distribution grid[J]．IEEE Transactions Power Systems，2010，25(1)：371-380．

[5] Kadurek P，Ioakimidis C，Ferrao P，et al．Electric vehicles and their impact to the electric grid in isolated systems[C]．Lisbon:Proceedings of International Conference on Power Engineering，Energy and Electrical Drives，2009：49-54．

[6] Sekyung H，Soohee H，Sezaki K．Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2010，1(1)：65-72．

[7] 项顶，宋永华，胡泽春．电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J]．中国电机工程学报，2013，33(31)：15-25．

[8] 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．

[9] 雷永强．基于V2G的配电网负荷优化策略研究[J]水电能源科学，2013，3(8)：208-211．

[10] 唐佳，王丹，贾宏杰．基于迟滞模型的集群电动汽车参与实时需求响应V2G控制策略研究[J]．2017，41(7)：2155：2164．

[11] Kumar K N，Sivaneasan B，So P L．Impact of priority criteria on electric vehicle charge scheduling[J]．IEEE Transactions on Transportation Electrification，2015，1(3)：200-210．

[12] 刘晓飞，崔淑梅，谢富鸿．基于停车需求模型的电动汽车V2G放电负荷时空分布预测[J]．电气工程学报，2015，10(8)：22-28．

[13] 刘晓飞，崔淑梅，李锦瑭．停车场电动汽车用户侧最优V2G控制策略研究[J]．电气工程学报，2015，10(10)：44-50．

[14] 王湘，杨健维，何正友．一种 V2G 模式下计及开断概率和负荷转移概率的配电网可靠性评估算法[J]．电网技术，2014，38(8)：2213-2219．

[15] 艾圣芳，林湘宁，万云飞，等．考虑 V2G 模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]．中国电机工程学报，2013，33(4)：122-129．

[16] Su W，Rahimi-Eichi H，W Zeng，et al．A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]．IEEE Transactions on Industrial Informatics，2012，8(1)：1-10．

[17] 胡泽春，宋永华，徐智威，等．电动汽车接入电网的影响与利用[J]．中国电机工程学报，2012，32(4)：1-10．

[18] 寇凌峰，刘自发，周欢．区域电动汽车充电站规划的模型与算法[J]．现代电力，2010，27(4)：44-48．

[19] 刘志鹏，文福栓，薛禹胜，等．电动汽车充电站的最优选址和定容[J]．电力系统自动化，2012，36(3)：54-59．

[20] 高赐威，张亮，薛飞，等．考虑集中型充电定址分容的电网规划研究[J]．中国电机工程学报，2012，32(7)：40-46．

[21] 杜爱虎，胡泽春，宋永华，等．考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]．电网技术，2011，35(11)：35-42．

[22] 曹一家，谭益，黎灿兵，等．具有反向放电能力的电动汽车充电设施入网典型方案[J]．电力系统自动化，2011，35(14)：48-52．

[23] 潘驰，赵胜川，姚荣涵．基于出行目的停车行为差异性分析[J]．交通信息与安全，2012，30(1)：39-42．

[24] 刘晓飞．电动汽车V2G系统及充放电控制策略研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015．

（收稿日期：2017－09－21）EA