

大规模电动汽车充电需求及影响因素

杨冰^{1,2} 王丽芳¹ 廖承林¹

(1. 中国科学院电力电子与电力传动重点实验室 电工研究所 北京 100190
2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 通过分析传统汽车的行驶规律,建立了大规模通勤用电动汽车充电需求模型,探讨了对充电需求的影响因素。论文在用户行驶开始时间、结束时间和行驶里程三个因素无关的条件假设下,采用蒙特卡洛模拟方法建立了规模化电动汽车充电需求模型。基于用户行驶规律,分析了电动汽车类型、充电功率、渗透率和充电情景等因素对规模化电动汽车充电需求的影响,通过仿真实验分别得到各影响因素对充电需求的影响情况。

关键词: 充电需求 电动汽车 蒙特卡洛 影响因素

中图分类号: TM911

Research on Power-Charging Demand of Large-Scale Electric Vehicles and Its Impacting Factors

Yang Bing^{1,2} Wang Lifang¹ Liao Chenglin¹

(1. Key Laboratory of Power Electronics & Electric Drives Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190 China
2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China)

Abstract A power-charging demand model of large-scale electric vehicles (EVs) which are used for commuting is established under the traffic rule of the tradition vehicles, and then the impacting factors of the demand are investigated in this work. Under the hypothesis that the factors, which include users' starting time, ending time and the travelled distance, are independent each other, Monte Carlo simulation method is used to establish a power-charging demand model. Under the situation that the users' habits is fixed, the charging demand model is used to analyze the factors including EVs' types, charging power, EVs' penetration rates, and the charging scenarios to the power-charging demand. The impact results, different impacting factors to the charging demand, are achieved after the comparisons of simulation experiments.

Keywords: Power-charging demand, electric vehicles, Monte Carlo, impacting factors

1 引言

随着石油资源的消耗殆尽,近年来电动汽车的发展得到了人们的青睐^[1],各国政府也推出了相应的政策来鼓励电动汽车的发展:美国国家能源部实施了EV project计划,通过各种办法来推动电动汽车的发展;中国国家科技部也牵头实施了“十城千

辆”计划^[2],其目的就是推动电动汽车及其相关技术在中国的使用和发展。随着自然资源的消耗和国家政策的支持,电动汽车的使用将会成为未来的一种发展趋势。然而大规模电动汽车的使用必将形成一个巨大的充电需求,进而会给电网的规划、运行等带来巨大的挑战。为了分析电动汽车充电负荷给电网带来的负荷影响、未来配电网的规划、以及电动汽车给电网带来的冲击影响等问题,电动汽车充电需求模型的研究和建立是首要的也是至关重要的一个环节^[3-5]。

关于电动汽车充电需求模型的建立,国内外已经有不少的专家和学者进行了研究。研究的目的主要有:电动汽车与新能源配网并网的可行性^[6],电动汽车对电网带来的影响^[7],电动汽车有序充电^[8],含有电动汽车的电网潮流计算^[9]等。目前关于充电需求模型的建模方法主要有两种:①采用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo Simulation, MCS)的方法抽样计算得出充电需求曲线,即用 MCS 方法抽取一定数量的电动汽车及其行驶规律数据,进行模拟电动汽车行驶和充电,得到规模化电动汽车的充电功率曲线^[6,10-16];②采用排队理论(Queueing Theory, QT)分析得到电动汽车充电站的充电功率表达式,进而得到一种充电的随机概率模型^[9,17-19]。

两种模型的建立均要考虑到一些影响因素,总结起来主要有三类:用户的用车习惯、电动汽车的充电特性和电动汽车的规模。对于充电需求模型的建立以及应用,文献中的研究主要是用于其他问题的分析^[6-9],而很少有研究来分析这些影响因素对其充电需求的影响。很多文献中研究了不同渗透率情况下充电需求的变化情况,但是没有给出一个确定性的结论;而对于不同充电功率、不同动力电池容量和续航里程、以及不同电动汽车构成等影响因素对充电需求的影响,目前国内外尚没有文献说明,而这些因素对于提高电动汽车充电需求的精度至关重要。

