

基于混合整数规划的电动汽车有序充电方法

王晓琨,翟桥柱,白 婕

(西安交通大学 系统工程研究所,陕西 西安 710000)

摘要:提出了在满足电动汽车充电需求的基础上尽量降低充电站充电成本的有序充电控制策略。分析了电动汽车充电所需时间与用户给定时间的关系,结合用户所需充电量,以充电站电费成本与电动汽车充电欠电量惩罚费用之和最小为目标函数,以充电功率以及充电电量为约束,根据运营模式不同分别建立了充电过程中可更换充电桩与不可更换充电桩的数学模型。通过仿真模拟充电站2天内电动汽车的充电需求,基于混合整数规划和启发式快速算法求解数学模型,得到2天中充电站的充电决策矩阵和每辆电动汽车的充电欠电量,验证了所提有序充电控制策略的可行性。仿真结果表明:与无序充电方案相比,有序充电控制策略可以更好地利用充电站的资源为用户服务,有效地降低了充电成本,并且有助于电网负荷的削峰填谷。

关键词:电动汽车;运营调度;有序充电;控制;混合整数规划;数学模型

中图分类号: TM 73;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.010

0 引言

近年来,汽车产业逐渐成为我国国民经济的支撑产业之一,汽车产销量稳居世界前列。节能汽车以及新能源汽车的出现,不仅可以有效缓解能源危机,还能降低环境污染带来的压力。推动汽车产业的可持续发展是解决就业压力的有效途径,也是提高我国经济增长率、提升国际综合竞争力的有力举措^[1]。仅2014年,全球电动汽车保有量近56万辆,其中我国电动汽车保有量近12万辆,预计到2020年,我国电动汽车保有量将达500万辆^[2]。随着电动汽车产业的蓬勃发展,大规模集中式充电模式将得到广泛应用,其中具有代表性的是充电站模式。优质高效的充电站控制策略不仅可以满足客户需求、提高服务质量,还能降低充电站充电成本、调节负载分布。

文献[3-4]概括描述了电动汽车充电对电网的影响,指出了有序充电调度的必要性。文献[5]提出基于预测充电负荷的有序充电控制策略,通过优化电动汽车充电起始时间来调节充电功率曲线,但是仅依赖充电决策调节功率曲线,效果并不太理想。文献[6]依据居民小区电动汽车充电的统计学规律建立充电需求模型,提出合理利用分时电价谷时段为电动汽车充电的控制策略,并通过仿真测试验证了所提控制策略的合理性。文献[7]针对大规模电动汽车集中充电场景,充分考虑节点电压、电能质量等约束,提出一种基于改进贪心算法的充电控制策略,通过算例仿真验证了所提算法的高效性。文献[8]兼

顾用户需求与充电站利润,建立以充电站运营收益最大为目标函数、以配电变压器最大容量为约束的数学模型,根据用户充电规律,对有序充电和无序充电进行了仿真分析与对比,得出有序策略在增加收益方面更加优质的结论。但是每辆车必须等到其前面的车充电完成才可以进行充电,充电效率不高。文献[9]基于充电分时电价提出以减小电网峰谷差和费用最小、充电起始时间最早为目标的优化策略,主要通过分时电价来调节充电负荷,相比无序充电,所提策略能够有效削峰填谷、缩小峰谷差、提高服务质量。文献[10-11]考虑尽量减小峰谷差,通过优化用户充电时间来达到缩小峰谷差的目的,但是并没有从全局角度考虑当用户随机到来时,如何调节充电策略可以在有效减小电网负荷峰谷差的同时满足用户的充电需求。文献[12]首先从全局的角度出发,以总充电成本最低为目标函数建立数学模型,并给出电动汽车各时段充电与不充电的决策;还给出了分布式调度方案,将局部划分为组,得出局部最优控制决策与全局最优控制决策很接近的结论。文献[13]指出了无序充电情况会导致供电网功率过大,网络损耗加大。文献[14-15]探讨了需求响应和风能对电动汽车充电系统的影响。文献[16]提出了一个日常驾驶任务集的统计建模方法。

本文在已知未来一段时间内所有充电车辆到达和离开充电站的时间、到达和离开充电站时各车辆的电池荷电状态(SOC,即电动汽车当前电池容量占电池总容量的比值)等信息的基础上,根据不同运营模式分别建立了充电过程中可更换充电桩与不可更换充电桩的数学模型。分别通过MATLAB调用CPLEX和快速算法求解对应模型得到2天内充电站

收稿日期:2016-06-16;修回日期:2017-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174146,61221063,U1301254,61304212)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61174146,61221063,U1301254,61304212)

的充电决策。依据分时电价进行充电调节,有助于减小充电功率峰谷差,缓解电网压力。

从实际运行角度看,充电调度应是一个滚动优化问题,即充电站应不断根据最新到达的车辆信息及目前仍未完成充电服务的车辆信息,重新安排未来调度计划。但每次滚动优化调度时求解的都是一个确定性问题,因此本文在模型和算法中暂未考虑车辆到达的随机性,但本文所建模型和所提算法可以用于滚动优化调度。在之后的研究中此确定性模型将推广到随机模型中。

1 电动汽车有序充电控制策略

本节在考虑电动汽车充电需求的基础上,从充电服务商的角度出发,设计充电站有序充电策略。当电动汽车进入充电站后,充电站的充电管理系统会自动记录第 m ($m=1, 2, \dots, M$) 辆电动汽车的进站时间 $t_{m,\text{in}}$ 、车辆电池的初始荷电状态 $\text{SOC}_{m,\text{in}}$ 以及第 m 辆电动汽车电池总容量 B_m (单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$)。与此同时,电动汽车用户需要向充电站充电管理系统输入充电需求信息,即第 m 辆电动汽车取车时间 $t_{m,\text{out}}$ 以及取车时期望的电池荷电状态 $\text{SOC}_{m,\text{out}}$ 。当在用户给定的时间段内充电站无法满足用户需求时,用户可以重新向充电管理系统输入充电需求信息,如果用户不做修改,那么系统默认按照用户指定的取车时间安排充电计划,并尽量接近用户充电期望。

当在用户给定的时间段内充电站可以满足用户充电需求时,由于电网分时电价的缘故,令第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个时间段的电网电价为 P_j ,充电站可以根据电网分时电价在用户给定的充电时间段内合理安排充电计划,以求在尽量满足用户需求的前提下降低运营成本,实现有序充电控制。

假设充电站共有 N 台充电桩,并且充电过程是恒功率的^[8],即每台充电桩的充电功率恒定为 Q (单位为 kW)。将 1 d 平均分为 96 个时间段,每个时间段时长 $T=15 \text{ min}$ ^[8],并且定义第 m 辆电动汽车最早开始充电的时间段为:

$$T_{m,a} = \left\lfloor \frac{\text{trans}(t_{m,\text{in}})}{T} \right\rfloor + 2 \quad (1)$$

同样,定义第 m 辆电动汽车容许充电的最后一个时间段为:

$$T_{m,b} = \left\lfloor \frac{\text{trans}(t_{m,\text{out}})}{T} \right\rfloor \quad (2)$$

其中, $\lfloor t \rfloor$ 表示不超过 t 的最大整数; $\text{trans}(t)$ 表示把时间转换为分钟数,例如当第 m 辆电动汽车到达充电站的时间为 08:10,用户设定的离开时间为 14:25,则用户最早可以在 08:15 充电,可以充电时间最迟到 14:15,转换为时间段即 $T_{m,a}=34$ 、 $T_{m,b}=56$,允许充电时间段最早为第 34 个时间段、最迟为第 56 个时间段。

2 数学模型的建立与求解

2.1 可更换充电桩数学模型的建立与求解

可更换充电桩表示电动汽车在充电过程中可以随意更换至能为其提供充电服务的充电桩上继续充电,而不是固定在某台充电桩充电,允许更换充电桩时,可以显著提高充电桩利用率,更好地完成充电服务。

定义 0-1 矩阵 $F_{M \times J \times N}$ 表示 M 辆电动汽车充电决策矩阵,其元素 $f_{j,n}^m$ 定义如下:当第 m 辆电动汽车第 j 个时间段在充电桩 n 充电时, $f_{j,n}^m=1$;否则 $f_{j,n}^m=0$ 。

将在要求时间内充电站未能满足的那部分合理需求电量定义为每辆电动汽车的欠缺量,并用 E_{shortage_m} 表示第 m 辆电动汽车的充电欠缺量,并规定其值非负,有欠缺量时其值为正数,没有欠缺量时其值为 0。

为了增强系统决策的公平性与合理性,为每一辆电动汽车的 E_{shortage_m} 设置相对应的足够大的惩罚系数 A_m 。

第 j 个时间段内充电站的电费成本 C_j 可由式(3)得到。

$$C_j = P_j Q \frac{T}{60} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_{j,n}^m \quad (3)$$

这样,充电站充电优化调度问题被描述为通过求解决策矩阵来得到最少运营成本的问题,目标函数为:

$$\min_{F_{M \times J \times N}, E_{\text{shortage}}} \sum_{j=1}^J C_j + \sum_{m=1}^M A_m E_{\text{shortage}_m} \quad (4)$$

