

基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法

王浩林,张勇军,毛海鹏

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要:电动汽车的充电负荷预测在电动汽车的推广过程中发挥着重要的作用。为了克服现有方法中部分参数设置主观、预测模型与用户随机性驾驶行为匹配欠缺的不足,将电动汽车进行细致分类,通过建立充电负荷预测影响因素的概率模型,利用概率统计学和蒙特卡洛模拟方法提出了基于时刻充电概率的负荷预测模型。利用科学分析得到的日行驶里程代替主观给定的起始荷电状态(SOC)以推导充电时长,利用更具随机性的时刻充电概率代替计算得到的充电时段来确定充电负荷。以某市为例,预测了相关电动汽车的日负荷曲线,并与常用负荷预测方法的结果进行对比,验证了所提负荷预测方法能够科学地预测用户的充电负荷,能够为电网及用户的电能管理策略提供可靠的依据。

关键词:电动汽车;充电负荷预测;概率模型;蒙特卡洛方法;时刻;模型

中图分类号:U 469.72;TM 714

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.033

0 引言

近年来,面对能源危机和环境压力,各国政府都在着力探求缓解该形势的出路。为了寻求清洁、高效的能源模式,探索绿色、便捷的出行方式,关于电动汽车及其充电设施的应用研究已如火如荼,成为智能电网与智能交通网融合的关键环节^[1]。其中,研究电动汽车的充电负荷预测方法对优化发电、电网调度、电力市场交易、充电站规划建设、用户便捷经济出行等方面都具有重要的作用。因此,对电动汽车的充电负荷预测方法进行研究具有重大的理论和实际意义。

近年来,国内外学者对电动汽车的充电负荷预测进行了大量的细致研究^[2-6]。现有的负荷预测模型有:基于充电时段的蒙特卡洛负荷预测模型、基于充电概率的统计学负荷预测模型、考虑时空分布基于出行链的预测模型等。

文献[7]对目前电动汽车主要的3种负荷预测方法进行了综述;文献[8]分析了不同类型的电动汽车在不同充电模式下的充电行为;文献[9]对不同类型电动汽车的起始充电时间、起始荷电状态(SOC)等进行了划分,并且考虑了电动汽车的充电时间限制;文献[10]考虑了电动汽车充电功率的多样性;文献[11]对4种类型的电动汽车的相关负荷影响因素进行了分别建模。以上文献都是基于荷电状态来计算充电时长,而荷电状态的给定具有明显的主观性,缺乏科学客观性。文献[12]提出一种基

于用户出行链的负荷预测方法,考虑了更多的负荷影响因素;文献[13]提出了一种考虑时空分布的负荷预测方法,从停车的空间模型和充电的时间模型这2个相互交织的模型进行预测。以上文献中的充电负荷都是根据充电时段进行恒值给定,但实际上车辆在充电时段内的充电行为具有一定的概率性,因此给定充电负荷的方法仍存在不妥。文献[14]针对出租车进行研究,建立了充电负荷分段概率估算模型;文献[15]建立了各个负荷影响因素的概率模型,计算了一天各个时刻的充电概率,利用概率统计学的方法预测日充电负荷。以上文献虽然建立了负荷预测的概率统计模型,但是各负荷影响因素的概率模型较为简单,未对电动汽车进行分类,分析不够具体和全面。

针对上述文献中负荷预测方法存在的不足,本文所提负荷预测方法做了如下改进:对电动汽车按不同类型、不同行驶特性进行翔实分类、全面分析;在计算充电时长时,以能够通过科学拟合得到的日行驶里程模型代替主观确定的荷电状态模型;建立负荷预测的概率统计学模型计算时刻的充电概率,能够更为精确地描述每个时刻的充电负荷,更加符合用户充电行为的随机性特征。将本文所提负荷预测方法的结果与传统负荷预测方法进行对比,验证本文所提负荷预测方法的科学性。

本文将电动汽车划分为公交车、出租车、私家车和公务车4种类型,首先分别建立详细具体的负荷影响因素的概率模型和各时刻充电概率分布函数,然后得到各时刻的充电概率和充电负荷,最后将本文所提负荷预测方法与传统的基于充电时段的负荷预测方法的预测结果进行了比较分析。