本文根据北京市机动车的行驶规律,采用蒙特卡洛模拟的方法建立了通勤用电动汽车充电功率需求模型,并在此模型的基础上对比了不同电动汽车类型、不同充电功率以及不同渗透率等影响因素下规模化电动汽车的充电需求的变化情况。

2 用户行驶规律建模

用户的行驶规律建模是建立充电需求模型的前提条件。《北京市 2011 年交通发展年度报告》统计了北京市居民通勤用车的行驶情况,包括:通勤用车的上班行驶开始时间、停止时间,下班行驶开始、停止时间及行驶里程的统计数据。

2.1 机动车的出行时间分布

根据统计数据,拟合得到上班行驶开始时间、停止时间,下班行驶开始时间、停止时间的概率分布情况。其中,上班行驶开始时间近似服从分段柯西分布,上班行驶停止时间近似服从正态分布,下班行驶开始时间近似服从柯西分布,下班行驶结束时间近似服从正态分布,对应的概率密

度函数表达式为

$$y_1 = \begin{cases} \frac{1}{1.2\pi[1+5(x_1-7.3)^2]} & 0 \leq x_1 \leq 7.5 \\ \frac{1}{1.05\pi[1+6(x_1-8.2)^2]} & 7.5 \leq x_1 \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.6} e^{-\frac{(x_2-8.75)^2}{2 \times 0.6^2}} \quad 0 \leq x_2 \leq 24 \quad (2)$$

$$y_3 = \frac{1}{0.75\pi[1+3(x_3-17.2)^2]} \quad 0 \leq x_3 \leq 24 \quad (3)$$

$$y_4 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.8} e^{-\frac{(x_4-18.2)^2}{2 \times 0.8^2}} \quad 0 \leq x_4 \leq 24 \quad (4)$$

式中, y_1, y_2, y_3, y_4 分别表示各分布的概率密度; x_1, x_2, x_3, x_4 分别表示各种分布的时间范围。

2.2 机动车行驶距离分布

根据对北京市的回龙观和天通苑两个居民小区的上班行驶距离调研,认为其他居民小区机动车的行驶里程规律与此相似,通过数据拟合得到用户上班出行距离服从伽马分布,其分布密度函数为

$$y_5 = \frac{1}{b^a(a-1)!} x_5^{a-1} e^{-\frac{x_5}{b}} \quad x_5 \geq 0 \quad (5)$$

式中, $a=5, b=3, y_5$ 表示概率分布密度, x_5 表示时间范围。

根据上述用户行驶时间分布和行驶里程分布,可以得到电动汽车用户可能的充电时间区间和需要充电的能量值。充电区间可以设定为两段:上班行驶结束时间到下班行驶开始时间之间,下班行驶结束时间到下一次上班行驶开始时间之间;充电能量可由每次行驶的距离和动力电池充电的起始 SOC (state of charge) 值计算得到。

3 动力电池充电建模

3.1 电动汽车类型及充电接口

目前关于电动汽车动力电池类型及容量尚没有国际标准,各汽车厂家均是按照各自的标准进行生产和推广,因此投入运行的电动汽车的动力电池容量、续航里程等都有一定的差异。在北京市示范运行的主要车型和国际上比较知名的车型及其电池参数见下表。

表 6 种电动汽车电池参数比较

Tab. Comparison of the battery parameters of six EVs

车辆名称	车型	电池类型	容量/kWh	续航里程/km
Nissan-Leaf	纯电动	锂离子	24	160
BYD-E6	纯电动	锂离子	63.3	295
Nissan-Altra	纯电动	锂离子	29.07	130
福田 Midi	纯电动	锂离子	32	260
长安 mini	纯电动	锂离子	19.2	105
北汽 C30	纯电动	锂离子	22.8	130

3.2 动力电池充电模型

动力电池充电模型主要用于模拟电动汽车的充电过程,以得到单台电动汽车的充电功率曲线。在本文的研究中采用“恒功率”充电方式;认为充电时电池两端电压恒定,即

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{UI}{C} \times t \quad (6)$$