负载约束条件如下:

$$Q \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_{j,n}^m \leq S_j \quad \forall j \quad (5)$$

其中, S_j 为第 j 个时间段充电站允许给电动汽车充电的功率最大值。

充电桩分配及充电约束如下:

$$\sum_{m=1}^M f_{j,n}^m \leq 1 \quad \forall j, n \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^N f_{j,n}^m \leq 1 \quad \forall j, m \quad (7)$$

充电电量约束如下:

$$B_m (\text{SOC}_{m,\text{out}} - \text{SOC}_{m,\text{in}}) - E_{\text{shortage}_m} \leq \sum_{n=1}^N \sum_{j=T_{m,a}}^{T_{m,b}} Q \frac{T}{60} f_{j,n}^m \quad (8)$$

欠缺量非负约束如下:

$$E_{\text{shortage}_m} \geq 0 \quad \forall m \quad (9)$$

式(6)表示在任意充电桩的任意时间段内最多只能有一辆电动汽车在充电;式(7)表示每辆电动汽车在同一时间段只能被安排在一台充电桩上充电;式(8)表示电动汽车实际充电量不小于需求量与欠缺量之差;式(9)表示所有欠缺量必须非负。

可更换充电桩的数学模型是混合整数规划模型,CPLEX 对于混合整数规划问题的求解具有优势,此

模型通过 MATLAB 调用 CPLEX 来进行具体求解。

2.2 不可更换充电桩数学模型的建立

不可更换充电桩表示电动汽车在充电过程中不可随意更换充电桩，只能固定在分配到的充电桩上进行充电。

定义 0-1 矩阵 $E_{M \times N}$ 表示车辆被分配到固定的充电桩上充电的分配矩阵，其中的元素 $e_{m,n}$ 定义如下：当第 m 辆电动汽车被分配到充电桩 n 充电时， $e_{m,n}=1$ ；否则 $e_{m,n}=0$ 。

不可更换充电桩数学模型的目标函数为：

$$\min_{F_{M \times J \times N}, E_{M \times N}, E_{\text{shortage}}} \sum_{j=1}^J C_j + \sum_{m=1}^M A_m E_{\text{shortage}} \quad (10)$$

约束与可更换充电桩模型的约束一致，仅仅是将式(7)替换如下：

$$\sum_{n=1}^N e_{m,n} = 1 \quad \forall m \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J f_{j,n}^m \leq J e_{m,n} \quad \forall m, n \quad (12)$$

式(11)表示任意电动汽车都必然分配到唯一一台充电桩；式(12)表示任意电动汽车只在被分配到的充电桩上充电。

2.3 不可更换充电桩数学模型的求解

不可更换充电桩情形的数学模型也是混合整数线性规划问题，但在调用 CPLEX 求解时遇到求解时间过长、内存不足等问题，所以本文从问题实际特点出发采用启发式快速算法进行求解。

启发式快速算法流程图见图 1。

考虑到目标最优的一个充分条件是每辆电动汽车的欠缺量都为 0 且每辆电动汽车的充电成本为绝对最小。这里的绝对最小是指不考虑其他车辆的充电需求在用户给定的时间段内可以达到的充电成本最小值。从这一角度出发，按照一定顺序依次给出每辆电动汽车的充电决策使得每辆电动汽车的欠缺量尽量小、充电成本增加量尽量小，这样可以得到一个具备良好最优性的可行解。

图 1 中按照先离开先安排的顺序来计算为了满足部分有紧急充电需求的顾客。

每辆电动汽车都将遍历 N 台充电桩，分别计算并记录在每台充电桩上该电动汽车的最少欠缺量与充电成本增加量。选中最佳充电桩 n 的规则是：首选欠缺量最少的充电桩，当最少欠缺量相同时选择充电成本增加量最小的充电桩，当充电成本增加量相同时选择利用率最高的充电桩。

选择利用率最高的充电桩是为了给后续充电车辆留出更多可连续充电时间，提高服务容量。

2.4 模型与求解中几个关键问题的说明

a. 电动汽车最小充电量约束。

在充电调度中，最小充电量是一个应该考虑的约

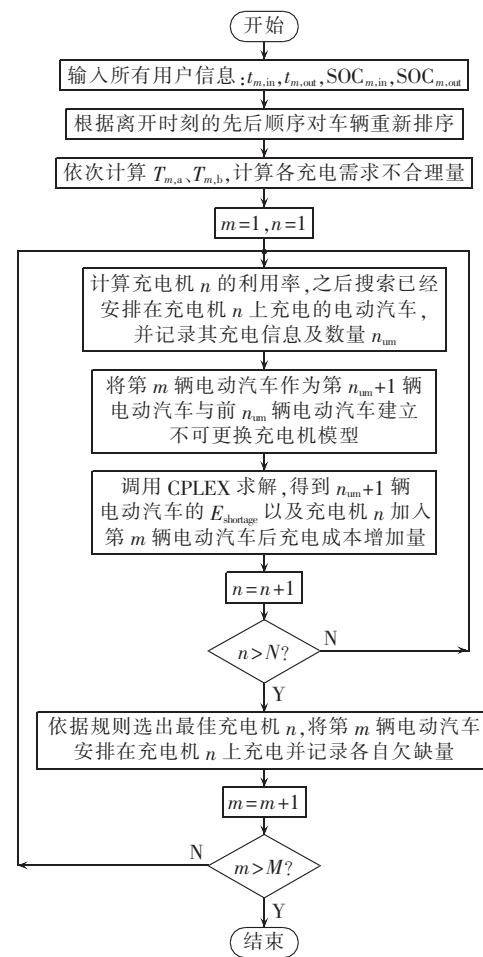


图 1 启发式快速算法流程图

Fig.1 Flowchart of heuristic fast algorithm

束，其在一定程度上可以由 $SOC_{m,out}$ 体现。由于在所提快速算法中计算时间不是问题，所以通过模拟调度即可确定哪些车辆不能满足最小充电量约束，然后在预处理阶段就可以把这些车辆排除在最终调度计划之外，因此，最小充电量约束未明确加入模型中。

b. 欠缺量的求解方法。

模型中欠缺量是通过在目标函数中加入惩罚项求得的。除此之外，还可以先单独求取最小欠缺量，然后添加欠缺量约束来优化电费成本。具体步骤如下。

首先，模型中的约束条件不变，将目标函数改为 $\min \sum_{m=1}^M E_{\text{shortage}}_m$ ，这样可以先求得使总欠缺量（假设这个值为 E_{SHORT} ）最小的解。

然后，将目标函数改为 $\min \sum_{j=1}^J C_j$ 并且添加约束 $\sum_{m=1}^M E_{\text{shortage}}_m = E_{\text{SHORT}}$ ，这样就可以通过求 2 个混合整数规划问题来得到在总欠缺量最小的调度方案中，使电站总电费最小的调度方案。这种方法实际上是双目标规划中的目标分层法。

c. 充电中断对电池寿命的影响。

对此问题可以从数学模型层面解决。首先,如果在运营过程中充电中断对电池寿命损害较大,则可以采用不可中断的服务方式,此时对应数学模型为“多个并行的单机排序”问题,即先为每辆电动汽车分配唯一的一台充电桩,然后对分配到相同充电桩上的电动汽车进行“排序”求解。其次,如果可以接受可中断服务方式(例如,随着电池性能的显著提升,允许充放电次数可能大幅提高),则采用可中断服务方式。而可中断服务方式又分为2种:一种是可更换充电桩模式,另一种是不可更换充电桩模式。这2种模式在本文中已经考虑,相比不可中断服务方式,这种方式可以提高服务效率和充电桩利用率。

3 模拟仿真计算与分析

3.1 参数设置

模拟仿真的部分原始数据来源于文献[8],并对原始数据做了必要的调整。仿真中测试了2个随机生成案例,案例1中充电站共有充电桩20台,有200辆电动汽车需要充电;案例2中充电站共有充电桩20台,有250辆电动汽车需要充电。每台充电桩的充电功率为5 kW,每辆电动汽车的电池总容量均为30 kW·h。每辆电动汽车充电需求信息设定如下:第一天,电动汽车到达时间服从正态分布 $N(2, 0.5^2)$ 、 $N(9, 0.5^2)$ 、 $N(12, 0.5^2)$ 、 $N(19, 0.5^2)$,到达概率分别为0.1、0.1、0.1、0.3,充电等待时间服从均匀分布 $U(5, 10)$,初始荷电状态 $SOC_{m,in}$ 服从正态分布 $N(0.4, 0.1^2)$ 且 $0 \leq SOC_{m,in} \leq 0.7$,离开荷电状态 $SOC_{m,out}$ 服从正态分布 $N(0.9, 0.1^2)$ 且 $0.8 \leq SOC_{m,out} \leq 1$;第二天,电动汽车到达时间服从正态分布 $N(2, 0.5^2)$ 、 $N(9, 0.5^2)$ 、 $N(12, 0.5^2)$ 、 $N(19, 3^2)$,到达概率分别为0.1、0.1、0.1、0.1,充电等待时间服从均匀分布 $U(5, 10)$,初始荷电状态 $SOC_{m,in}$ 服从正态分布 $N(0.4, 0.1^2)$ 且有 $0 \leq SOC_{m,in} \leq 0.7$,离开荷电状态 $SOC_{m,out}$ 服从正态分布 $N(0.9, 0.1^2)$ 且 $0.8 \leq SOC_{m,out} \leq 1$ 。