1 电动汽车充电负荷影响因素的建模

电动汽车的充电负荷受多方面因素的影响,是

收稿日期:2018-06-14;修回日期:2018-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777077);广东省自然科学基金资助项目(2017A030313304)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2017A030313304)

包括电动汽车自身条件、充电设施、用户习惯等诸多因素共同作用的结果。电动汽车充电负荷的影响因素可归纳为汽车性能、充电设施和驾驶特性 3 个方面。

为了方便研究,下文合理地选取了部分关键的充电负荷影响因素,并分别建立数学概率统计模型。

1.1 起始充电时刻

起始充电时刻与用户的驾驶特性具有十分紧密的联系。一般而言,用户会选择在一天内各时段出行结束的時刻作为起始充电时刻。就目前状况来看,电动汽车大规模普及的格局尚未完成,尚缺少电动汽车行驶的相关数据。因此,本文以传统燃油车的出行特性代替电动汽车的出行特性,通过分析传统燃油车的出行特性可以大致得到电动汽车的出行特性。

基于 2009 年美国交通部对美国家用车辆调查 NHTS (National Household Travel Survey) 结果给出的数据^[16],文献^[15]通过数据拟合处理得到汽车最后一次出行的结束时刻满足式(1)所示的正态分布。

$$f_s(t) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (1)$$

其中, t 为最后一次出行的结束时刻,即起始充电时刻; μ_s 为最后一次出行结束时刻的期望; σ_s 为最后一次出行结束时刻的标准差。 μ_s 和 σ_s 随着不同类型车辆行驶特性的不同而变化。

1.2 日行驶里程

日行驶里程是电动汽车驾驶特性的重要指标,反映了汽车在一天内的耗电量,进而影响电动汽车的充电时间。通常而言,日行驶里程的大小与充电时间正相关。同理,用传统燃油车的出行特性代替电动汽车的出行特性进行分析。

与 1.1 节分析起始充电时刻类似,根据 NHTS 数据^[16]和文献^[15]可推导得到电动汽车的日行驶里程满足如下分布:

$$f_D(s) = \frac{1}{s\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (2)$$

其中, s 为日行驶里程,单位为 km; μ_D 为 $\ln s$ 的期望; σ_D 为 $\ln s$ 的标准差。 μ_D 和 σ_D 随着不同类型车辆行驶特性的不同而变化。

1.3 充电功率

目前,电动汽车大多使用锂电池,锂电池的充电过程是恒压-恒流两阶段充电过程。为了简化分析,本文用恒定功率来代替整个充电过程的充电功率。

另外,电动汽车的充电功率还与充电设施、充电模式有关。目前电动汽车主要的充电模式有慢速充电、常规充电和快速充电 3 种。本文根据不同类型电动汽车的驾驶特性,具体选择相应的充电模式。

1.4 充电时长

充电时长和起始充电时刻二者共同决定充电时间。充电时长受较多因素的制约,一般可以由日行驶里程和起始荷电状态这 2 种方式推导得到。

若基于荷电状态计算充电时长,则有如下公式:

$$T_c = \frac{(\alpha - \text{SOC})E}{P_c \eta} \quad (3)$$

其中, T_c 为充电时长,单位为 h; α 为期望充电完成后的荷电状态(一般充满, α 取为 1);SOC 为起始荷电状态; E 为电池容量,单位为 kW·h; P_c 为充电功率,单位为 kW; η 为充电效率,一般取为 0.9。

由于起始荷电状态的概率分布的随机性很大,其随着电动汽车类型的不同而变化,在一般的负荷预测方法中通常是人为主观给定 SOC 的值(如文献^[12-16]),欠缺科学性。

本文通过基于日行驶里程的方式计算充电时长,如式(4)所示。日行驶里程能够通过科学拟合汽车驾驶特性的数据得到其概率分布,相比较而言更为客观、可取。

$$T_c = \frac{sW_{100}}{100P_c \eta} \quad (4)$$

其中, W_{100} 为汽车每行驶 100 km 的耗电量,单位为 (kW·h)/百公里。

如前文所述,日行驶里程 s 符合式(2)所示的对数正态分布。根据正态分布的性质,充电时长 T_c 为日行驶里程 s 的线性组合,亦符合对数正态分布,即:

$$f_{T_c}(t) = \frac{1}{s\sigma_{T_c} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu_{T_c})^2}{2\sigma_{T_c}^2}\right] \quad (5)$$

