

大规模电动汽车并网的配电网负荷特性研究

从电动汽车常见类型及影响充电负荷的主要因素分析着手, 基于电动汽车充电模式、电池特性以及用户行驶规律研究电动汽车充电功率, 建立了电动汽车充电规律的随机模型, 得出充电负荷的概率分布, 进行蒙特卡洛抽样以建立仿真模型^[1]。又以某地区典型日负荷曲线为例, 分析了大规模电动汽车并网后, 不同类型电动汽车充放电对配电网典型日负荷曲线的影响, 并估算了双向充放电电动汽车的削峰能力, 为电动汽车大规模并网的配电网发展规划奠定了重要基础。

朱敏捷 王崇斌 王天智 刘子威/佛山电力设计院有限公司 胡保林/深圳供电局有限公司 李 妍/华中科技大学电气与电子工程学院

0 引言

随着环境污染情况的加剧, 发展清洁能源刻不容缓, 电动汽车作为节能减排的代表, 其产业发展得到了政府支持。我国电动汽车的发展已进入关键时期^[1-2], 但是大规模电动汽车充电势必会对配电网运行产生影响。目前, 电动汽车对配电网的影响已成为学术热点问题。文献[3-4]考虑影响电动汽车负荷特性因素的概率分布, 利用统计或实测数据建立电动汽车的充电负荷模型; 文献[5-6]利用装有GPS车辆的行驶数据进行统计分析, 展开充电负荷建模研究; 文献[7]采用蒙特卡洛法建立通勤用电动汽车充电功率需求模型, 对比分析电动汽车类型、充电功率以及渗透率等因素对电动汽车充电需求的影响; 文献[8]结合电动汽车类型和充电时间建立电动汽车负荷预测模型, 研究不同充电模式下的电动汽车负荷对电网日负荷曲线的影响; 文献[9]通过分析电动汽车在住宅区的充电特性及用户行为特性, 研究充电负荷的

接入对负荷曲线的影响; 文献[10]根据电动汽车的行为特性和电价政策将电动汽车的充电情景分为四种, 并用蒙特卡洛法研究不同规模电动汽车充电对日负荷曲线的影响; 文献[11]通过建模研究电动汽车充电对电网的影响, 提出用于实现移峰填谷的电动汽车有序充电策略; 文献[12]提出充电站可利用有V2G功能的电动汽车在用电高峰期将电能反馈回电网, 建立考虑电动汽车参与电网调峰的配电网规划数学模型。为分析电动汽车对配电网发展规划的影响, 本文从电动汽车常见类型及影响充电负荷的主要因素分析着手, 分析电动汽车充电规律的随机模型, 基于蒙特卡洛法开展大样本仿真计算, 得出电动汽车不同充电模式下的负荷特性曲线, 最后以某地区典型日负荷曲线为例, 预测电动汽车负荷对配电网典型日负荷特性的影响, 并对双向充放电电动汽车的削峰能力进行估算, 为配电网发展规划提供参考依据。

1 影响电动汽车充电负荷的主要因素分析

就电动汽车与配电网之间的功率交换方式而言, 通常分为单向充电和双向充放电两种模式。单向充电模式分为单向无序(V0G)模式、单向有序(V1G)模式, 双向充放电模式认为是有序V2G模式。单向无序充电模式是成本低廉、目前应用广泛的充电方式, 其主要问题是充电负荷不可控。单向有序充电模式下, 电动汽车能够控制充电时间以避免负荷高峰; 双向有序充放电模



朱敏捷/高级工程师

关键词/Keywords

电动汽车负荷·
随机性建模·
蒙特卡洛法仿真·
削峰能力·

式下,电动汽车作为一种分布式储能系统,若有效利用可以为电网提供削峰填谷、调频等服务。下面分析影响电动汽车充电负荷变化的主要因素。

电池特性是研究电动汽车充电负荷模型的基础,本文选用Nissan-Leaf车型为例进行研究,该车型电池容量为24 kW·h,续航里程为160 km,百公里耗电为15 kW·h,将充电过程近似为恒功率充电过程^[3]。家用电动汽车动力电池的充电电流一般在0.2~0.5 C (0.5 C表示理想状态下,电池从0到100%充满电需要1/0.5=2 h)。本文假设电池在理想状态下充满电需要4 h,因而充电功率 $P_c=24 \text{ kW} \cdot \text{h} / 4 \text{ h}=6 \text{ kW}$ 。

