

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缺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机与不可更换充电机的数学模型。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缺量,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柱产业之一,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电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机与不可更换充电机的数学模型。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 台充电机,并且充电过程是恒功率的^[8],即每台充电机的充电功率恒定为 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:

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

同样,定义第 m 辆电动汽车容许充电的最后一个时间段为:

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

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 $T_{m,\text{a}}=34$ 、 $T_{m,\text{b}}=56$,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 可更换充电机数学模型的建立与求解

可更换充电机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机上继续充电,而不是固定在某台充电机充电,允许更换充电机时,可以显著提高充电机利用率,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 个时间段在充电机 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 $E_{\text{shortagem}}$ 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 $E_{\text{shortagem}}$ 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:

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

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。

充电机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:

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

欠缺量非负约束如下:

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

式(6)表示在任意充电机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机上充电;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。

可更换充电机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 不可更换充电机数学模型的建立

不可更换充电机表示电动汽车在充电过程中不可随意更换充电机,只能固定在分配到的充电机上充电。

定义 0-1 矩阵 $E_{M \times N}$ 表示车辆被分配到固定的充电机上充电的分配矩阵,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机 n 充电时, $e_{m,n}=1$;否则 $e_{m,n}=0$ 。

不可更换充电机数学模型的目标函数为:

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

约束与可更换充电机模型的约束一致,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机;式(12)表示任意电动汽车只在被分配到的充电机上充电。

2.3 不可更换充电机数学模型的求解

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

选择利用率最高的充电机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

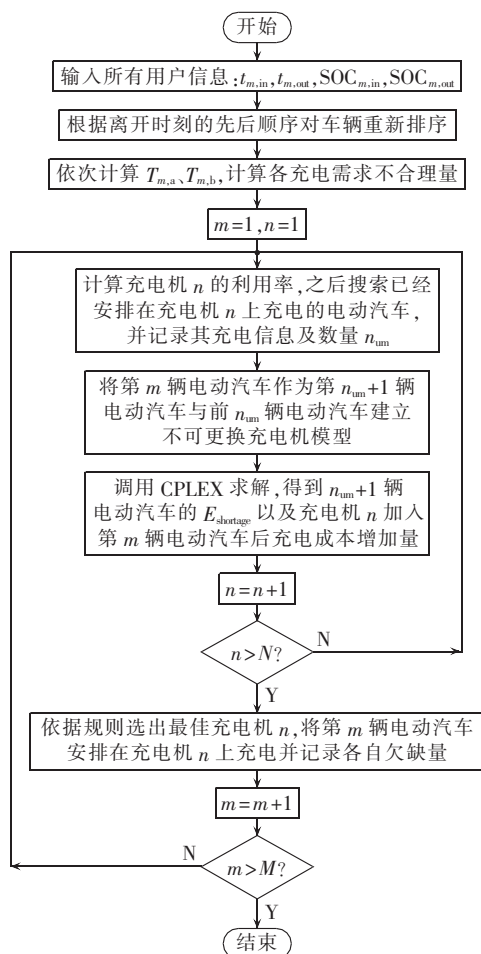


图 1 启发式快速算法流程图

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,使充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。