其中, $\mu_{T_c} = \ln[W_{100}/(100\eta P_c)] + \mu_D$ 为充电时长的期望; $\sigma_{T_c} = \sigma_D$ 为充电时长的标准差。

2 电动汽车充电模式的分析

前文已经给出了影响电动汽车充电负荷预测的各类主要影响因素的概率模型,下文将电动汽车按照不同的用途分为公交车、出租车、公务车和私家车 4 类,具体分析相应类型车辆的充电模式,设置负荷预测模型的各项参数。

2.1 公交车

公交车作为一种重要的城市交通工具,需要持续承担城市的公共交通任务,因此其采取轮班运营制。根据对深圳市公交车运营实际情况的调研,目前该市共有 16 000 辆纯电动公交车,公交车的运营时间大致为 06:00—22:00。根据文献^[17]中的数据,公交车的日行驶里程大约为 200 km。深圳市电动公交车的型号大部分选用“比亚迪 K9”,该型号的电动公交车电池容量为 324 kW·h,续航里程为 250

km,行驶 100 km 的耗电量为 140(kW·h)/百公里。考虑到安全运行,一天一充难以满足电动公交车的运营需求,需要一天两充。公交车的运营时间、路线相对集中,可以进行集中充电,在白天运营高峰期不安排充电,在中午换班午餐时段进行快速充电,在晚上下班后进行常规充电。

根据以上分析,公交车的充电时段为 10:00—16:30、23:00 至次日 05:30,分别服从正态分布 $N(14,1^2)$ 和 $N(23,1^2)$,快速充电和常规充电的功率分别为 108 kW、60 kW。日行驶里程服从对数正态分布 $N(4.4,0.35^2)$ 。

2.2 出租车

根据对深圳市出租车实际情况的调研,目前该市共有 5 487 辆纯电动出租车,出租车的运营时间大致为 06:00—24:00。根据文献[17]中的数据,出租车的日行驶里程大约为 400 km,深圳市电动出租车的型号为“比亚迪 E6”,该型号的电动出租车电池容量为 82 kW·h,续航里程为 400 km,行驶 100 km 的耗电量为 20.5(kW·h)/百公里。一天一充难以满足出租车的实际运营需求,一般采取一天两充的模式,充电时间选择在中午换班午餐时段以及晚上下班之后。由于出租车的休息时间有限,但又需要及时补充电量,因此电动出租车选择快速充电模式。

根据以上分析,出租车的充电时段为 02:00—05:00、11:30—14:30,分别服从正态分布 $N(4,1^2)$ 和 $N(13,1^2)$,快速充电的功率为 60 kW。日行驶里程服从对数正态分布 $N(5.1,0.35^2)$ 。

2.3 私家车

相较于公交车和出租车,私家车的行驶特性更具有随机性和任意性,不考虑外出旅游,一般情况下私家车的出行目的有通勤和娱乐两方面。根据对深圳市私家车实际情况的调研,该市共有 20 574 辆纯电动私家车。私家车一般在晚上下班后停在居民区的停车场充电,或者在上午上班时间和下午上班时在工作单位的停车场充电。根据文献[17]中的数据,不考虑长途出行,私家车的日行驶里程为 70 km。实际市场中,电动私家车有各种各样的型号,为了便于分析,本文以“比亚迪 E6”型电动汽车为分析对象。该型号的电动汽车电池容量为 82 kW·h,续航里程为 400 km,行驶 100 km 的耗电量为 20.5(kW·h)/百公里。私家车电池充满后的续航里程远远大于平均日行驶里程,因此一天一充即可满足私家车的行驶需求。私家车的充电地点可以选择上午、下午在单位停车场和晚上在居民区停车场,三者的充电概率分别设为 0.2、0.1、0.7。若在单位停车场充电,充电时长往往不超过 3 h,因此选择快速充电模式,充电功率为 60 kW;若在居民区停车场充电,充电时长则可延续到整晚,故选择常规充电模式即

可,充电功率为 7 kW。

根据以上分析,私家车的充电时段为 09:00—12:00、14:00—17:00、19:00 至次日 07:00,分别服从正态分布 $N(9,1^2)$ 、 $N(14,2^2)$ 、 $N(19,2^2)$ 。日行驶里程服从对数正态分布 $N(3.2,0.88^2)$ 。

