

电动汽车充电负荷计算方法

罗卓伟¹, 胡泽春¹, 宋永华¹, 杨霞¹, 占恺峤¹, 吴俊阳²

(1. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京市 100084;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510623)

摘要: 在研究中国电动汽车相关政策、发展趋势的基础上, 基于调研结果, 分析了不同类型电动汽车不同充电行为对应的充电方式及充电时段。根据不同类型电动汽车不同充电行为的充电功率, 提出采用蒙特卡洛模拟抽取起始荷电状态、起始充电时间的电动汽车充电负荷计算方法。该方法将不同车辆的不同充电行为按充电需求进行分类, 根据充电方式、起始荷电状态、充电需求、起始充电时间计算充电时间, 获得充电负荷曲线。对中国未来电动汽车充电负荷水平进行了计算和分析。分析结果表明: 随着中国电动汽车的发展, 充电负荷将对电网的运行和规划带来较大的影响; 充电负荷具有明显的峰谷差, 负荷调控的潜力大。

关键词: 电动汽车; 蒙特卡洛模拟; 充电负荷计算; 峰荷

0 引言

在能源短缺、环境污染严重、全球气候变化的背景下^[1-2], 电动汽车作为一种新型交通工具, 在缓解能源危机、促进人类与环境的和谐发展等方面具有传统汽车不可比拟的优势, 目前已成为各国政府、汽车制造商、能源企业关注的焦点^[3]。电动汽车充电负荷计算作为分析电动汽车对电网影响的基础, 对电力系统规划以及运行具有重要意义。

影响电动汽车充电负荷的主要因素包括电动汽车规模、起始荷电状态(state of charge, SOC)、充电功率、充电时间、动力电池容量等。对电动汽车规模以及起始 SOC 这 2 个因素, 在文献[4-7]的研究中均是给定的, 文献[8]的研究考虑了在不同的情景集下电动汽车的规模 and 不同驾驶行为的起始 SOC。对于电动汽车充电功率, 文献[4, 6-7]假设充电功率单一, 而文献[5, 8]考虑了电动汽车有多种可能的充电功率。对于电动汽车充电时间, 文献[4]假设电动汽车在固定时间段内随机充电; 文献[5]假设电动汽车起始充电时间固定; 文献[6, 8]基于驾驶行为数据分析了电动汽车充电时间分布; 文献[7]研究了在不同电价、电网控制与不控制等多个情景集电动汽车的不同充电时间。文献[4-8]在研究电动汽车充电负荷时都仅考虑单一类型的可插入式混合动力电动汽车, 且电动汽车电池容量也是固定的。文献[9]分析了多种类型电动汽车(紧凑型居民汽车、中型居民汽车、中型运动型多功能车(SUV)、大型 SUV), 在不同电池容量以及不同充电功率下的电动汽车充电

负荷。

目前已发表的文献未对不同类型车辆对应的充电时间、充电方式、起始 SOC 进行划分; 在分析充电需求时, 假设所有车辆均充满或充至给定容量, 未考虑车辆的不同充电需求。

本文对中国电动汽车的发展现状及趋势进行了分析, 结合实地调研讨论了未来主要类型电动汽车对应的充电方式和充电时间, 提出了电动汽车充电负荷计算模型以及基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算方法, 并对中国未来电动汽车充电负荷进行了计算分析。

1 中国电动汽车充电模式分析

中国政府出台了一系列电动汽车相关政策以扶持电动汽车的发展。自 2009 年开展了“十城千辆”计划, 推广的车辆主要在城市的公交、出租、公务、市政等领域, 目前试点城市已达 25 个^[10]。

通过分析中国电动汽车发展现状, 结合国家以及部分省市发布的电动汽车发展规划, 总结出中国电动汽车未来发展趋势大体为: 2010—2015 年, 电动汽车主要在公交车、公务车、出租车中示范运营; 2016—2020 年在公共交通系统、公务车中实现电动汽车规模化运营, 私家车较少; 2021—2030 年电动私家车加速发展, 其比例逐年上升。