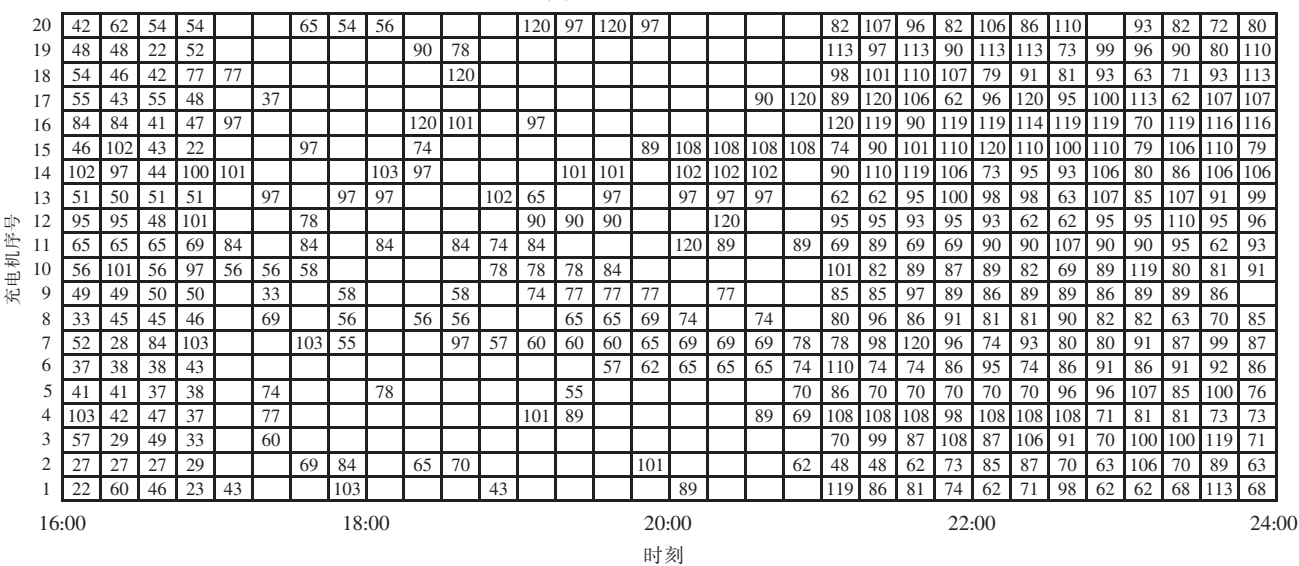
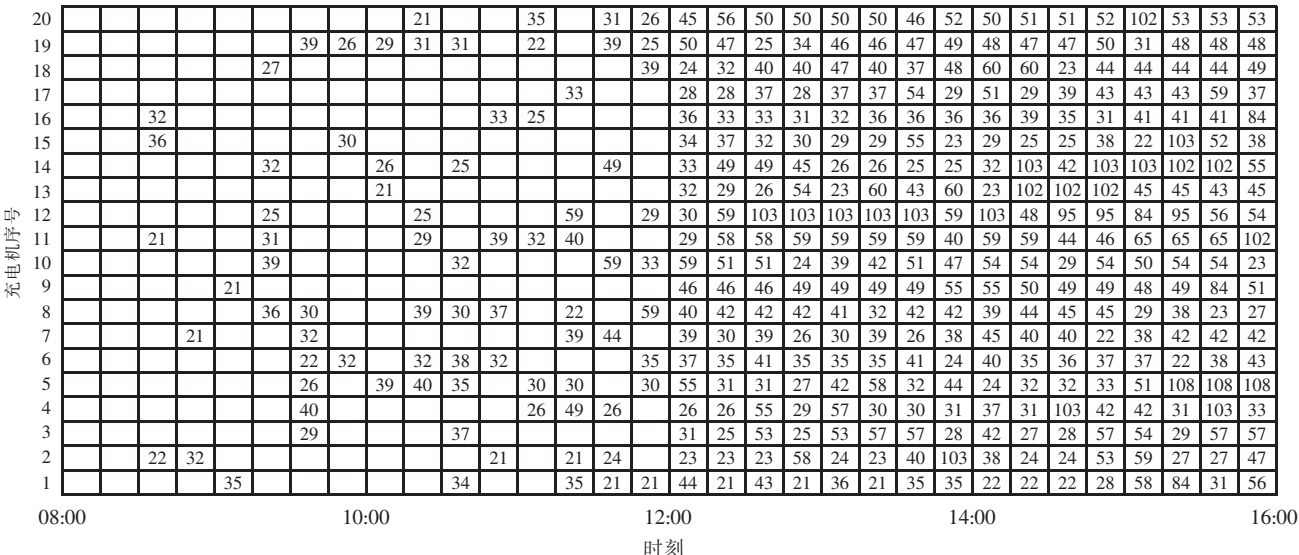
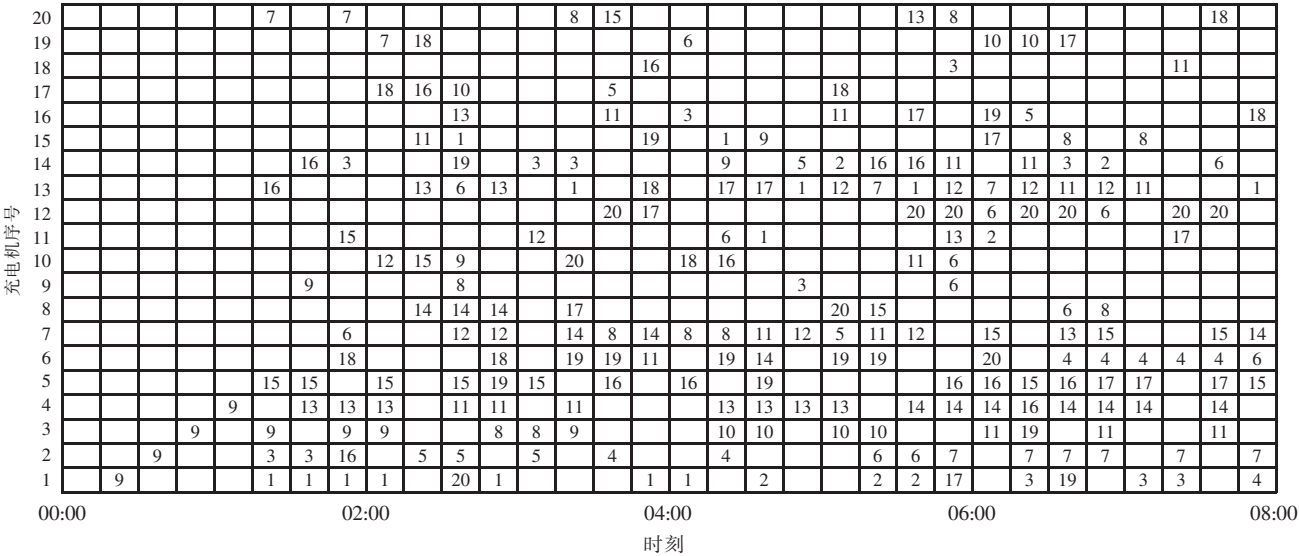