2.4 公务车

公务车主要用作政府机关的日常公务出行,不考虑长途出行,其行驶特性和私家车相似。根据调研数据,深圳市的公务车数量为 9 000 辆,公务车的充电时间一般在晚上下班后于单位的停车场充电。为了便于分析,本文以“比亚迪 E6”型电动汽车为分析对象。该型号的电动汽车电池容量为 82 kW·h,续航里程为 400 km,行驶 100 km 的耗电量为 20.5(kW·h)/百公里。一天一充即可满足公务车的出行需求,且采取常规充电模式,充电功率为 7 kW。

根据以上分析,公务车的充电时段为 19:00 至次日 07:00,服从正态分布 $N(19,2^2)$ 。日行驶里程服从对数正态分布 $N(3.2,0.88^2)$ 。

表 1 为电动汽车的驾驶特性参数。

表 1 电动汽车驾驶特性参数
Table 1 Driving characteristic parameters of EV

车辆类型	充电时段	起始充电时刻 概率分布	日行驶里程 概率分布
公交车	10:00—16:30,	$N(14,1^2)$,	$N(4.4,0.35^2)$
	23:00 至次日 05:30	$N(23,1^2)$	
出租车	02:00—05:00,	$N(4,1^2)$,	$N(5.1,0.35^2)$
	11:30—14:30	$N(13,1^2)$	
私家车	09:00—12:00,	$N(9,1^2)$,	$N(3.2,0.88^2)$
	14:00—17:00,	$N(14,2^2)$,	
公务车	19:00 至次日 07:00	$N(19,2^2)$	$N(3.2,0.88^2)$
	19:00 至次日 07:00	$N(19,2^2)$	

3 电动汽车充电负荷预测模型的计算

3.1 假设条件

上文给出了影响充电负荷预测各因素的数学概率模型,以及各类型电动汽车的运行模式和参数设置。为了便于充电负荷预测模型的建立,本文给出如下的合理假设:

- 各类型电动汽车的起始充电时刻、日行驶里程和充电功率为相互独立的随机变量;
- 各类型电动汽车的充电功率视为恒功率模型,没有恒压和恒流充电这 2 个阶段;
- 所有车辆每次都充满电量;
- 所有车辆的最后一次出行结束时刻即为该车辆的起始充电时刻。

3.2 电动汽车各时刻充电概率的计算

电动汽车在一天内某一时刻的充电状态只有 2 种:正在充电和没有充电。根据影响充电负荷的各个因素的数学概率模型,计算该时刻正在充电的概

率,然后将该时刻正在充电的概率乘以充电功率,即可得到充电负荷。

根据文献[14],图1为在 t_0 时刻电动汽车没有充电的2种情况。图中, t_s 为起始充电时刻。

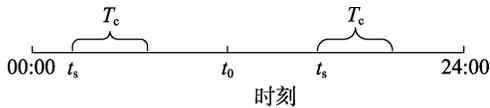


图1 电动汽车没有充电的2种情况

Fig.1 Two conditions of electric vehicle without charging

设 $\gamma_{t_0} = 1$ 表示 t_0 时刻电动汽车正在充电, $\gamma_{t_0} = 0$ 表示 t_0 时刻电动汽车没有充电。将一天按照间隔1 min分为1 440个时刻,一天中 t_0 时刻的充电概率可以用如下公式表述:

$$p(\gamma_{t_0} = 0) = F_{sTc}(t_s > t_0, t_s + T_c \leq t_0 + 1440) + F_{sTc}(t_s + T_c \leq t_0) \quad (6)$$

$$p(\gamma_{t_0} = 1) = 1 - F_{sTc}(t_s > t_0, t_s + T_c \leq t_0 + 1440) - F_{sTc}(t_s + T_c \leq t_0) \quad (7)$$

其中, F_{sTc} 为起始充电时刻 t_s 和充电时长 T_c 的联合概率分布函数。根据前文给出的假设,起始充电时刻和充电时长为相互独立的随机变量,故 $F_{sTc} = F_s F_{Tc}$, F_s 、 F_{Tc} 分别为 t_s 、 T_c 的概率分布函数。

根据式(7)计算得到 t_0 时刻的充电概率,充电功率视为恒定值,则 t_0 时刻的充电负荷可通过式(8)计算得到。

$$P_{t_0} = P_c p(\gamma_{t_0} = 0) + P_c p(\gamma_{t_0} = 1) = P_c p(\gamma_{t_0} = 1) \quad (8)$$