电动汽车先根据到达概率确定其对应的到达时间分布(正态分布),然后再根据该正态分布随机生成到达时间,其余参数可根据设定的分布信息随机生成。到达概率的设定仿照了文献[8]的方式,并考虑了一些实际因素,例如,19:00左右,大部分人下班后需给电动汽车充电,所以到达概率大一些。参数的设定仅仅是为了测试案例来验证模型的正确性与可行性,实际中更合理的是滚动优化模型。但所有的随机规划模型最终都是转化为确定性优化问题求解的,因此每次滚动求解的都是一个确定性模型。

每辆电动汽车的惩罚系数 A_m 的设置根据每辆电动汽车的序号 m 进行确定,总体原则是先来的电动汽车的惩罚系数要比后来的电动汽车的惩罚系数

大,目的是在充电站服务能力满足不了所有用户充电需求时应尽量先给先到的电动汽车服务,即如果必须有欠缺量,尽量是后来的电动汽车的欠缺量。

充电站从电网的购电价格采用分时电价形式^[8],具体数值如表1所示。

表1 分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price

时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	
谷时段	00:00—08:00	0.360
平时段	12:00—17:00, 21:00—24:00	0.687
峰时段	08:00—12:00, 17:00—21:00	0.869

3.2 结果说明与分析

a. 案例1中可更换充电桩模型的充电决策如图2、3所示(00:00—24:00平均分为96个时间段,单位时间段时长15 min,后同)。图中小方格中的数字代表每辆电动汽车的序号,即 m ,表示第 m 辆电动汽车在对应的时间段和充电桩上进行充电,没有标出数字的小方格表示没有车辆在对应时间段和充电桩上充电。

案例1中不可更换充电桩模型的充电决策如图4、5所示。图中的结果是在保证最优解的情况下简单调整而得。

案例1的2个模型的充电情况如表2所示。充电需求不合理量的产生是由用户给定的充电时间过于仓促而导致的,即使在给定时间内一直给其充电都不能满足;欠缺量的产生是由充电站服务能力导致,如果车辆过多,供不应求,那么必定会有欠缺量。

表2 案例1充电情况

Table 2 Charging condition of Case 1

模型	欠缺量总和/(kW·h)	充电需求不合理量/(kW·h)	充电成本/元
可更换充电桩模型	0	6.3	1798.2
不可更换充电桩模型	0	6.3	1813.3

同时,从案例1的仿真结果中可以看出,通过分时电价机制,大部分充电行为被安排在电价谷时段或者平时段,而电价峰时段大致对应电网负荷峰时段,而峰时段到达的电动汽车充电行为被尽量安排在谷时段或者平时段,避免了高峰时段电网负荷的进一步增加,所以间接减小了高峰时段电网负载压力。

b. 案例2的可更换充电桩模型的充电决策如图6、7所示,不可更换充电桩模型的充电决策如图8、9所示。2个模型的充电情况如表3所示。不可更换充电桩模型的欠缺量分布如表4所示。

从案例2的仿真结果中可以明显看出,不同车辆充电行为上有交叉部分,这样可以提高充电站内充电桩的利用率,为更多的电动汽车服务,体现了本文所建模型在服务容量上的优势。

充电桩序号

20		7	7			8	15			13	8							18
19				7	18			6				10	10	17				
18						16				3				11				
17		18	16	10		5			18									
16				13		11	3			11	17	19	5					18
15				11	1		19	1	9		17	8	8					
14		16	3		19	3	3		9	5	2	16	16	11	11	3	2	6
13		16		13	6	13	1	18	17	17	1	12	7	1	12	7	12	11
12						20	17				20	20	6	20	20	6	20	20
11			15			12			6	1		13	2					17
10			12	15	9		20	18	16		11	6						
9			9			8				3		6						
8				14	14	14		17			20	15		6	8			
7			6		12	12	14	8	14	8	11	12	5	15	13	15	15	14
6			18		18	19	19	11	19	14	19	19		20	4	4	4	4
5		15	15	15	15	15	19	15	16	16	19			16	16	15	16	17
4		9	13	13	13	11	11	11		13	13	13	13	14	14	16	14	14
3		9	9	9	9		8	8	9		10	10	10	10	11	19	11	11
2		9	3	3	16	5	5	5	4	4		6	6	7	7	7	7	7
1		9		1	1	1	1	20	1	1	2	2	2	17	3	19	3	3

00:00 02:00 04:00 06:00 08:00
时刻

(a) 第一天 1—32 时间段

充电桩序号

20				21		35	31	26	45	56	50	50	50	50	46	52	50	51	51	52	102	53	53	53					
19				39	26	29	31	31	22	39	25	50	47	25	34	46	46	47	49	48	47	47	50	31	48	48	48		
18		27								39	24	32	40	40	40	47	40	37	48	60	60	23	44	44	44	49			
17						33			28	28	37	28	37	37	54	29	51	29	39	43	43	43	43	59	37				
16	32				33	25			36	33	33	31	32	36	36	36	36	39	35	31	41	41	41	84					
15	36		30					34	37	32	30	29	29	55	23	29	25	25	38	22	103	52	38						
14	32		26	25			49	33	49	49	45	26	26	25	25	32	103	42	103	103	102	102	55						
13		21						32	29	26	54	23	60	43	60	23	102	102	102	45	45	43	45						
12		25		25			59	29	30	59	103	103	103	103	103	59	103	48	95	95	84	95	56	54					
11	21	31		29	39	32	40		29	58	58	59	59	59	40	59	59	44	46	65	65	65	102						
10		39		32			59	33	59	51	51	24	39	42	51	47	54	54	29	54	50	54	54	23					
9	21								46	46	46	49	49	49	49	55	55	50	49	49	48	49	49	51					
8	36	30		39	30	37	22	59	40	42	42	42	41	32	42	42	39	44	45	45	29	38	23	27					
7	21		32				39	44	39	30	39	26	30	39	26	38	45	40	40	22	38	42	42	42					
6		22	32		32	38	32		35	37	35	41	35	35	35	41	24	40	35	36	37	37	22	38	43				
5		26	39	40	35	30	30		30	55	31	31	27	42	58	32	44	24	32	32	33	51	108	108	108				
4		40				26	49	26		26	26	55	29	57	30	30	31	37	31	103	42	42	31	103	33				
3		29		37					31	25	53	25	53	57	57	28	42	27	28	57	54	29	57	57					
2	22	32				21	21	24	23	23	23	23	58	24	23	40	103	38	24	24	53	59	27	27	47				
1		35				34		35	21	21	44	21	43	21	36	21	35	35	22	22	22	28	58	84	31	56			

08:00 10:00 12:00 14:00 16:00
时刻

(b) 第一天 33—64 时间段

充电桩序号

20	42	62	54	54		65	54	56		120	97	120	97			82	107	96	82	106	86	110		93	82	72	80							
19	48	48	22	52					90	78						113	97	113	90	113	113	73	99	96	90	80	110							
18	54	46	42	77	77				120							98	101	110	107	79	91	81	93	63	71	93	113							
17	55	43	55	48	37							90	120	89	120	106	62	96	120	95	100	113	62	107	107									
16	84	84	41	47	97				120	101	97					120	119	90	119	119	114	119	119	70	119	116	116							
15	46	102	43	22		97		74				89	108	108	108	108	74	90	101	110	120	110	100	110	79	106	110	79						
14	102	97	44	100	101			103	97			101	101	102	102	102	90	90	110	119	106	73	95	93	106	80	86	106	106					
13	51	50	51	51	97	97			102	65	97	97	97	97	97	62	62	95	100	98	98	63	107	85	107	91	99							
12	95	95	48	101		78				90	90	90			120	95	95	93	95	93	62	62	95	95	110	95	96							
11	65	65	65	69	84	84	84	84	74	84					120	89	89	69	69	69	90	90	107	90	90	95	62	93						
10	56	101	56	97	56	58			78	78	78	84				101	82	89	87	89	82	69	89	86	89	89	86	86	86	86	86			
9	49	49	50	50	33	58		58	74	77	77	77				85	85	97	89	86	89	89	86	89	89	86	86	86	86	86	86			
8	33	45	45	46	69	56	56	56		65	65	69	74			74	80	96	86	91	81	81	90	82	82	63	70	85						
7	52	28	84	103		103	55	97	57	60	60	60	65	69	69	78	78	98	120	96	74	93	80	80	91	87	99	87						
6	37	38	38	43						57	62	65	65	65	74	74	110	74	74	86	95	74	86	91	86	91	92	86						
5	41	41	37	38	74		78			55					70	86	70	70	70	70	70	96	96	107	85	100	76							
4	103	42	47	37	77				101	89					89	69	108	108	98	108	108	108	71	81	81	73	73							
3	57	29	49	33	60							101				62	48	48	62	73	85	87	70	63	106	70	89	63						
2	27	27	27	29		69	84	65	70			101				119	86	81	74	62	71	98	62	62	68	113	68							
1	22	60	46	23	43		103		43			89				119	86	81	74	62	71	98	62	62	68	113	68							