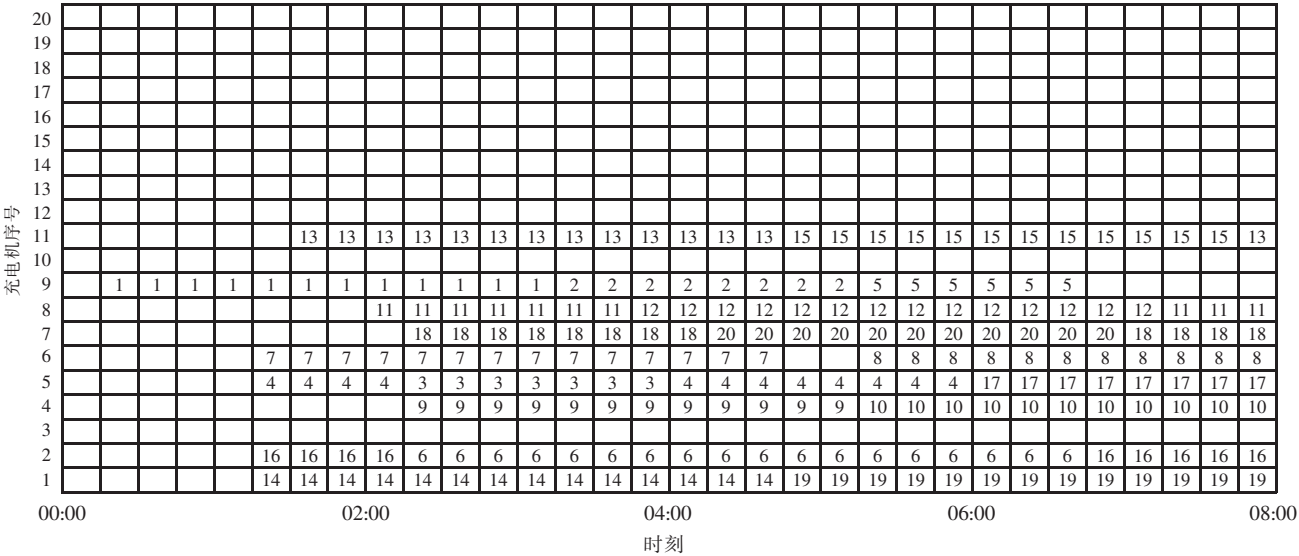
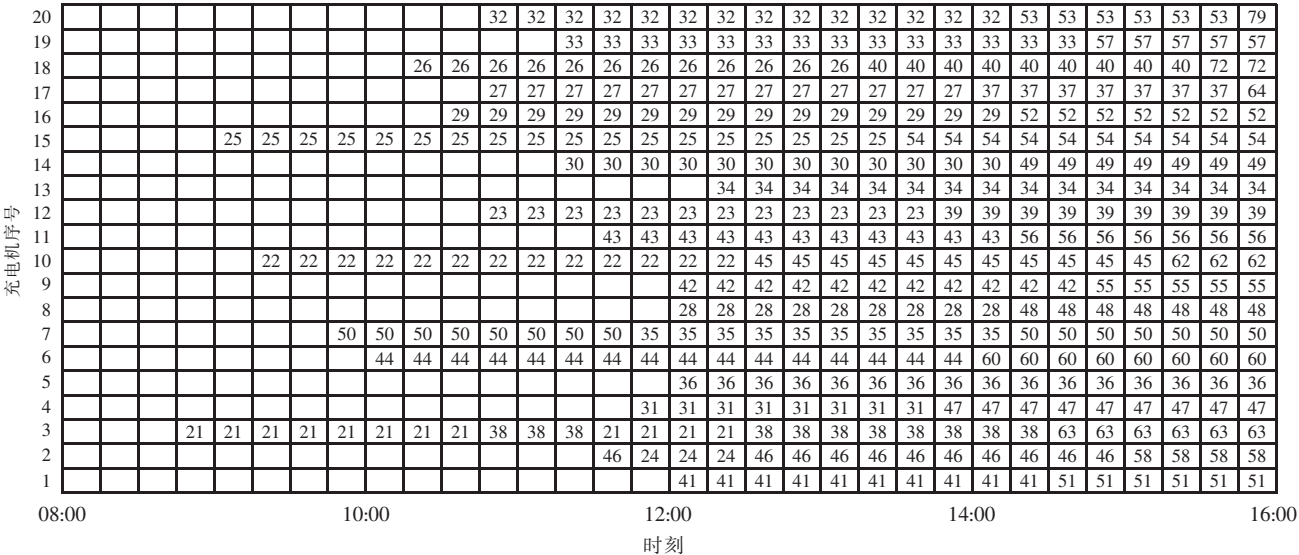