行驶规律是建立电动汽车充电负荷模型所需考虑的重要因素,用户出行时间及行驶距离的随机性会造成电动汽车充电负荷随机变化。在开展这种随机性分析之前,本文假设:①电动汽车每次充电均充至满电量;②电动汽车最后一次出行结束后就开始充电过程;③电动汽车充电开始的时间与汽车每日行驶的里程数都是相互独立的随机变量。

基于美国交通部2001年关于私家车出行规律的调查报告NHTS中的统计数据^[13-14],电动汽车最后一次行程结束时间近似满足正态分布,日行驶里程数近似满足对数正态分布。又由第2个假设条件知,电动汽车充电开始时间与最后一次行程结束时间的拟合曲线相同,满足正态分布^[3];电动汽车每次充电都充至满电,因此电动汽车的充电时长与日行驶里程数直接相关。根据文献[3]推得电动汽车充电时长的计算公式为

$$T_c = \frac{1.61DW}{SP_c} \quad (1)$$

式中, D 为电动汽车日行驶里程数,英里; W 为电动汽车电池容量, kW·h; S 为电动汽车续航里程, km; P_c 为充电功率, kW。

将选定的Nissan-Leaf车型的动力电池参数代入式(1)可得充电时长 $T_c=0.04D$ 。

为求得电动汽车在一天中某时刻 t_0 的充电负荷,先定义一个随机变量 δ 来表征电动汽车的电池状态

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{正在充电状态} \\ 0, & \text{充满或者未充} \end{cases} \quad (2)$$

根据假设,电动汽车充电开始时刻 T_s 与日行驶里程数 D 相互独立,且充电时长 $T_c=0.04D$,因此 T_c 与 T_s 也相互独立,其概率分布满足下式

$$P(\delta=0)=P(T_s>t_0)P(T_s+T_c\leq t_0+24)+P(T_s+T_c<t_0) \quad (3)$$

$$P(\delta=1)=1-P(T_s>t_0)P(T_s+T_c\leq t_0+24)-P(T_s+T_c<t_0) \quad (4)$$

单台电动汽车在一天中的充电负荷 $P_{t_0}=\delta P_c$,因此其概率分布满足下式

$$P(P_{t_0}=0)=P(\delta=0) \quad (5)$$

$$P(P_{t_0}=P_c)=P(\delta=1) \quad (6)$$

联立充电开始时间和充电时长的概率密度公式以及式(3)~式(6)便可求得电动汽车充电负荷的概率分布。

2 电动汽车充电负荷仿真模型的建立

针对本文电动汽车充电负荷的随机模型,用蒙特卡洛法抽取样本数 $N=10\ 000$,具体仿真流程如图1所示。电动汽车充电起始时间、日行驶里程 D 以及充电时长的概率分布如图2~图4所示。