16:00 18:00 20:00 22:00 24:00
时刻

(c) 第一天 65—96 时间段

图 2 案例 1 可更换充电桩模型的充电决策(第一天)

Fig.2 Charging decision of replaceable charger model in Case 1(first day)

20	87	107	106	91	93	111	111	99	99	99	99	137	64	114	64	118	66	136	83		133	122	132	127	131	109	125		133	121		
19	81	80	68	93	81	93	96	114	137	106	64	73	112	73	112	125	136	61	140	140	117	109	131	124	138	132	136	75	128			
18	72	72	80	87	87	87	79	111	116	116	91	115	105	66	118	135	135	135	134	61		115	83	117	117	117	117	117	117	136		
17	68	76	110	68	76	85	63	115	64	64	68	64	115	115	138	139	118	109	66	139	83	140	140		75	134		75	109			
16	116	116	118	79	118	79	81	81	68	76	81	112	67	67	111	117	134	134	61	134	115	135	135	135	140	128	109	136	140			
15	110	110	107	112	92	99	92	76	73	114	72	131	61	137	105	132	132		137	132	138	132	128	61	132		132	134				
14	106	93	93	72	106	106	107	92	111	115	112	118	130	122	133	124	128	125	122	122	137	126	133	123	128	83	61	129	129	129		
13	107	99	96	106	105	96	72	112	114	105	73	135	73	126	130	121	123	130	121	121	123	75	123	136		123	138	128	127	127		
12	79	94	91	88	72	91	106	88	88	104	114	109	132	132	104	61	61	132	75	75		134	132	61	61	83	83		121	121		
11	92	91	92	92	79	92	93	79	92	112	92	88	116	94	116	94	94	137	94	137	66	66	66	138	126	139	131		139	139	139	
10	80	114	73	99	91	107	73	94	94	73	105	111	114	111	115	136	115	115	136	136	129	137	115	128	136		137	125	138	138		
9	76	86	86	80	104	76	91	104	76	92	116	104	104	116	114	133	133	126	133	133	75	133	122	133	135	138	135	135	135	123		
8	113	85	85	96	107	81	85	72	91	91	106	116	137	112	126	131	131	118	135	131	139	134	138	131	130	131	130		132	109	132	134
7	86	81	81	107	96	113	113	68	106	88	76	66	111	64	66	126	126	128	131	129	124	138	127	130	125	130	126		130	130	130	130
6	73	79	63	63	63	63	80	64	81	126	88	126	126		67		122	131	126	126	128	126	126		126	122	123	127	140	128	135	
5	93	87	76	76	116	116	116	79	79	79	67	131	104	131	83	125		127	122	127	125	125	121	121	121	127	121	125	125	125		
4	63	92	87	73	73	73	99	137	72	68	104	83	94	131	94	115		129	115	117	132	139	139	122	122	122	139	124	124	124	124	
3	96	71	113	113	68	68	87	106	105	94	111	114	125	88	137	137	137	94	128	115	131	131	137	137	137	137	132	83	132	117	83	
2	99	63	71	81	85	118	76	118	112	118	94	94	88	105	88	66	83	83	130	83	109	136	109	109	83	125	128	109	136	109	109	
1	85	73	72	114	80	80	114	91	104	72	118	105	118	118	73	109		66	118	66	61	130	61	75	123	75	75	130	125	75	75	

02:00

04:00

06:00

08:00

时刻

(a) 第二天 1—32 時間段																								
20						143		176	172	166	172	172	188	172	163	172	172	176	169	176	174	174	174	
19					143		155	176	174	174	170	170	171	169	159	161	155	168	171	172	175	171	171	
18					153		141	166	167	168	166	166	149	166	175	168	177	168	168	178	169	168		
17							154	160	142	160	168	144	168	141	162	163	142	163	145	147	166	166	167	
16					149		151	145	157	158	158	158	150	152	150	160	150	145	141	156	164	164	188	
15					141		142		152	151	155	150	155	152	155	165	158	158	166	158	166	163	164	
14						151			152	152	152	152	173	162	173	162	154	154	162	157	161	161	163	
13					149		145				145	145	145	179	169	143	143	164	142	147	147	148	148	
12					152		142				178	175	153	175	175	178	171	179	171	165	179	179	179	
11					154	151	176	176	176	155	175	175	159	153	169	141	169	145	159	153	173	156	173	
10											176	176	157	168	162	162	167	167	167	144	167	143	167	
9					152		159	153		151		178	150	150	159	178	177	177	159	176	149	159	160	
8					155		147	153					156	156	156	156	157	157	157	153	141	150	158	
7						141						153	153	147	153	151	151	151	151	178	159	176	162	
6						150		141	153	151	152	151	151	161	151	161	161	146	156	148	152	158	153	
5					157					147		150	142	150	177	176	159	174	159	150	163	150	169	
4										147	150	154	154			158	173	147	153	148	164	180	147	
3					157		149	145					153	143	143	143	143	143	144	144	169	145	150	
2						158		159	141	141	141			142	150	142	160	160	160	142	160	143	146	146
1						143		141	141	145			147	141	141	178	172	141	142	158	175	141	141	144

10:00

12:00

14·00

16:00

时刻

(b) 第二天 33—64 时间段

20	163	163	177	148											165	185	188		185		185	189	192								
19	171	148	172	192	184		169		168		170		198			199	199			192		200		186							
18	168	162	167	171	167										188	165		200		187	185	193	191	193							
17	170	174	174	174											193	193	195	186	195	193				183							
16	154	166	166	170		198									198	195	197	197	197	197	196	197	196	191							
15	165	165	165	166				171								165	196	196	196	190	198	187		185							
14	148	164	179	165			171								189	181	181		181	191	193	186	183	193							
13	179	169	163	167			198	198	196		184		198	198	198	190	198	189		198	186		200	200							
12	164	185	184	164	194	184	184	184	188	188	188	194	194			195	195		192	196		183	183		197	199	199				
11	172	176	186	177			178		179	179					194	194	194	194	185	194	194	195		196	190	192	197	197			
10	184	194	169	194		176	176		178								195	192	192	192	193	189	195	196	181	192					
9	162	158	149	168		162			177	177			177	177		192	192			194	191	191	189		181		182	189	192		
8	161	147	147	178											178	188		188	188	182	182	190	190	190		191	191	191	190	196	
7	158	167	161	179			167									182	182	182		188	196	190	198	198	189	198		189	190		
6	155	155	158	180			171	194		195	182				180	180	180	180	187	187	187	187	187	199	187	199		190	189	189	
5	169	154	146	161		169				198		182					187			200	186	186	199	186	195	186		187	187	187	
4	178	149	195	162												196			185	186	197	185	185	192	185			186	186	181	
3	147	170	173	172	192						198				192				183		182	191	187	183	192	183	185	199	185		
2	176	146	164	163								184							182	188	200		182	182	182		182	182	182		
1	166	144	144	147															182			183	181	191	199	181	181		181		