式中, $SOC(t)$ 表示动力电池的荷电状态; SOC_0 表示电池充电起始荷电状态; U 为电池两端的电压; I 为充电电流; C 为电池的容量, kWh; t 为充电时间。

3.3 动力电池充电起始 SOC 设定

从式(6)可以看出,动力电池的起始 SOC 值对充电时长和充电能量起决定性的作用。对于单台电动汽车的分析,起始 SOC 值可按 1 来计算和分析,而对于一定规模的电动汽车充电需求的分析,各台电动汽车的起始 SOC 会有一些的差异。本文研究中,认为各台电动汽车的起始 SOC 均为 1,电动汽车按照行驶规律模拟运行和充电,按照运行后的某一天作为起始进行分析计算,这样各台电动汽车的起始 SOC 会有所差异,而且与用户的使用规律有关^[13]。对于电动汽车行驶前后的 SOC 值计算为

$$SOC(t_2) = \left(\frac{SOC(t_1)}{100} - \frac{d}{D} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中, $SOC(t_2)$ 表示上一次充完电的电池电量; $SOC(t_1)$ 表示行驶完成后的电池电量(或电池充电起始电量); d 表示行驶里程; D 表示续航里程。

4 仿真算法

通过对用户行驶规律和动力电池的建模,按照蒙特卡洛模拟法建立充电需求模型的方法,可得到规模化电动汽车的充电需求。可归纳为 5 个步骤:

(1) 用户数据准备:包括用户行驶时间、行驶里程等概率分布模型,即式(1)~式(5);使用车型组成等。

(2) 按照行驶时间和日行驶里程概率分布抽

取一定数量汽车,形成电动汽车集群数据库。

(3) 确定充电方式和充电电流,各台车由于不同的充电地点,充电的情况会有所不同。

(4) 设定电动汽车的充电约束条件,和充电情景,并模拟电动汽车的运行和充电情况。

(5) 将各台电动汽车的充电功率按照时间进行累加,得到总的充电需求功率曲线。

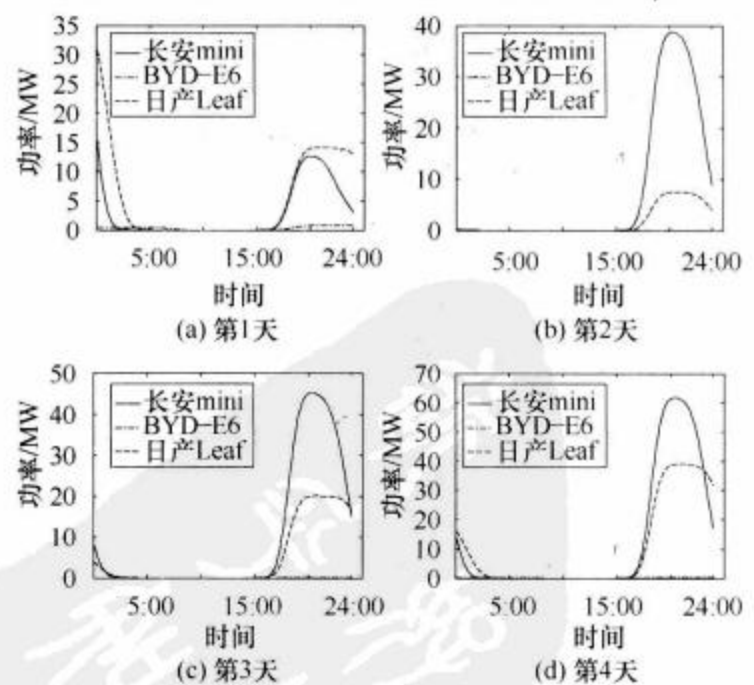
5 影响因素分析及仿真计算

影响规模化电动汽车充电需求的三类因素中,用户习惯包含用户的行驶时间、行驶里程、充电情景等;充电特性包含充电方式以及充电起始 SOC 分布等;电动汽车的规模指电动汽车的渗透率。其中,用户的行驶时间、行驶里程对于特定地区其分布特性是既定的,因此在分析特定地区电动汽车充电需求时,需要考虑电动汽车车型、充电功率、电动汽车规模及充电情景等影响因素,本文在上文所建立的蒙特卡洛模拟电动汽车充电需求模型的技术上,分别进行了对应仿真模拟。