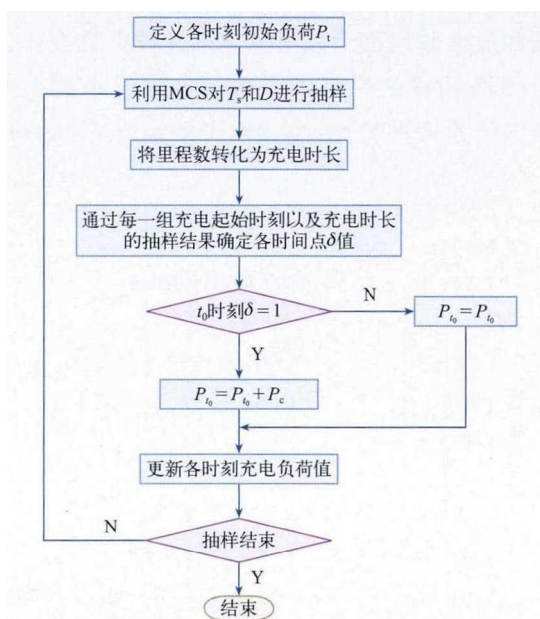


图1 电动汽车充电负荷的蒙特卡洛模拟流程图

由图2~图4可知,通过抽样得到的仿真模型

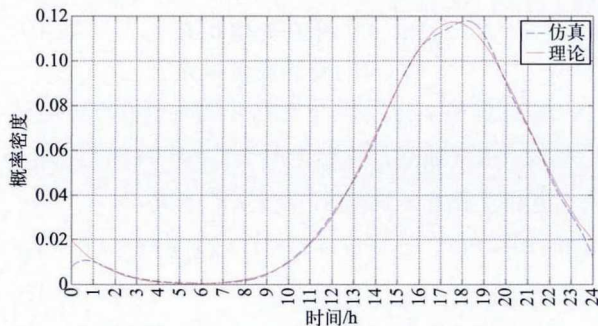


图2 电动汽车充电起始时间 T_s 的概率密度图

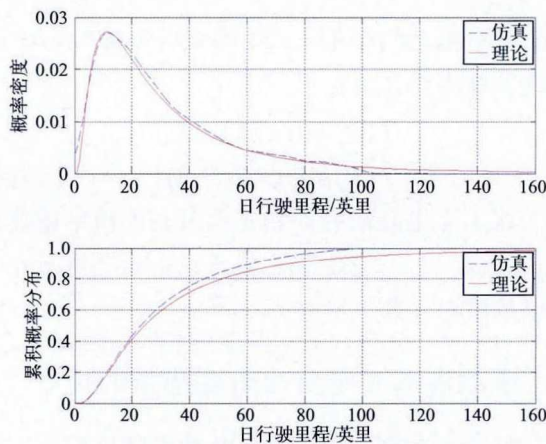


图3 电动汽车日行驶里程数的概率密度及概率分布对比图

与理论模型基本一致,说明本文所选取的样本数量足够反映统计规律。

双向有序充放电模式下,电动汽车充电起始时刻和放电时刻都可以根据电网需要合理安排。蒙特卡洛抽样结果可求得单台电动汽车剩余电量期望值为17 kW·h,电动汽车数量为 N ($N \geq 10$)

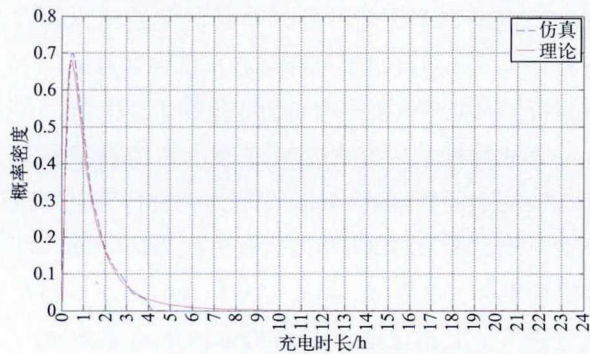


图4 电动汽车充电时长 T_c 的概率密度对比图

000), 返送电量占剩余电量的比例为 λ , 且放电时长为 T 时, 返送功率为

$$P_{\text{fs}} = \frac{17N\lambda}{T} \quad (7)$$

3 电动汽车负荷对配电网负荷特性的影响

选取某地区, 假定该地区约有1.5万辆电动汽车。依据该地区2015年典型日负荷曲线, 分析2020年该地区在1.5万台电动汽车投入使用后, 该地区电动汽车负荷对典型日负荷曲线的影响。该地区2015年典型日负荷曲线及依据弹性系数法预测的2020年典型日负荷曲线如图5所示。由负荷曲线可知, 该地区00:00~08:00为谷值时段, 09:00~12:00、14:00~18:00以及19:00~22:00为峰值时段。据此设定电动汽车统一充电时间为凌晨四点, 返送电量时间为负荷高峰时段11:00~12:00及14:00~18:00, 当返送电量比