18:00

20:00

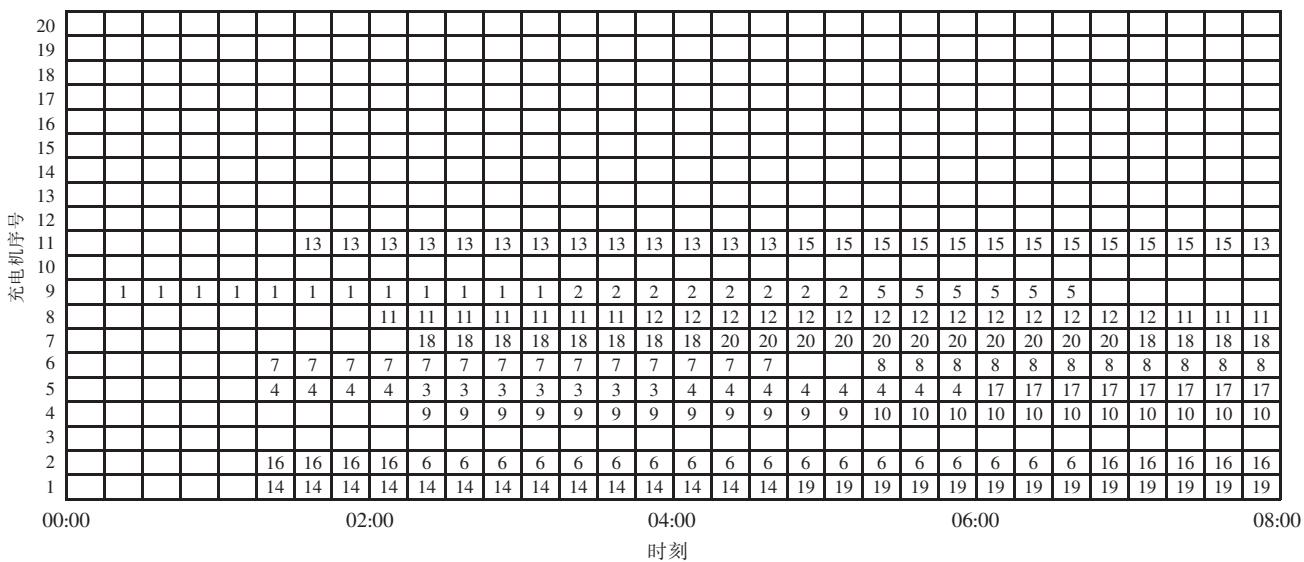
22:00

24:00

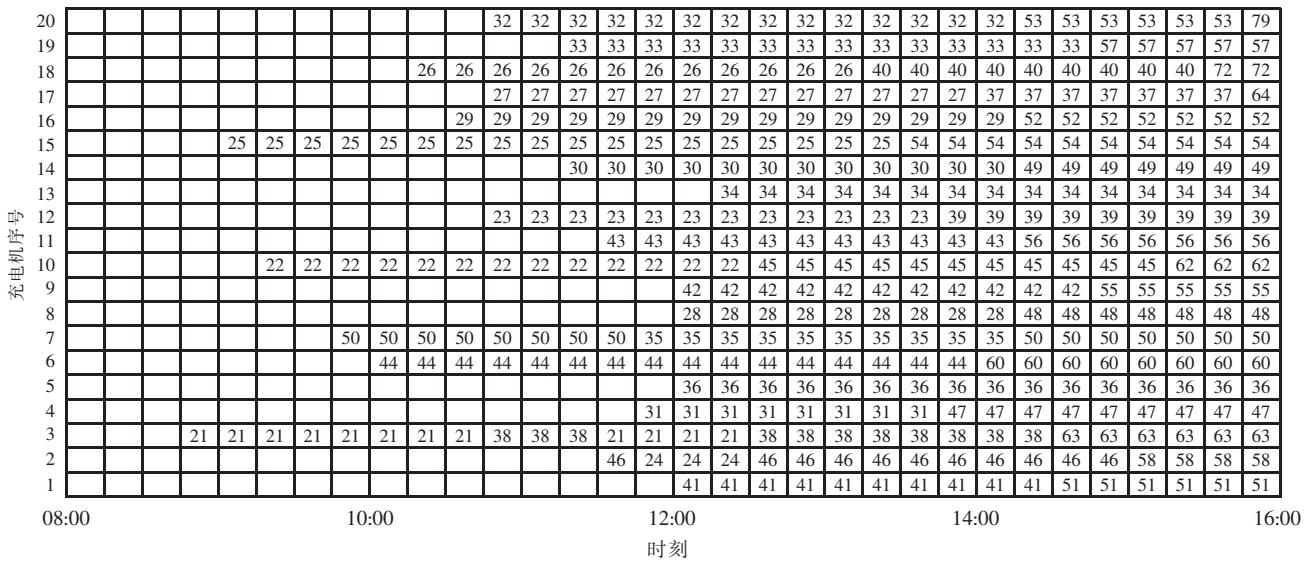
时刻

(c) 第二天 65—96 时间段

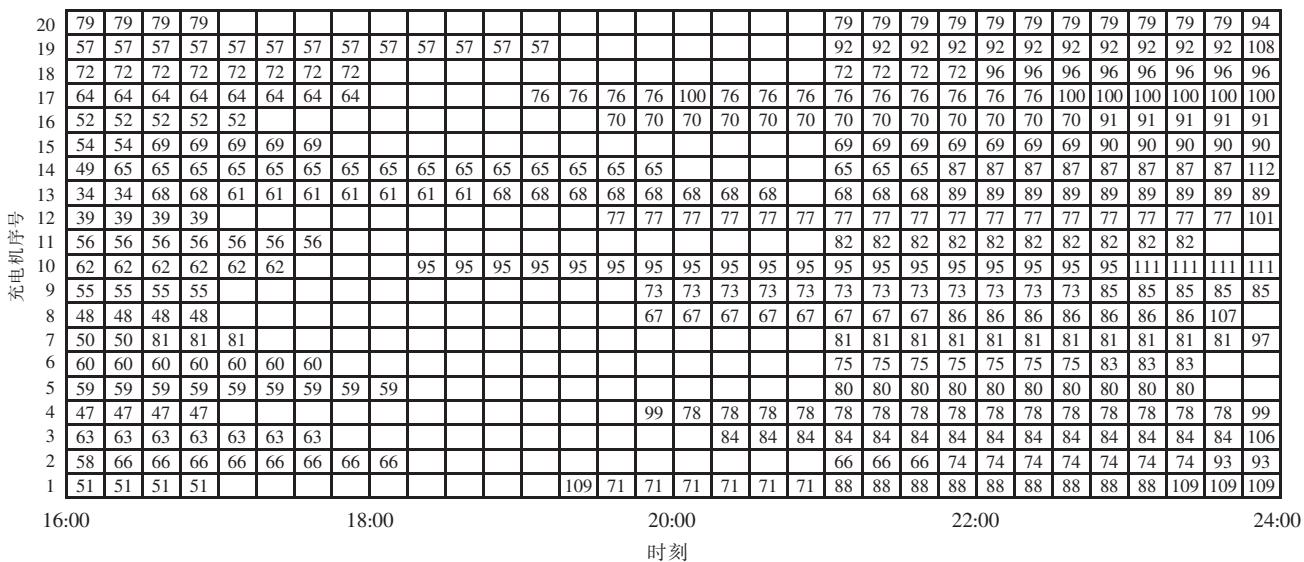
图 3 案例 1 可更换充电桩模型的充电决策(第二天)