假设条件:①充电设施足够;②电动汽车每公里耗电量不变;③各电动汽车之间独立;④电动汽车在周末均有足够时间充满电,仿真运行 5 天分别对应 5 个工作日,第一天运行的起始 SOC 为 1;⑤不考虑动力电池的损耗。

5.1 不同电动汽车车型

从上文表中选择长安 mini, BYD-E6, 和日产 Leaf 三类电动汽车进行充电实验仿真。假设三类电动汽车的出行规律都服从上述北京市机动车的行驶规律,充电功率均为 3.3kW,渗透率均为 1%(4 万辆),充电时间设定为下班到达时间,充电条件为满足下一次行驶需求,仿真充电功率需求曲线如图 1 所示。



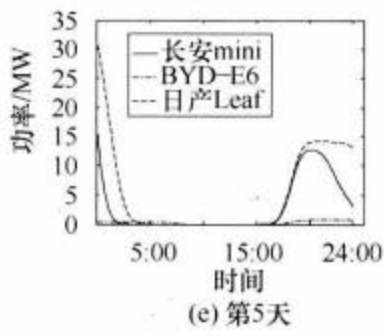


图 1 不同车型情况下的充电功率曲线

Fig.1 Power-charging profiles of different EV types

从图 1 中可以看出，不同电动汽车由于电池容量和续航能力不同，充电功率和充电时间长度都有所不同。相比三种车型，长安 mini 的动力电池容量最小，BYD-E6 的电池容量最大。而在 5 天的充电中，长安 mini 的充电功率远大于其他两种，最大充电功率达到 61.7MW；BYD-E6 每日的充电功率最小，5 天的充电中最大充电功率只有 0.76MW。

图 2 所示为 3 种不同电动汽车日充电量对比，长安 mini 的日充电量也最大，BYD-E6 的日充电量最小。从这两点分析，由于动力电池的容量不同，充电功率需求和日充电量需求都有所不同，而且电池容量越小，日充电功率需求和充电量值越大。

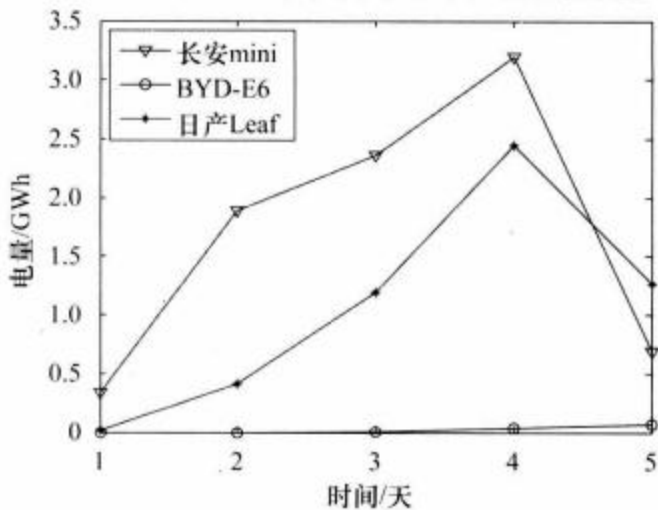


图 2 3 种不同车型日充电电量

Fig.2 Daily charging capacity of three different EV types

5.2 不同充电功率

选择 Nissan Altra 进行不同充电功率时的充电需求仿真。电动汽车的渗透率为 1%，行驶规律同上，充电时间选为下班到达后，充电功率分别设定为 2.5kW 和 3.3kW，得到如图 3 的充电功率需求曲线。