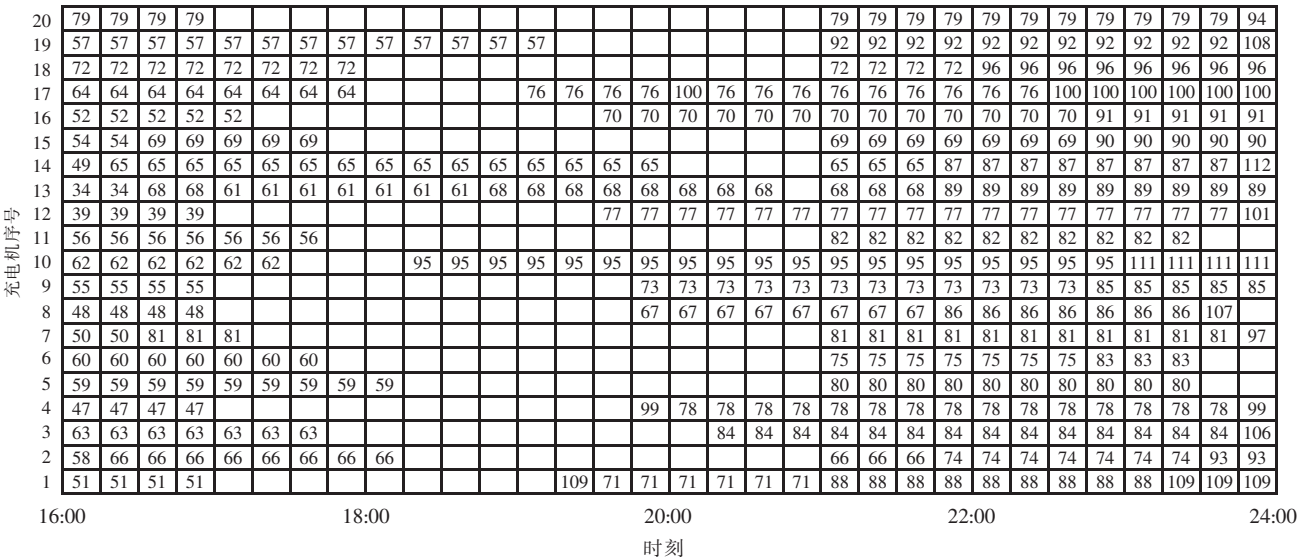
图 2 案例 1 可更换充电机模型的充电决策(第一天)
Fig.2 Charging decision of replaceable charger model in Case 1(first day)