(a) 第一天 1—32 时间段



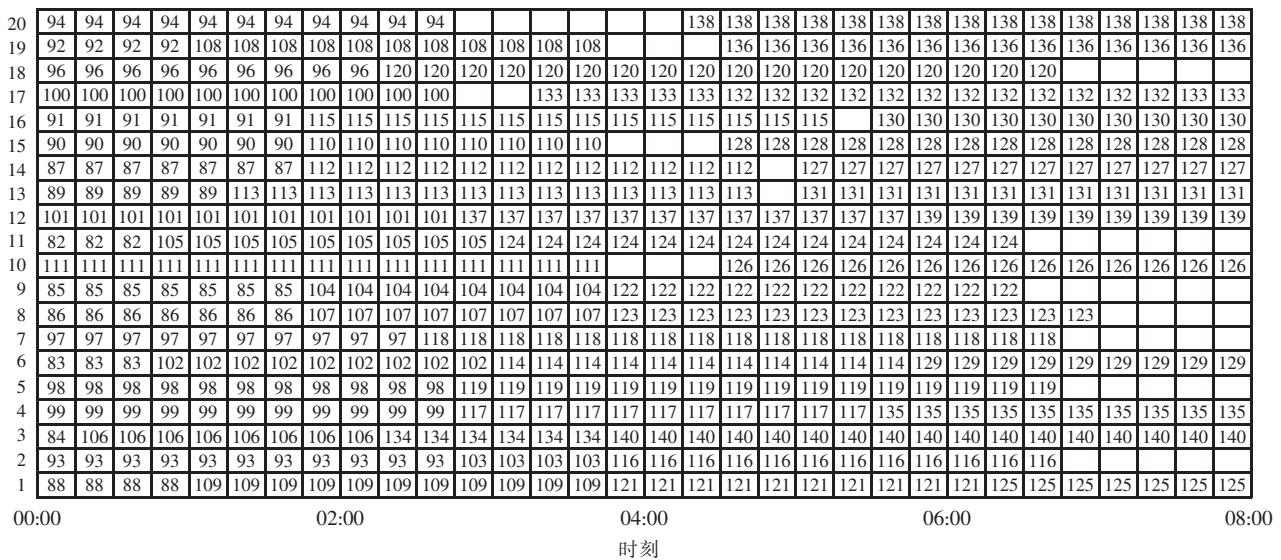
(b) 第一天 33—64 时间段



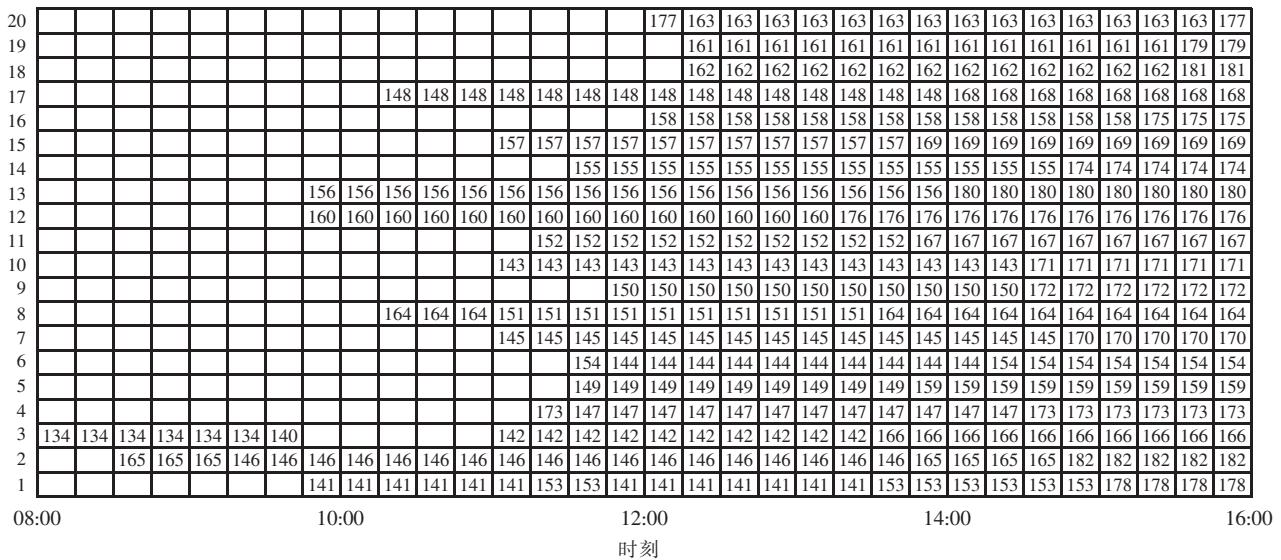
(c) 第一天 65—96 时间段

图 4 案例 1 不可更换充电桩模型的充电决策(第一天)

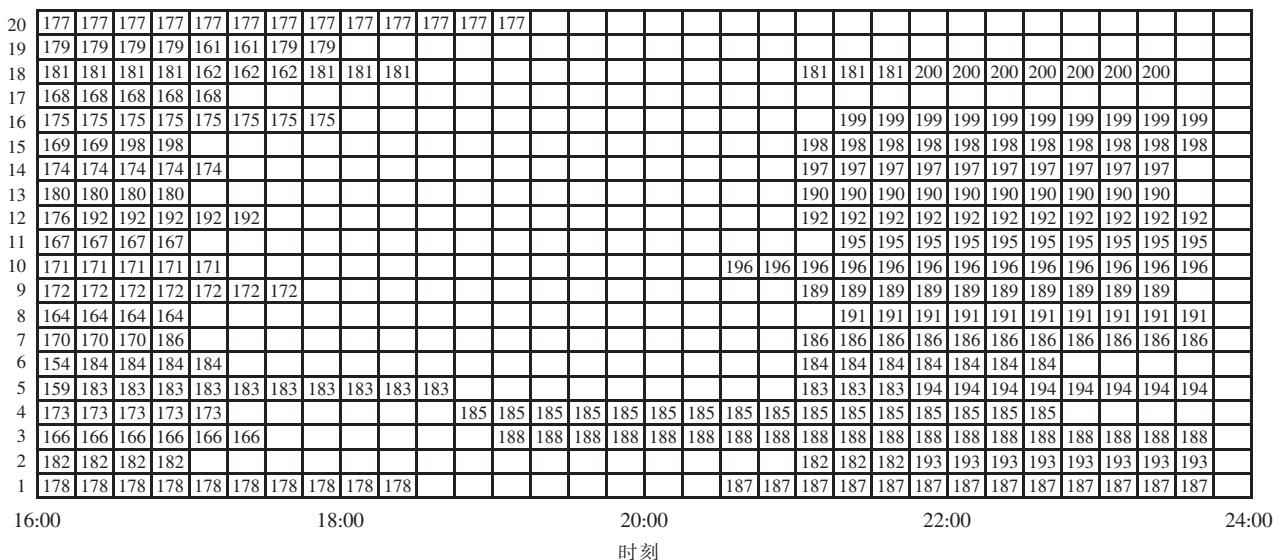
Fig.4 Charging decision of non-replaceable charger model in Case 1(first day)



(a) 第二天 1—32 时间段



(b) 第二天 33—64 时间段



(c) 第二天 65—96 时间段

图 5 案例 1 不可更换充电桩模型的充电决策(第二天)

Fig.5 Charging decision of non-replaceable charger model in Case 1(second day)

充电机序号

20				3			22	22	8	22	22	22	19		15	19	19	17						14	
19					5	2	8		7	13	9		10			3	12	19						22	
18				17	6	4	17	17		19	21	12		6	25		16		8					5	
17							18	20	10	11	24		2			9	4	4	4					4	
16								17		10	16	16	7	8										18	
15					17				1	5	16													19	
14				17	16	5	3	20	5	7	9	9		5	10		20			10	11			20	
13				14		19	24		14	12	6	4		9	9	7	16	16	17	11	9	20	9	16	
12						25	25		24	18			7	25		1	19	1	1	19	12	18	14	14	
11						18	18		19	19	19		19	19	21	23	23	23	24	24		24	24	25	
10				11		14	20	15	6	14	14	14	14	13		14	18	18		18	14			19	
9							2	2	2	2	2	23	2	6	6	14	11	9	9	9	20		17	12	12
8						11		22		22	15			23	23		1	24	25		25	25	25		25
7						22	22	22	22	2		20		20	20	20	2	13	13	20		21	21	21	
6						16		17	15	15	16		15	13	17	17	17	2	12		18	1			18
5						14	16			15	13	13		15	13	15	15	18	15	15		15	15	15	
4				3		11	11		11	13	13	9	9	25		9	10	15	18		10		23		23
3				3		7	7	7	6	6			7	7	7	8		6	8	8		13	8		9
2				3		6	6		8	4			18		4	5	5	5	5	5	14	5	5	5	6
1				3		3	3		1	1	1	21	1	10	1	1	1	21	21	1		2	20	2	2

00:00

02:00

04:00

06:00

08:00

时刻

(a) 第一天 1—32 时间段

充电机序号

20		48		48		32	34	39	41	61	32	33	33	43	57	62	38	26	51	43	67	44	64	51	150	106	106					
19	29		28	50	37	36	49		49	33	40	31	70	31	33	58	74	62	47	34	69	46	62	62	146	146	146					
18		50		30	28	30		41	42	74	68	74	60	60	64	60	66	29	64	72	55	150	150	150	141	141	51					
17	44			27	44		40	41	26	47	33	60	38	74	74	74	74	37	74	58	73	74	97	96	51	58						
16				33	27	35	38		48	34	48	70	43	74	41	72	35	60	28	30	71	71	72	72	72	73	73	55				
15		29	30		43	37	39		35	69	69	69	69	68	48	68	68	68	41	75	70	70	75	70	59	70	59	59				
14				48	35		40	61		50	41	70	31	36	70	58	55	65	65	51	57	58	58	66	57	55	67					
13		32	32		31		26		50	31	27	29	60	61	61	67	58	58	40	62	65	62	68	62	51	58	62	55	62			
12		28	34	26	37	44		39	33	27	30		56	45	68	55	27	55	55	70	55	57	62	57	70	57	61	88	96			
11				48		50	41	47	48	48	32		50	50	42	40	50	56	69	51	74	51	56	51	56	53	106	88	56			
10		46	29	46		35	49	26		46	34	37	60	47	48	48	45	45	49	49	37	49	49	27	49	54	49	127	150	141		
9		42	42	28	36	41	33	41	37	41		36	43		41	52	43	66	43	52	52	45	45	45	36	46	47	47	127	133		
8		26	26	44	40	26	46	50	40	48	45		40	74	35	40	40	65	41	41	41	35	40	42	34	44	46	31	46	127		
7				42		39	30		27	26		36	38	38	64	39	39	39	39	26	39	39	60	40	40	60	43	65	65	68	65	
6						40	40				40		35	56	26	37	37	37	37	53	35	53	53	38	53	74	71	38	38	38	69	
5				46	34	42		50	41	44	43		61	62	28	39	43	35	46	54	54	43	43	43	54	97	43	97	54	97	97	
4				50	29	46	38	29	35	32	35		49		36	35	40	32	32	38	32	32	53	28	33	53	33	33	33	36		
3						36		38	39	49	28			49	62	29	29	41	29	30	71	71	30	30	71	53	33	43	33	33	36	
2						34	46	38	46	47		46	40		32	28	28	51	28	28	33	32	66	28	33	28	68	68	74	71	71	
1				26	44	48		39	44	27	26		26	26	68	26	61	26	61	69	26	36	97	27	35	67	28	74	28	61	31	