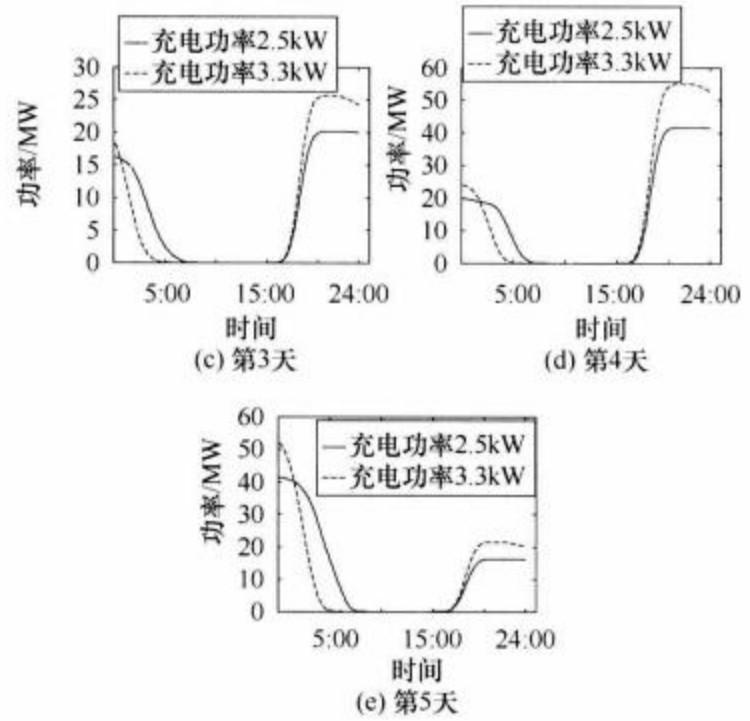
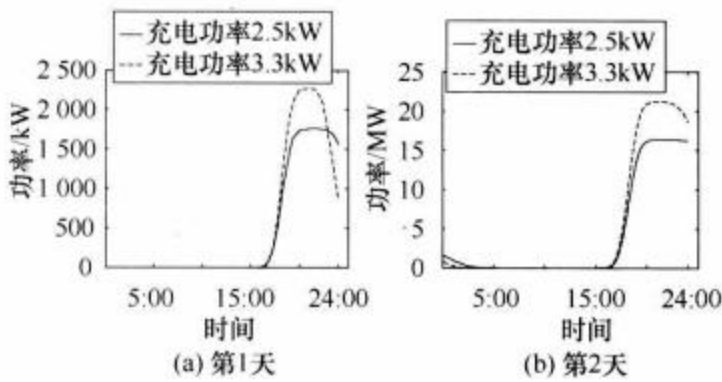


图 3 不同充电功率情况下的充电功率曲线

Fig.3 Power-charging profiles of different charge powers

从图 3 中的充电功率曲线可以看出，5 天的充电功率曲线中，3.3kW 的充电功率比 2.5kW 的充电功率大，第 4 天充电时这两种充电功率的峰值差最大，为 13.4MW；而 2.5kW 充电功率的充电时间却比 3.3kW 充电时间长。

图 4 所示是两种充电功率的日充电量对比，可以看出 3.3kW 充电时的日充电量比 2.5kW 充电功率大，第 4 天的充电量差值最大，达到 0.494MWh，5 天的总充电量相差 0.495MWh。