可见中国电动汽车的主要类型为公交车、出租车、公务车、私家车等。根据中国于 2010 年 4 月通过的《电动汽车传导式接口》, 充电模式分为慢速充电(充电模式 L1), 常规充电(充电模式 L2), 快速充电(充电模式 L3), 如表 1 所示。

表 1 中国电动汽车不同充电模式比较
Tab. 1 Comparison of different charging modes of
plug-in electric vehicles in China

充电模式	额定电压/V	额定电流/A	适用场所
L1	单相 220	16	家用
L2	2-1 单相 220	32	商场、停车场等
	2-2 三相 380	32	
	2-3 三相 380	63	
L3	600	300	高速公路服务区、充电站等

注：模式 L1 和 L2 为交流充电；模式 L3 为直流充电。

1.1 公交车充电模式

根据对北京地区公交车运营情况的调研,公交车日均行驶里程为 150~200 km。公交车首班发车时间为 5:30—6:00,末班发车时间为 22:00—23:00。每天上、下班时间(6:30—9:00,16:30—18:30)为公交车运行高峰时段。高峰时段发车间隔较短,一般为 3~5 min,所有车辆均需参与运行,其余时段发车间隔较长,为 7~8 min。

目前示范运营的电动公交车额定行驶里程约为 200 km,考虑到安全等因素,一次充电难以满足一天的运营需求。电动公交车在白天运营过程中需要至少充电 1 次,且在高峰时段,电动公交车不能充电。由于公交车运营时间、地点相对集中,可以在现有停车场建设充电设施进行集中充电。在白天运营时段内,公交车难以长时间停留,进行快速充电;在夜间停运时段进行常规充电。依据上述分析作出一种合理的假设:电动公交车白天充电的时间为 10:00—16:30,夜间充电的时间为 23:00—5:30。假设电动公交车每天需要充电 2 次,每次充电的起始 SOC 服从正态分布 $N(0.5,0.1^2)$,即起始 SOC 的期望值为 0.5,其分布在 $[0.2,0.8]$ 范围内的概率超过 99.5%。

1.2 出租车充电模式

根据对北京地区出租车运营情况的调研,出租车日均行驶里程为 350~500 km。每辆出租车由 2 名司机轮流驾驶,分大班和小班 2 种模式。大班出租车司机每 24 h 倒一次班,小班出租车司机每 12 h 倒一次班。目前大班与小班比例约为 5:1。大班司机每天晚上在 2:00—5:00 休息约 2 h,在这段时间内可进行常规充电。午餐时间在 11:30—14:30,有 1 h 左右停止运营,在这段时间内可进行快速充电。小班司机由于需要倒班,运营过程中休息时间较短,只能进行快速充电,能进行快速充电的时间为 11:30—14:00 和 2:00—4:00。以目前在深圳进行电动出租车示范运营的 BYD E6 为参考,该车额定行驶里程为 300 km(实际市区行驶里程要小

于额定行驶里程),一次充电难以满足一天的行驶需要。假设电动出租车在一天的运营过程中进行 2 次充电,起始 SOC 满足正态分布 $N(0.3,0.1^2)$ 。

1.3 公务车充电模式

公务车未执行公务时,即可进行充电,因此在大多数情况下有充足的充电时间,其充电模式多采用慢速或常规充电。目前大部分公务车实行夜间停在指定停车地点的制度,假设充电起始时间大致在机关单位下班后至第 2 天上班之前,也即 18:00—7:00。为了满足第 2 天工作需要,假设公务车需每天充电,起始 SOC 满足正态分布 $N(0.4,0.1^2)$ 。

1.4 私家车充电模式

私家车主要被用于车主上、下班以及休闲娱乐等,相应的充电地点主要包括单位办公停车场、居民停车场、商场超市停车场等。仍以北京地区私家车出行为例,上班出发高峰时段为 7:00—9:00,占私家车总量的 66.95%。车辆到达高峰时段为 7:30—9:30,占私家车总量的 71.95%^[11]。

私家车在办公以及居民停车场停放时间较长,能够对其进行常规或者慢速充电,充电时间为到达上班地点之后至下班时间以及下班回家后至次日早晨上班之前,即 7:30—17:00 和 19:00—7:00。在城市商业区,私家车可能的充电地点为商场、超市等专用或公共的停车场。作者在北京海淀区某大型商场和某超市实际调研了近万辆私家车辆的停车行为,其停车时间分布见图 1,平均停车时间为 79.78 min。