08:00

10:00

12:00

14:00

16:00

时刻

(b) 第一天 33—64 时间段

充电机序号

20	150	150	106	59	133	85	146	150	79	149	146	75	118	77	149	149	149	87	131	107	87	129	87	87	102	107	133	143	102	134	136	126							
19	57	146	66	82	112	82	92	146	146	112	143	93	143	145	143	143	143	100	123	85	93	143	143	126	145	145	129	145	133	148	91								
18	141	64	64	141	141		139	139	139	139	54	117	85	146	133	134	142	142	142	142	77	142	142	142	142	119	142	105	117	142	130	131							
17	66	51	52	108	56	127	51	54	136	138	138	118	138	91	138	138		117	138	91	103	145	94	139	130	114	134	140	111	140	140	102							
16	73	133	88	133	88	88	141	141	85	77	127	146	82	143	133	136	133	91	77	133	85	133	134	134	134	116	143	135	135	143	135	121							
15	70	138	70	71	71	56	85	108	108	116	108	139		138	120		103	54	88	99	130	139	136	143	84	101	103	132	95	123	84	134							
14	67	108	79	69	96	55	59	97	63	84	84	127	96	127	127	138	82	139	134	124	128	128	128	149	128	128	99	110	114	98	81								
13	55	62	72	64	65	65	96	96	96	142	96	115	112	92	112	127	118	129	94	120	129	130	120	125	125	124	145												
12	58	73	96	61	92	69	150	88	88	88	108	88	88	92	88	135	125	92	139	92	93	133	116	116	116	87	133	116	87	116	116	87	117						
11	56	88	87	138	51	67	140	73	73	82	81	142	106	106	104	108	112	101	138	117	117	118	118	118	118	118	98	119	119	101	119	100							
10	112	55	141	112	73	60	69	71	71	141	53	92	149	142	96	96	131	143	118	104	104	120	104	104	146	129	103	76	101	130									
9	88	60	108	79	82	58	87	93	93</																														

充电桩序号

20	109	76	76	76	134	76	114	114	100	100	114	161	161	110	162	163	157	155	163	159	173	163	137	90	164	164	164	144	144	171	164	171
19	149	149	149	130	130	149	149	83	109	109	100	105	144	144	95	160	152	154	154	147	152	156	144	156	152	161	122	163	163	163	163	175
18	145	135	130	145	145	130	119	173	173	173	119	129	111	129	126	155	156	147	113	174	147	151	122	152	163	163	152	156	156	152	156	
17	95	140	140	136	140	95	145	95	95	155	167	147	168	168	168	107	158	168	80	168	80	161	166	169	169	122	173	173	172	173	151	
16	135	110	128	128	128	136	136	148	128	128	148	165	165	166	166	159	159	172	166	160	144	122	111	166	170	167	167	171	174	156	175	170
15	134	134	134	101	78	134	101	135	135	160	135	155	155	159	170	167	90	160	167	137	111	169	165	144	175	155	165	159	169	171		
14	129	129	151	129	129	151	153	129	129	131	158	153	153	167	155	158	155	158	158	155	159	160	160	160	159	168	160	168	169	154		
13	125	147	125	125	90	126	148	90	126	126	128	164	148	156	148	90	160	90	155	157	165	165	158	159	153	160	167	171	161	168	174	
12	119	119	119	144	76	120	144	124	110	124	124	148	147	147	147	147	169	153	144	144	169	157	157	158	158	147	163	166	166	170	167	172
11	117	131	145	131	117	107	80	113	119	80	123	123	80	95	80	147	123	147	111	107	155	155	157	111	157	111	175	175	162	166	161	
10	114	99	114	115	115	145	115	115	148	105	121	132	129	148	132	137	137	137	137	153	153	153	122	167	152	157	161	167	89	162	169	
9	102	101	120	109	119	109	113	103	113	113	113	95	126	132	129	132	132	132	132	173	167	147	147	165	153	158	153	160	151	160	161	166
8	142	102	102	90	103	103	103	107	107	95	109	121	123	155	160	171	123	80	123	163	162	144	162	153	162	162	162	159	160	164		
7	101	91	131	102	136	117	102	105	105	135	105	89	113	157	113	121	165	121	89	122	89	80	89	147	147	89	89	154	154	154	159	163
6	94	94	129	126	126	101	117	126	103	119	129	110	110	111	158	157	167	113	153	171	121	121	174	144	144	144	174	152	90	154		
5	93	93	142	99	113	100	100	81	81	137	107	107	113	107	113	113	159	173	121	161	111	173	137	157	137	137	151	159	175	152	156	
4	91	142	115	95	135	99	76	99	115	99	115	137	105	153	105	174	151	107	107	110	110	110	110	110	110	166	155	164	161	164	144	
3	86	86	93	148	83	168	95	168	168	114	168	168	95	121	83	95	107	95	95	107	137	164	152	111	155	111	154	122	122	122	151	152
2	81	81	81	81	81	83	81	153	83	125	95	80	83	83	137	152	89	167	90	155	90	107	90	168	168	90	90	90	173	90	162	
1	77	77	77	166	80	78	78	80	114	83	80	126	154	123	171	166	166	110	166	166	89	154	89	89	154	166	89	89	166	89	144	

00:00

02:00

04:00

06:00

08:00

时刻

(a) 第二天 1—32 时间段

充电桩序号

20																																					
19	169	194		190		192	190		180						178	223		219	192	192	202	204	195	186	186	219	219	219	209	206	219	202	204	215			
18				200	178	196		190	191							196	182	183	204	184	184	225															
17	156	186	188		156	194	191	185								181	185	192		181	181	231	183	178	178	223	177	223	181	176	189	181	189	189			
16				186	188	197	176	188									219	184	221	223	195	223	223	192	219	225	225	199	225	231	199	231	231	218			
15		197		199	194	181	177	197	190							177		191	219	192	186	221	186	192	221	221	192	205	221	221	221	205	222	223	223	224	
14	175	175	175	180		152				198	179	188	184	218	218			219	216	217	217	219	213	219	211	211	206	219	219	211	211	219	216				
13	174	174	174	200		200					183		195		214			179	225	213	213	208	213	201	208	206	213	231	213	213	213	216	216	231	231		
12	172	172		180	187	187	200	200	199		176	195	206	192	206	178	203	211	211	212	231	210	222	188	213	206	212	217	201	242	212						
11	171	154	171	199		198				198	198	183	198	176	198	198	199	221	198	221	199	199	200	199	200	199	200	199	200	193	206	193	193	211			
10	169		169			180				196		196	199	196	196	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197	199	178	199	199	214	193	206	204				
9	166	166	187	196							194	195	194	185	185	195	200	178	209	214	195	195	218	214	195	184	184	184	184	184	184	184	184	184	200	200	206
8	164	164	193	193							164	192	192	186	193	187		187	193	191	193	193	222	193	193	199	193	193	194	181	181	199	199	214			
7	196	196	193	175	175	175	184	180			195	196	190	190	190		195	190	190	190	196	195	198	198	191	191	191	191	191	191	191	191	191	225	202		
6	190		174	174	174	174	195	178				200	186	186	186	186	220	186	220	194	194	194	194	189	189	224	211	189	189	187	187	187	187	187	187	187	187
5	166	166	172	172	172	197	172	172					245	245			177			200	185	202	185	213	185	202	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
4	180			179	170	170	170						172				180	221		215	180	180	215	180	183	183	197	231	208	208	184	231	225	213	187	187	
3	199		195	184	183	192	183					190		184	177	223	200	178	178	200	197	179	180	204	183	183	197	183	224	215	207	183					
2	179	195			191						176	197	170	170	170	185	222	217	216	177	177	217	217	178	178	217	178	182	182	182	182	182	182	182	182	182	182
1						199	187	164			193					225	199	176	176	176	176	231	176	176	176	218	177	204	179	204	183	179	181	181			

16:00

18:00

20:00

22:00

24:00

时刻

(c) 第二天 65—96 时间段

图 7 案例 2 可更换充电桩模型的充电决策(第二天)

Fig.7 Charging decision of replaceable charger model in Case 2(second day)

充电桩序号

20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
19																									
18																									
17																									
16																									
15																									
14																									
13	12	12	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	12	12	12	12	12	12	12
12	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13	13	13	14	
11																									
10	15	15	15	15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15	15	15	15	15	15
9																				25	25	25	25	25	25
8																				21	21	21	21	21	21
7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
6																	24	24	24	24	11	11	11	11	11
5																	7	7	7	7	7	7	7	7	7
4																	19	19	19	19	19	19	19	19	19
3																	17	17	17	17	17	17	18	18	18
2																	8	8	8	8	8	8	18	18	18
1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4
00:00	02:00	04:00	06:00	08:00																					

(a) 第一天 1—32 时间段

充电桩序号

20	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
19	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
18	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
17																									
16	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
15	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
14	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
13																									
12	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
11	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
10	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
9	57	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
8	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
7	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
6																									
5	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
4	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
3	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
2	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
1	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
08:00	10:00	12:00	14:00	16:00																					