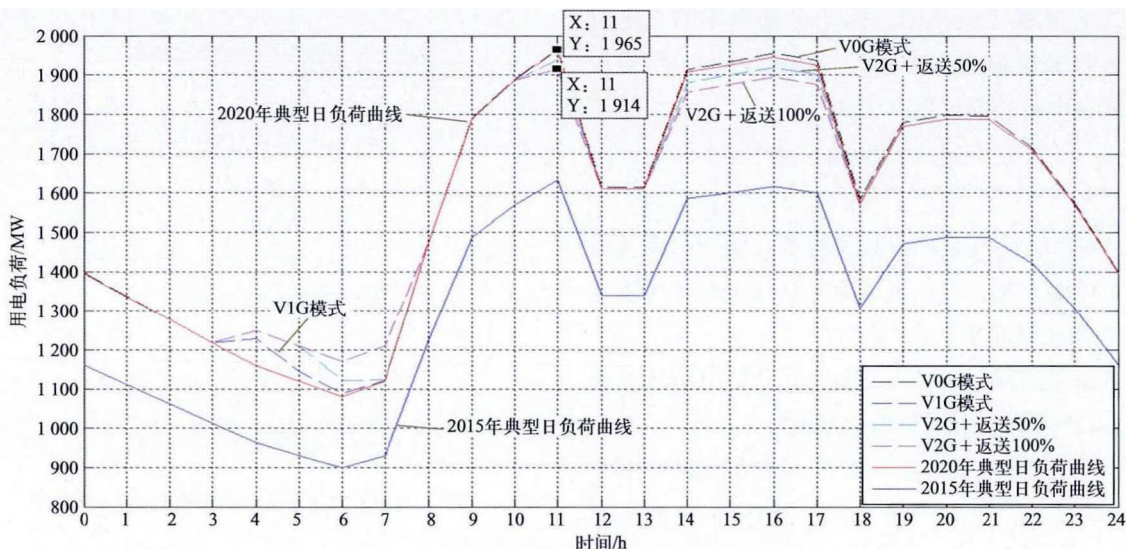


图5 电动汽车负荷对2020年用电负荷的影响分析

例 λ 分别取0.5和1时,用电负荷曲线见图5。

由图5可知,在V0G模式下,电动汽车的加入使得用电负荷峰值增加了1.44 MW,负荷谷值也增大了0.07 MW。峰谷差增大,此时电动汽车作为被动型负荷;当电动汽车作为主动型负荷接入时,在V1G模式下负荷峰值没有增加,负荷谷值增加7.09 MW;在V2G模式下,当 $\lambda=0.5$ 时,电动汽车的加入削减负荷峰值25.5 MW,当 $\lambda=1$ 时,削减负荷峰值51 MW,负荷谷值的增加与V1G模式下相同,均为7.09 MW。可见,V2G模式电动汽车削峰作用明显。

对于V2G模式电动汽车按照式(7)进行计算, $N=15\ 000$, $T=5$, λ 分别取0.5和1时,理论上削减的峰值大小分别为25.5 MW、51 MW。本文所提出的经验公式与采取大样本蒙特卡洛计算得出的结果一致,因此本文所提出的预估V2G模式电动汽车削峰能力的估算公式简单有效;只要根据地区负荷特点合理安排电动汽车充放电时间,可以提前预估电动汽车的削峰能力,为配电网规划发展提供理论依据。

4 结束语

针对电动汽车充电模式、电动汽车电池特性以及用户行驶规律对电动汽车充电负荷的影响,本文建立了电动汽车充电规律的随机模型,并通过蒙特卡洛仿真计算,分析了大规模电动汽车并网后,不同类型电动汽车充放电对某地区典型日负荷曲线的影响,并估算了双向充放电电动汽车的削峰能力,对电动汽车大规模并网后的配电网发展规划具有理论和实际意义。

参考文献

- [1] 陈中,黄学良.电动汽车规模化发展所面临的挑战与机遇[J].电气工程学报,2015,10(4): 35-44.
- [2] 杨少兵,吴命利,姜久春,等.电动汽车充电站负荷建模方法[J].电网技术,2013,37(5): 1190-1195.
- [3] 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.
- [4] 王建.电动汽车充电对电网的影响及有序充电研究[D].济南:山东大学,2013: 35-92.
- [5] Adornato B, Patil R, Filipi Z, et al. Characterizing naturalistic driving patterns for plug-in hybrid electric vehicle analysis [C]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009: 655-660.
- [6] Ashtari A, Bibeau E, Shahidinejad S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 341-350.
- [7] 杨冰,王丽芳,廖承林.大规模电动汽车充电需求及影响因素[J].电工技术学报,2013,28(2): 22-27, 35.
- [8] 谢莹华,谭春辉,张雪峰,等.电动汽车充放电方式对深圳电网日负荷曲线的影响[J].广东电力,2011,24(12): 47-50, 69.
- [9] 张明霞,庄童.小区电动汽车充电负荷实测分析[J].电力需求侧管理,2012,14(3): 44-46.
- [10] 荆朝霞,钟童科,林志龙,等.电动汽车充电行为对电网负荷曲线的影响[J].南方电网技术,2013,7(1): 80-84.
- [11] 陈加盛.以移峰填谷为目标的有序充电策略研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [12] 杨洪明,黄雨翔,刘保平,等.考虑分布式电动汽车参与电网调峰的配电网规划[J].电力科学与技术学报,2012,27(1): 48-53.
- [13] Taylor J, Maitra A, Alexander M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, 2009: 1-6.
- [14] Vyas A, Santini D. Use of national surveys for estimating 'full' PHEV potential for oil use reduction [EB/OL]. (2008-07-21) [2012-11-06]. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/525.pdf>.

(收稿日期:2017-02-22) **EA**