其中, P_{t_0} 为 t_0 时刻的充电负荷。

3.3 蒙特卡洛模拟负荷预测

蒙特卡洛方法是一个用海量随机数据模拟精确逻辑的思想方法、一种用数量得到质量的计算思想。

现行较为普遍的一种负荷预测方法^[8-9,11]是:通过建立各负荷影响因子的模型,得到起始充电时刻和充电时长,在该时段内的充电负荷即等于该时段的充电功率,然后将所有电动汽车的负荷累加得到负荷预测结果,如式(9)所示。该方法可称为基于充电时段的负荷预测方法。

$$P = \sum_{j=1}^{1440} \sum_{i=1}^N P_{cij} \quad (9)$$

其中, P 为总充电负荷,单位为kW; N 为电动汽车总数,单位为辆;1 440表示将24 h划分为1 440个时刻; P_{cij} 为第 i 辆电动汽车在时刻 j 的充电功率,单位为kW。

该方法的缺陷是:用主观设置的荷电状态的概率分布来计算充电时长,并且默认在充电时段内汽车必定在充电。而实际情况往往是:在充电时段内汽车也只是以一定的概率在充电,人为设置的荷电状态也并不客观。

因此,本文提出另外一种能够有效克服上述缺陷的负荷预测方法,通过建立各负荷影响因子的数学概率模型,推导得到每一时刻电动汽车充电概率的概率分布函数,计算得出某时刻的充电概率,将充电概率与充电功率相乘得到充电负荷。该方法可称为基于时刻充电概率的蒙特卡洛模拟方法。

图2为蒙特卡洛方法的计算流程图。其中,输入的相关参数包括各类型电动汽车的数量、起始充电时刻概率分布的期望和标准差、日行驶里程概率分布的期望和标准差、电池容量、充电功率、充电效率、充电概率等。

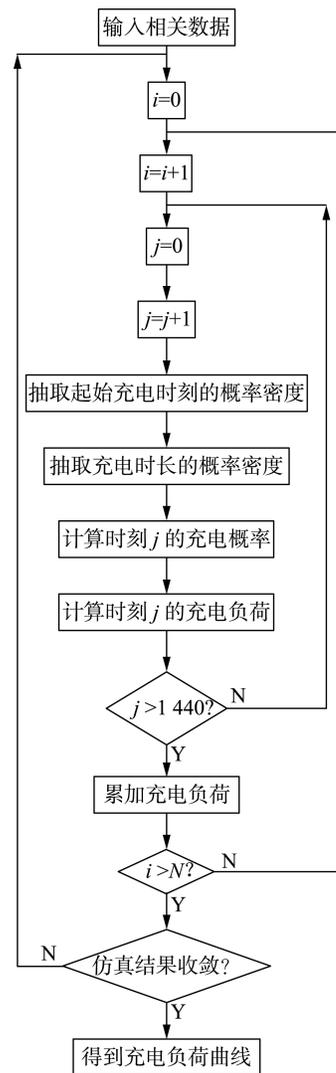


图2 蒙特卡洛方法流程图

Fig.2 Flowchart of Monte Carlo method

通过前文计算得到单辆电动汽车在每一时刻的充电负荷,形成单辆电动汽车的日负荷曲线,再累加各电动汽车的日负荷,得到电动汽车总负荷,如式(10)所示。

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{1440} (f_{ij} P_{cij}) \quad (10)$$

其中, P_{total} 为总充电负荷,单位为kW; f_{ij} 为第 i 辆电

电动汽车在时刻 j 的充电概率。

通过蒙特卡洛方法模拟 1 000 次,将一天 24 h 划分为 1 440 个时刻,根据表 1 抽取起始充电时刻的概率密度,根据式(5)抽取充电时长的概率密度,根据式(6)、(7)计算各个时刻的充电概率,根据式(8)计算各个时刻的充电负荷,根据式(10)累加计算总充电负荷,最后判断仿真结果是否收敛,若收敛,则得到充电负荷曲线;否则,需重新计算。具体判断方法如下。

本文采用方差系数 β 来评判蒙特卡洛方法模拟结果的精度, β 的计算公式为:

$$\beta_j = \frac{\sqrt{V_j(\bar{L})}}{\bar{L}_j} = \frac{\sigma_j(\bar{L})}{\sqrt{k} \bar{L}_j} \quad (11)$$