(a) 第一天 1—32 时间段



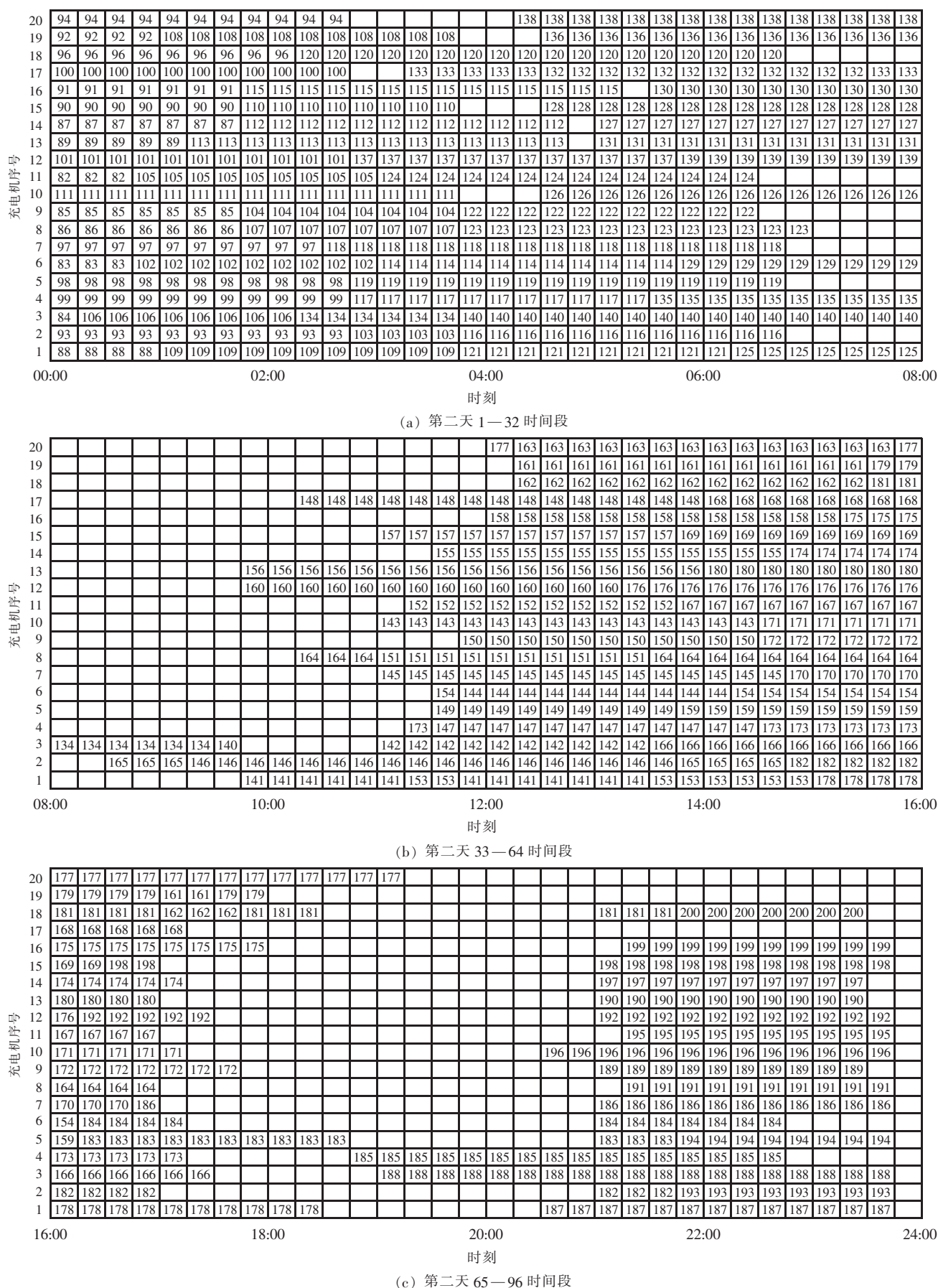
(b) 第一天 33—64 时间段

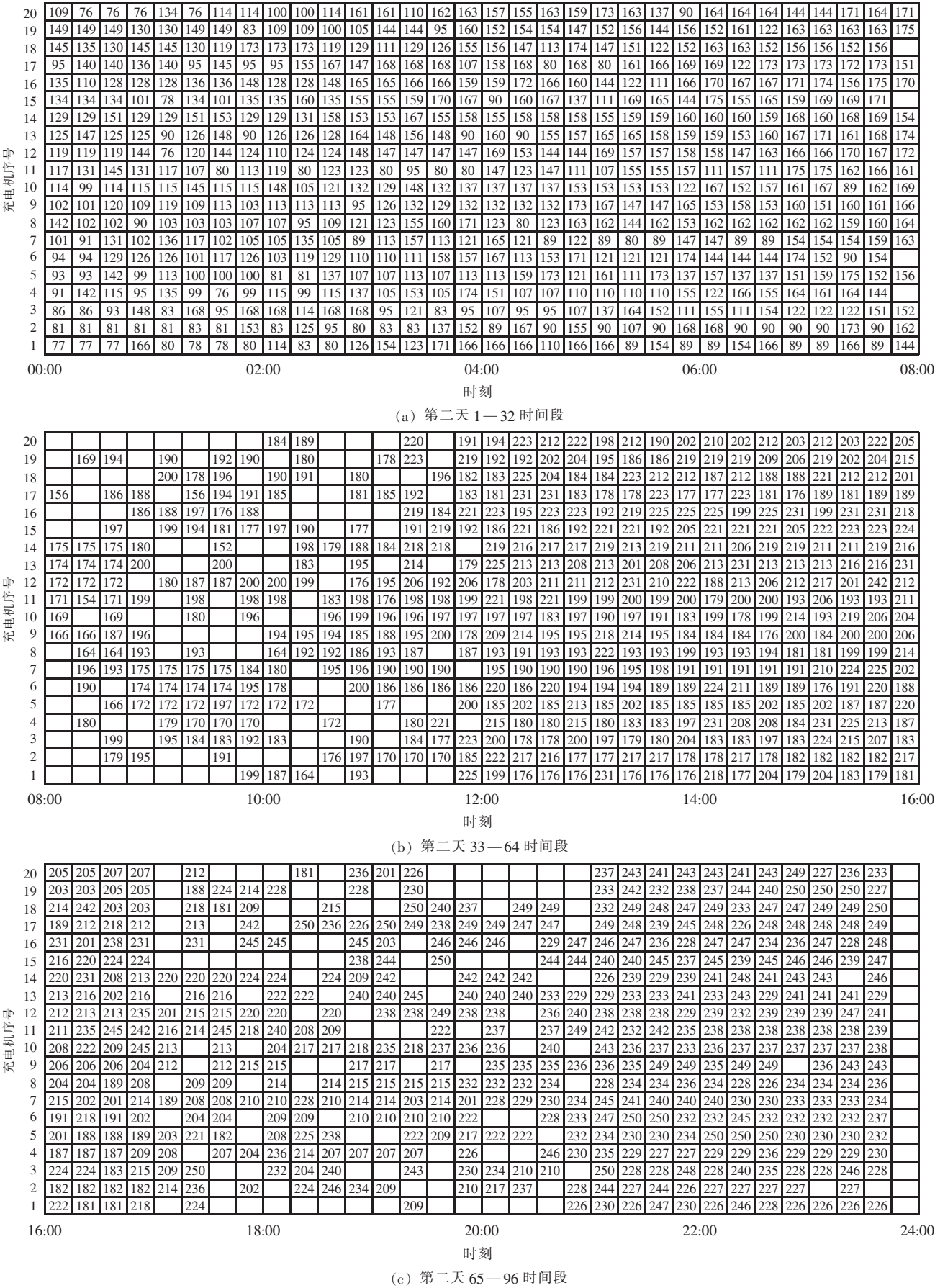


(c) 第一天 65—96 时间段

图 4 案例 1 不可更换充电机模型的充电决策 (第一天)

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





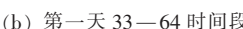
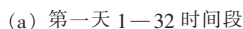


Fig.8 Charging decision of non-replaceable charger model in Case 2(first day)

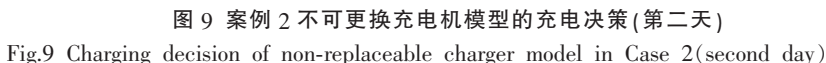


表 3 案例 2 充电情况
Table 3 Charging condition of Case 2

模型	欠电量总和/ (kW·h)	充电需求不合理 量/(kW·h)	充电成 本/元
可更换充电机模型	0	22.4	2502.2
不可更换充电机模型	14.35	22.4	2492.9

表 4 案例 2 不可更换充电机模型欠电量
Table 4 Power shortage of non-replaceable charger
model in Case 2

车辆序号	欠电量/(kW·h)	车辆序号	欠电量/(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,建立可更换充电机和不可更换充电机 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,减小高峰时期电网负载压力。

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/jw/gk/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,艾芊. 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.
CHEN 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,黄缪,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] LOPES 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)。

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