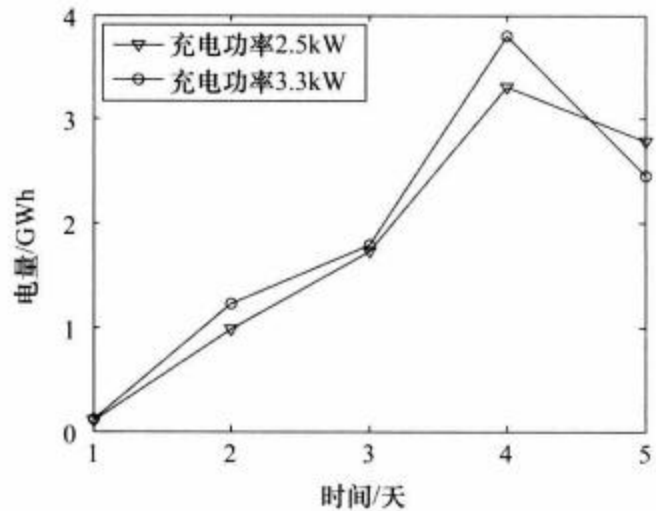


图 4 不同充电功率日充电量

Fig.4 Daily charging capacity of different charging power

5.3 不同电动汽车渗透率

选择表中的 6 种不同的电动汽车进行仿真，分别计算 6 种车型在等比例，充电功率均为 3.3kW，充电开始时间为下班到达后，电动汽车总渗透率为 10%、30%和 50%时的充电情况，得到如图 5 所示的日充电功率需求曲线。

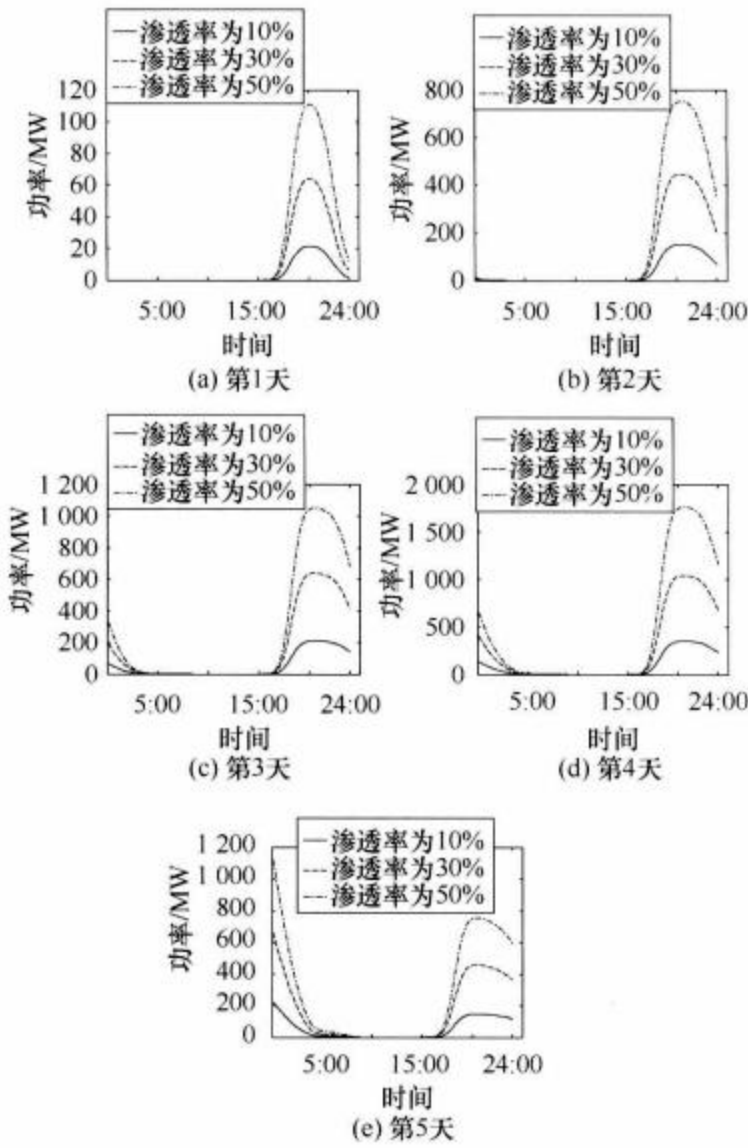


图5 不同渗透率情况下的充电功率曲线

Fig.5 Power-charging profiles of different penetration rates

从图5中可以看出,电动汽车充电需求随渗透率的增大而增大,三种渗透率情况下的充电时间范围基本一致,充电功率需求与渗透率增长基本呈线性关系,而充电峰值也是在第4天最大。

5.4 不同充电情景

与不同渗透率情况的仿真条件相同,将充电时间设定为上班到达时间至下班开始时间和下班到达时间至下次上班开始时间,即将充电情景设定为居住地和工作单位两地,得到图6所示的日充电功率需求曲线。