其中, β_j 为时刻 j 充电负荷的方差系数; $V_j(\bar{L})$ 为时刻 j 充电负荷的方差; \bar{L}_j 为时刻 j 充电负荷的期望; $\sigma_j(\bar{L})$ 为时刻 j 充电负荷的标准差; k 为计算次数。

若 $\max\{\beta_j\} < 0.05\%$,则仿真结果是收敛的。

4 蒙特卡洛方法模拟结果及分析

4.1 各类电动汽车充电负荷预测结果分析

根据上述电动汽车充电负荷的预测模型以及蒙特卡洛方法的运用,以深圳市电动汽车的使用情况为例,得到负荷预测结果如图 3 所示。

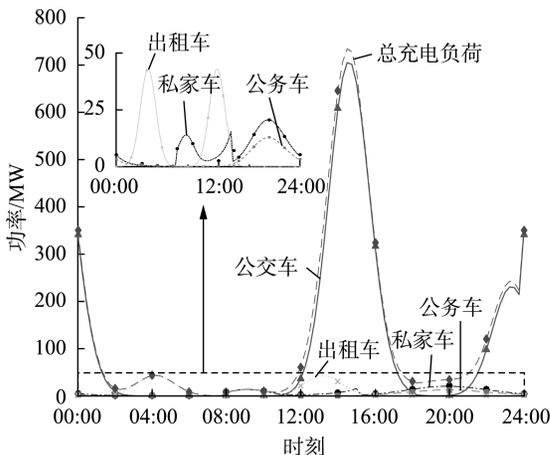


图3 电动汽车日充电负荷预测曲线

Fig.3 Daily charging load forecasting curve of electric vehicles

由图 3 可见,公交车的日负荷集中在 11:00—18:00 以及 20:00 至次日 03:00 这 2 个时段,在 23:00 至次日 01:00 和 14:00—16:00 这 2 个时段的日负荷较高,其在白天采用大功率快充模式,在 15:00 左右达到日负荷的峰值,大约为 700 MW;在夜晚采用小功率常规充电模式,日负荷峰值攀升约至 330 MW。从日负荷曲线来看,公交车的日负荷波动较大,尤其在 14:00—16:00 时段内,充电功率达到峰值,峰值与谷值差距甚远,对电网的冲击剧烈,对电网的稳定

性提出了更高的要求。但是可以考虑与其他有不同日负荷特性的电动汽车互为补充,可在一定程度上削弱峰谷差值。

出租车的日负荷主要集中在 01:00—07:00 以及 11:00—16:00 这 2 个时段内,分别在 04:00 和 13:00 达到峰值,约为 43 MW,日负荷曲线呈现双峰形态。出租车日负荷的第一个峰值位于 03:00—05:00,可以对电网总负荷的峰谷起到“填谷”的作用,提高电网的总负荷,减小电网总负荷波动,这对电网的稳定起到了一定的正面作用。

私家车的日负荷集中在 08:00—12:00、12:00—15:00、15:00—24:00,并分别在 09:00、15:00、20:00 达到负荷峰值,分别约为 15 MW、16 MW、22 MW,负荷曲线呈现三峰形态。私家车的行驶特性更为灵活、随机,因此,其负荷曲线呈现的形态也更为多样。私家车的充电负荷峰值最为集中于 19:00—24:00,这个时段正好是电网总负荷的峰值时段,大量电动私家车接入电网充电将会加剧该时段电网的总负荷,对电网的稳定造成一定的影响。电网公司可以采取相应的措施,如在电网总负荷较低的凌晨时段施行廉价的充电费用,以鼓励和分散电动汽车的集中充电行为。

公务用车的日负荷集中在时段 17:00—24:00,于 20:00 达到负荷峰值,约为 13.5 MW,负荷曲线呈现单峰形态。公务用车集中在晚间充电,和私家车一样会加剧该时段电网的总负荷,给电网的稳定造成不良的影响。

4 种类型电动汽车的总充电负荷的峰值处于 14:00—15:00,约为 720 MW。在该时段的充电行为中,公交车的充电负荷处于主导地位,主要是因为该时段采用大功率快速充电模式的公交车的充电负荷要远远大于采用其他充电模式的电动汽车的充电负荷;而在 19:00 至次日 01:00 时段的充电负荷中,主要由私家车和公务用车以及公交车的充电负荷主导;在 01:00—06:00 时段的充电负荷中,主要由出租车的充电主导。