(b) 第一天 33—64 时间段

充电桩序号

20	55	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	123	100	100	100	100	100	100	100	100
19	59	59	59	59	59	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	112	112	131	131
18	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	106	106	106	106	106	106	130	130	130
17	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	102	102	102	102	102	102	102	102	102
16	51	51	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	73	103	103	103	103	103	103	103	103	103
15	75	75	105	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	105	105	105	105	105	105	105	105	105
14	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	94	94	94	94	94	94	94	94	94
13	97	97	97	97	97	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	135	135	135	135	117	97	97	97	97
12	50	74	98	98	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	98	98	98	98	98	98	98	98	98
11	62	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	110	110	110	110	110	110	110	110	110
10	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	116	116	116	116	116	116	116	116	116
9	70	70	70	70	70	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	104	104	104	104	104	104	104	104	104
8	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	96	96	96	96	96	96	96	96	96
7	63	63	63	63	63	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	109	109	109	109	109	89	89	89	89
6	77	92	92	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	92	92	92	92	92	92	92	92	92
5	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	84	84	84	84	84	84	84	84	84
4	71	93	93	93	53	71	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	93	93	93	93	93	93	93	93	93
3	64	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	91	91	91	91	91	91	91	91	91
2	90	90	90	90	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	83	83	83	83	83	83	83	83	83
1	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	86	86	86	86	86	86	86	86	86
16:00	18:00	20:00	22:00	24:00																					

时刻

20								193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	193	214	214	214	214				
19	175	175						198	198	216	216	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	216	216	216	216			
18	162	162	162						194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	215	215	215	215			
17								189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	189	209	209	209	209	209			
16	173	173	173	173	173	173	173		190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	210	210	210	210	210			
15	164	164	164						207	207	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	207	207	207	207	207			
14										186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	204	204	204	204	204	204			
13								187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	208	208	208	208	208	208			
12	174	174	174	174	174	174		212	212	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	212	212	212	212		
11	168	168	168	168	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	213	213	213	213	213	213	213	213	213	213		
10	167								183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203	203		
9	171	171	171						185	185	206	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	206	206	206	206	206		
8	166	166	166					182	182	182	182	182	182	182	182	182	182	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202		
7	169	169	169	169	205	184	184	184	184	184	184	205	205	205	220	184	184	184	184	184	184	184	184	205	205	205	205	205	220	220	
6	172	172	172	172	172	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179	199	199	179	179	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	
5		181	181	181	181	181	181	181	181	181	201	201	201	201	218	218	201	201	201	201	201	218	218	218	225	225	225	225	225		
4	170	170	170	170	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	200	200	200	200	200	200	200	200	200	222	222	222
3	165	165	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	188	188	188	188	188	188	188	188	211	211	211	211
2	161	161		177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	197	197	197	197	197	197	197	197	197	217	217	217	217		
1		176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	196	196	196	196	196	196	196	196	196	219	219	223	223	223	223		

(b) 第二天 33—64 时间段

(c) 第二天 65—96 时间段

图 9 案例 2 不可更换充电桩模型的充电决策(第二天)

Fig.9 Charging decision of non-replaceable charger model in Case 2(second day)

表3 案例2充电情况

Table 3 Charging condition of Case 2

模型	欠缺量总和/(kW·h)	充电需求不合理量/(kW·h)	充电成本/元
可更换充电桩模型	0	22.4	2502.2
不可更换充电桩模型	14.35	22.4	2492.9

表4 案例2不可更换充电桩模型欠缺量

Table 4 Power shortage of non-replaceable charger model in Case 2

车辆序号	欠缺量/(kW·h)	车辆序号	欠缺量/(kW·h)
162	3.95	249	9.4
164	1		

4 结论

本文依据电动汽车充电时间上的可调节性,分析用户充电需求的多样性以及与充电站服务能力的关系,运用混合整数线性规划方法,建立可更换充电桩和不可更换充电桩2种有序充电控制模型,分别求解得到充电站2天内的充电决策。所提模型和算法不仅可以在尽量满足客户充电需求的前提下有效降低充电站充电成本,还有助于调节电网负荷曲线,降低电网峰谷功率差,减小高峰期电网负载压力。

本文所提有序充电控制策略,不仅适用于大型集中式充电站场景,还适用于大型超市或者购物中心停车场、住宅小区停车场等其他应用场景,应用范围较广。在后续研究中,笔者将把本文模型和方法推广至车辆随机到来这一更接近实际情况的应用场景。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)的通知[EB/OL]. (2012-06-28)[2016-06-01]. http://www.gov.cn/zwgk/2012-07/09/content_2179032.htm.
- [2] 刘卓然,陈健,林凯,等. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建设,2015,36(7):25-32.
- LIU Zhuoran,CHEN Jian,LIN Kai,et al. Domestic and foreign present situationand the tendency of electric vehicles[J]. Electric Power Construction,2015,36(7):25-32.
- [3] 马玲玲,杨军,付聪,等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):140-148.
- MA Lingling,YANG Jun,FU Cong,et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control,2013,41(3):140-148.
- [4] 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.
- HU Zechun,SONG Yonghua,XU Zhiwei,et al. Impacts and utilization of electric vehicle integration into power system [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10.
- [5] 李秋硕,肖湘宁,郭静,等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术,2012,36(12):32-38.
- LI Qiushuo,XIAO Xiangning,GUO Jing,et al. Research on scheme for ordered charging of electric vehicles[J]. Power System Technology,2012,36(12):32-38.
- [6] 苏海锋,梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):17-22.

SU Haifeng,LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):17-22.

- [7] 陈静鹏,朴龙建,艾萍. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):42-48.
- CHEM Jingpeng,PIAO Longjian,AI Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):42-48.
- [8] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):38-43.
- XU Zhiwei,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):38-43.
- [9] 孙晓明,王玮,苏粟,等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):191-195.
- SUN Xiaoming,WANG Wei,SU Su,et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):191-195.
- [10] 葛少云,黄镠,刘洪,等. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):1-5.
- GE Shaoyun,HUANG Liu,LIU Hong,et al. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):1-5.
- [11] 黄润,周鑫,严正,等. 计及电动汽车不确定性的有序充电调度策略[J]. 现代电力,2012,39(3):57-63.
- HUANG Run,ZHOU Xin,YAN Zheng,et al. The controlled charging dispatch strategy by considering of the uncertainty of electric vehicles[J]. Modern Electric Power,2012,39(3):57-63.
- [12] HE Y,VENKATESH B,GUAN L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1095-1105.
- [13] LOPEZ J A P,SOARES F J,ALMEIDA P M R. Integration of electric vehicles in the electric power system[J]. Proceedings of the IEEE,2010,99(1):168-183.
- [14] WANG J,LIU C,TON D,et al. Impact of plug-in hybrid electric vehicles on power systems with demand respond and wind power[J]. Energy Policy,2011,39(7):4016-4021.
- [15] LIU C,WANG J,BOTTERUD A,et al. Assessment of impact of PHEV charging patterns on wind-thermal scheduling by stochastic unit commitment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(2):675-683.
- [16] LEE T K,BAREKET Z,GORDON T,et al. Stochastic modeling for studies of real-world PHEV usage:driving schedule and daily temporal distributions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2012,61(4):1493-1502.

作者简介:



王晓琨

王晓琨(1991—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车有序充电优化调度与控制等(E-mail:dawnjade_wang@163.com);

翟桥柱(1972—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为大规模系统优化调度及电力市场竞价等(E-mail:qzzhai@sei.xjtu.edu.cn);

白婕(1991—),女,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化调度等(E-mail:NCEPUstbj@163.com)。

(下转第102页 continued on page 102)

Wind-power forecasting error simulation considering output level and self-correlation

YANG Jian, ZHANG Li, WANG Mingqiang, HAN Xueshan

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,
Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The forecasting error of wind power is affected by the forecasted output level and presents obvious self-correlation in time sequence, based on which, a method of wind-power forecasting error simulation considering both aspects is proposed. The advantages of Copula function in describing the correlation among variables are fully explored. The joint probability distribution of forecasted and actual wind-power outputs is analyzed to determine the conditional distribution function of forecasting error at different output levels. The correlation of forecasting error between adjacent instants is modelled and, combined with the conditional distribution function, a candidate data list is generated. Corresponding data are picked up in turn from the candidate data list according to the forecasting error of previous instant to form a simulation sequence of wind-power forecasting error. The effectiveness of the proposed method is verified by case simulation.

Key words: wind power; forecasting error; output level; self-correlation; Copula function

(上接第82页 continued from page 82)

Ordered charging method of electric vehicles based on mixed integer programming

WANG Xiaokun, ZHAI Qiaozhu, BAI Jie

(System Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

Abstract: An ordered charging control strategy is proposed to reduce the charging cost of charging stations as far as possible, which ensures that the EV(Electric Vehicle) charging demand is satisfied. The relationship between EV charging time and owner requirement is analyzed, and with the consideration of charging energy that the owner required, the mathematical models of two operation modes, i.e. replaceable charger and non-replaceable charger in charging process, are established respectively, which takes the minimum sum of charging station cost and penalty cost of EV charging power shortage as the objective function and the charging power and energy as the constraints. The EV charging demands in two days are simulated and the mathematical models are solved by mixed integer programming and heuristic fast algorithm to obtain the charging decision matrix and charging power shortages of each EV in the two days, which verifies the feasibility of the proposed ordered charging control strategy. Simulative results show that, the proposed ordered charging control strategy can take advantage of the charging station resources better than the disordered charging scheme, reduce the charging cost effectively and contribute to peak-load shifting.

Key words: electric vehicles; operation dispatching; ordered charging; control; mixed integer programming; mathematical models