从图6中可以看出,采用两地充电时充电功率需求曲线出现两个充电高峰,充电功率和渗透率大小也基本呈比例关系,第4天的充电功率也达到最

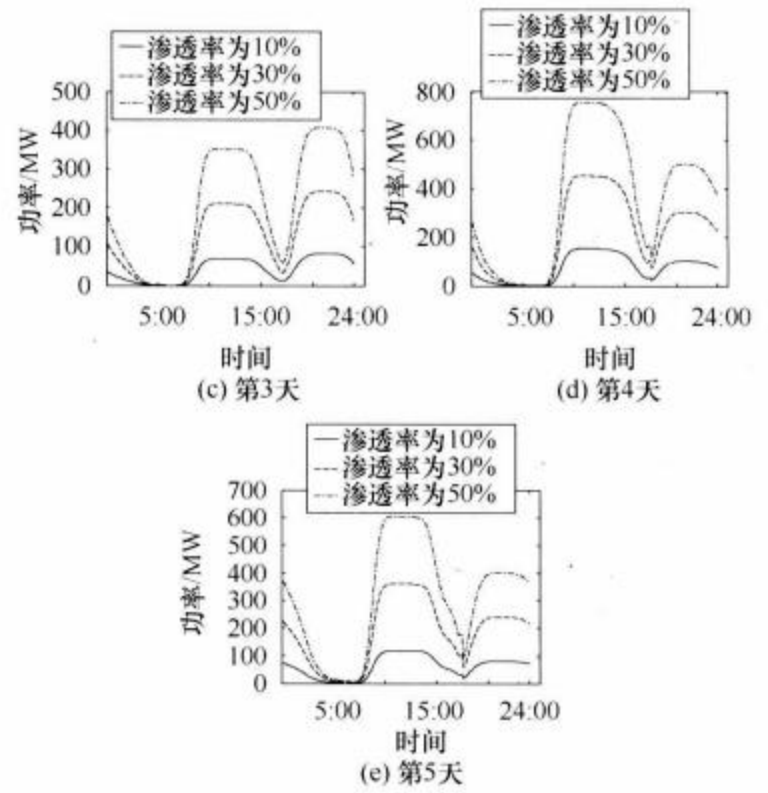


图6 两地充电情景的充电功率曲线

Fig.6 Power-charging profiles of two area scenarios 大,但是每日的充电功率峰值比只在居民地充电时的充电功率小。

图7a为只在居住地充电时三种不同渗透率的日充电量变化曲线,图7b是两地充电时的日充电量变化曲线。两种充电模式中,充电电量的变化趋势基本一致,前4天基本呈线性增长,第5天降低;从充电量的峰值相比,两地充电时日充电量比只在居民地充电时要低,5天内三种不同渗透率的差值分别为8.8GWh, 26.09GWh, 43.4GWh。