图 3 所示的总充电负荷曲线表明,充电负荷在一天内的波动甚是剧烈,对电网的稳定具有潜在的威胁。因此,电网方面应考虑设计相应指导性的充电策略以引导规范用户的充电行为,出台合理的充电费用规则用以分流用户充电,以期达到扬长避短、以长补短的效果。

4.2 与其他负荷预测方法结果的对比

由于目前缺少实际的电动汽车充电负荷数据,因此通过将本文所提方法与其他常用负荷预测方法进行对比来说明本文所提方法的有效性。给定相同的参数和概率分布模型,通过 MATLAB 仿真得到文献[8-9,11]中方法(基于充电时段的负荷预测方

法)的日负荷预测结果,将该结果与本文所提方法得到的结果进行比较。以单辆电动汽车的日负荷曲线为例,讨论并分析2种负荷预测方法的异同。

仿真可以分别得到单辆公交车、出租车、私家车、公务车的日负荷曲线以及4种类型单辆电动汽车总的日负荷曲线。现以单辆私家车以及4种类型单辆电动汽车总的日负荷曲线为例进行分析对比,结果分别如图4、图5所示,其他类型电动汽车的充电负荷曲线具有类似的特性。

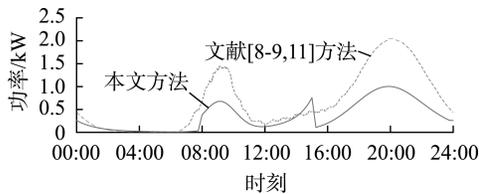


图4 单辆私家车的日充电负荷预测曲线

Fig.4 Daily charging load forecasting curve of a private electric vehicle

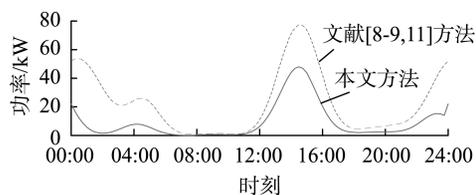


图5 4种类型单辆电动汽车总的日充电负荷预测曲线

Fig.5 Total daily charging load forecasting curve of electric vehicles of four types

分析图4、5可得如下结论。

a. 从总体来看,2种方法所得的电动汽车日充电负荷曲线有相似的变化规律,定性上都能合理地描述充电负荷的变化特性。但本文所提方法计算得到的负荷数值小于文献[8-9,11]中方法计算得到的负荷数值,这是因为本文所提方法中的充电负荷是由充电功率与充电概率的乘积得到。

b. 在确定充电负荷时,文献[8-9,11]中方法是通过抽取充电时段,并默认电动汽车在该时段内一定发生充电行为;而本文所提方法是利用起始充电时刻和充电时长的概率密度推导得到包括充电时段在内的各时刻的充电概率,认为电动汽车在该时段内以一定的概率发生充电行为。文献[8-9,11]中方法对用户充电的随机性欠缺考虑,故本文所提方法更能充分恰当地描述用户充电行为的随机性。

c. 本文所提方法基于充电时刻,能够比较具体准确地计算各个时刻的充电负荷;而文献[8-9,11]中方法基于充电时段,不能精确描述充电时段较短的充电过程中的充电负荷特性。由图4可见,本文所提方法能够比较准确地描述私家车在14:00左右的充电行为,而文献[8-9,11]中方法没能体现该时刻的充电负荷高峰,故本文所提方法具备准确描述每一个时刻充电负荷的优势。

综上所述,本文所提电动汽车充电负荷预测方法能够恰当地描述车主随机性较强的充电行为,可以准确、科学地预测电动汽车的充电负荷。

5 结论

a. 本文在对充电负荷预测影响因素的负荷模型进行改进的基础上,提出了基于时刻充电概率的负荷预测方法。该方法通过计算各时刻的充电概率进而得到充电负荷,规避了常用负荷预测方法中存在的参数模型设置主观、预测结果与用户随机性驾驶行为不匹配等缺陷。

b. 以深圳市为例,计算得到了各类型电动汽车的充电负荷曲线,并与常用负荷预测方法的预测结果进行了对比分析。结论表明,本文所提方法能够精确得到各时刻的充电负荷,通过计算时刻充电概率恰当地描述了用户充电行为的随机性,有效地证明了本文所提负荷预测方法的科学性、客观性。