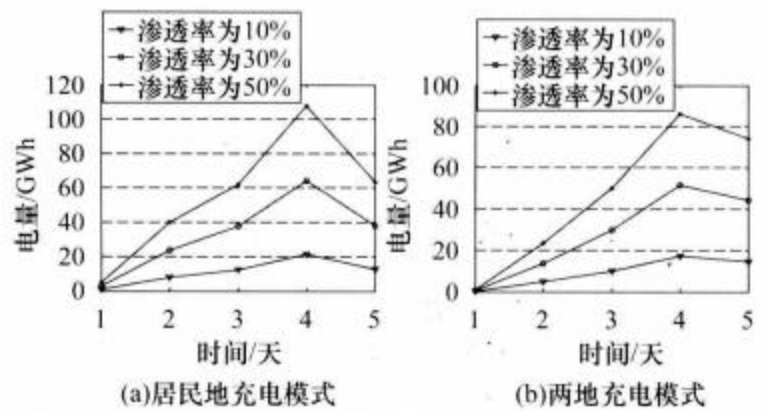


图7 两种充电模式充电量比较

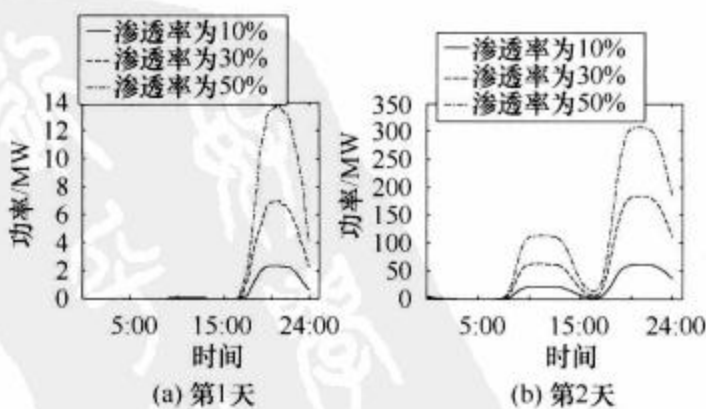
Fig.7 Comparison of charging capacity of two situations

5.5 仿真实验总结

通过上述仿真,在四种不同条件下的充电功率需求,以及相对应的日充电电能总量、充电峰值功率的对比,可得出如下结论:

(1) 不同类型电动汽车的组成、不同的充电功率、不同的电动汽车渗透率和不同的充电情景对电动汽车的充电需求的影响情况不同。

(2) 电池容量低的电动汽车充电频率较高,充



电需求较大；小充电功率的充电峰值较小，日充电电能较少，充电持续时间长；充电功率需求和日充电量都与渗透率大小呈线性关系；采用两地充电时日充电功率峰值和日充电量均比只在居民地充电时小；充电功率和充电电量峰值均出现在第4天。

(3) 在进行充电负荷预测以及有序充电控制时，对电动汽车充电负荷的调节可通过调节不同电池容量、采用不同充电功率和不同的充电情景模式进行控制。

6 结论

本文以北京市传统燃油车的行驶规律为前提，在不改变用户用车习惯的情况下，采用蒙特卡洛模拟方法进行抽样，模拟得到了一定规模电动汽车的充电功率曲线。通过对比分析了电动汽车类型、充电功率、渗透率以及充电情景等因素对电动汽车充电需求的影响，得出对充电需求的影响情况。论文的工作对电动汽车规模化充电对电网冲击影响、电动汽车有序充电、含有电动汽车配电网的负荷调节研究等有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Boulanger A G, Chu A C, Maxx S, et al. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [2] 吴憩棠. 我国“十城千辆”计划的进展[J]. 新能源汽车, 2009, 24(1): 15-19.
Wu Qitang. Progresses in “ten cities & thousand units” plan[J]. New Energy Vehicles, 2009, 24(1): 15-19.
- [3] Robert C Green, Wang Lingfeng, Mansoor Alam. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 544-553.
- [4] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
Gao Ciwei, Zhang Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [5] 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): 1-11.
Hu Zechun, Song Yonghua, Xun Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-11.
- [6] Ikegami T, Ogimoto K, Yano H. et al. Balancing power supply-demand by controlled charging of numerous electric vehicles[C]. IEEE Electric Vehicle Conference, 2012: 1-8.
- [7] Hubner M, Zhao L, Mirbach T, et al. Impact of large-scale electric vehicle application on the power supply[C]. IEEE Electrical Power & Energy Conference, Montreal, 2009: 1-6.
- [8] Clement K, Haesen E, Driesen J. Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2009: 1-7.
- [9] J G Vlachogiannis. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1808-1817.
- [10] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
Tian Liting, Shi Shuanglong, Jia Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [11] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
Luo Zhuowei, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [12] Kejun Qian, Chengke Zhou, Malcolm Allan, et al. Load model for prediction of electric vehicle charging demand[C]. IEEE 2010 International Conference on Power System Technology, 2010:1-6.
- [13] Lojowska A, Kurowicka D, Papaefthymiou G, et al. From transportation patterns to power demand: Stochastic modeling of uncontrolled domestic charging of electric vehicles[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, 1: 1-7.

(下转第35页)