参考文献:

- [1] 李立涅,张勇军,陈泽兴,等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEM Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [2] ISLAM M S, MITHULANANTHAN N, HUNG D Q. A day-ahead forecasting model for probabilistic EV charging loads at business premises [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 741-753.
- [3] NGUYEN H, HANSEN C K. Short-term electricity load forecasting with time series analysis [C] // 2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management. Dallas, TX, USA: IEEE, 2017: 214-221.
- [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] 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.
- [6] 刘文霞,徐晓波,周樾. 基于支持向量机的纯电动公交车充/换电站日负荷预测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 41-47.
LIU Wenxia, XU Xiaobo, ZHOU Xi. Daily load forecasting based on SVM for electric bus charging station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 41-47.
- [7] 朱慧婷,杨雪,陈友媛. 电动汽车充电负荷预测方法综述[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(5): 44-47.
ZHU Huiting, YANG Xue, CHEN Youyuan. Overview of the charging load forecasting methods of plug-in electric vehicles [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(5): 44-47.
- [8] 刘青,戚中译. 基于蒙特卡洛法的电动汽车负荷预测建模[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(10): 14-19.

- LIU Qing, QI Zhongyi. Electric vehicles load forecasting model based on Monte Carlo simulation [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2014, 30(10): 14-19.
- [9] 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.
- [10] SHAO S N, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network [C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [11] 陈丽丹,张尧. 电动汽车充电负荷预测系统研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2014, 29(1): 29-36.
- CHEN Lidan, ZHANG Yao. Research on load forecasting system for electric vehicle charging [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2014, 29(1): 29-36.
- [12] 陈丽丹,聂涌泉,钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 216-225.
- CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 216-225.
- [13] 张洪财,胡泽春,宋永华,等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(1): 13-20.
- ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(1): 13-20.
- [14] 李亚芬,黄梅,张维戈. 电动出租车日充电负荷估算方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(10): 55-60.
- LI Yafen, HUANG Mei, ZHANG Weige. An estimation method for daily charging load of electric taxis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(10): 55-60.
- [15] 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 mode for charging power demand of electric vehicles [J]. *Power System Technology*, 2010, 34(11): 126-130.
- [16] SANTOS A, MCGUKIN N, NAKAMOTO H V, et al. Summary of travel trends: 2009 national household travel survey [R]. [S.l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2011.
- [17] 张德欣,陈金川,刘莹. 北京市私人机动车交通出行特征及发展对策 [C] // 第六届交通运输领域国际学术会议. 大连: 第六届交通运输领域国际学术会议论文集, 2006: 431-438.
- ZHANG Dexin, CHEN Jinchuan, LIU Ying. Daily travel characteristics and the development strategy of private motor vehicles in Beijing [C] // International Conference of Transportation Professionals. Dalian, China: Proceedings of the International Conference of Transportation Professionals, 2006: 431-438.

作者简介:



王浩林

王浩林(1994—),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车负荷预测(**E-mail**: ranger.chn@foxmail.com);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统无功规划(**E-mail**: zhangjun@scut.edu.cn);

毛海鹏(1994—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车负荷预测(**E-mail**: 1021639323@qq.com)。

Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles

WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The charging load forecasting of EVs (Electric Vehicles) plays an important role in the promotion of EVs. In order to overcome the shortcomings of subjective setting of some parameters and lack of matching between the forecasting model and the random driving behaviors of EV users, the EVs are particularly classified, the probability model of influencing factor for charging load forecasting is established, and the charging load forecasting method based on instantaneous charging probability is proposed by using the probability statistics and Monte Carlo simulation method. The charging duration is derived by the daily mileage obtained by scientific analysis instead of the subjectively given initial SOC (State Of Charge) and the charging load is determined by using the more random instantaneous charging probability instead of the calculated charging period. Taking a city as the example, the daily charging load curve of related EVs is forecasted and compared with the results of common load forecasting methods, which verifies that the proposed load forecasting method can scientifically forecast the EV users' charging load and provide a reliable basis for power management strategy for power grid and users.

Key words: electric vehicles; charging load forecasting; probability model; Monte Carlo method; time; models