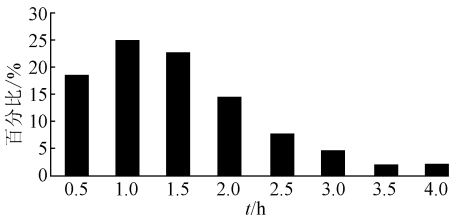


图 1 私家车商场、超市停车时间分布
Fig. 1 Private car parking time distribution at
commercial centre and supermarket in China

结合中国充电标准,在这类地点将进行常规充电,基于调研数据假设能够进行充电的时长大致为 80 min,在工作日和节假日其可能的充电时间分别为 19:00—22:00 和 12:00—22:00。根据文献[12],私家车年均行驶里程为 2.5 万 km,推算出日均行驶里程为 68.49 km。假设私家车每天充 1 次电,起始 SOC 满足正态分布 $N(0.6,0.1^2)$ 。

1.5 充电方式以及充电时序

综上,出租车、公交车日均行驶里程较长,需充电 2 次以满足其一天的运营需要,公交车、大班出租车夜间停放时间较长,可采用常规充电,而白天采用

快速充电。小班出租车停车时间较短,采用快速充电。公务车可在单位停车场进行慢速或者常规充电。当私家车充电地点为办公、居民停车场时,可采用慢速或者常规充电;在商场、超市停车场等休闲娱乐场所时,充电方式为常规充电。总结上述电动汽车充电方式以及充电时间分布,如图 2 所示。

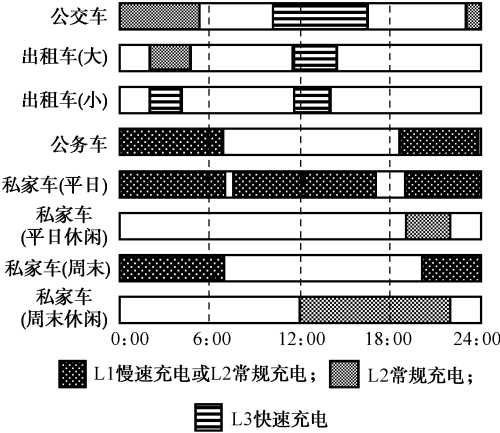


图 2 不同类型电动汽车充电方式及充电时间分布
Fig. 2 Charging mode and charging time domain of different plug-in electric vehicles(PEVs)

2 电动汽车负荷模型及其计算方法

2.1 电动汽车充电负荷计算模型

将每一辆电动汽车充电负荷曲线累加,可得到总充电负荷曲线。充电负荷计算的难点在于分析电动汽车起始充电时间和起始 SOC 的随机性。

充电负荷计算以天为计算单位,时间间隔精确到分钟,全天共 1 440 min。第 i 分钟总充电负荷为所有车辆在此时充电负荷之和,总充电功率可表示为:

$$L_i = \sum_{n=1}^N P_{n,i} \tag{1}$$

式中: L_i 为第 i 分钟总充电功率, $i = 1, 2, \dots, 1\,440$; N 为电动汽车总量; $P_{n,i}$ 为第 n 辆车在第 i 分钟的充电功率。

按充电需求将第 n 辆电动汽车的第 j 种充电行为定义为 $S_{n,j}^{NC}$ 或者 $S_{n,j}^C$ 。第 1 类充电行为 $S_{n,j}^{NC}$,无充电时长的约束,充电过程持续到电池充满;第 2 类充电行为 $S_{n,j}^C$,有充电时长的约束,在充电时段结束时无论是否充满均停止充电。以私家车为例,单位停车场和居民停车场充电有较长的充电时间,电动汽车能够充满电,为第 1 类充电行为;商场超市停车场充电有充电时长的限制,为第 2 类充电行为。私家车充电地点及充电类型如图 3 所示。

2.2 基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算

假设电网不控制电动汽车充电行为,电动汽车

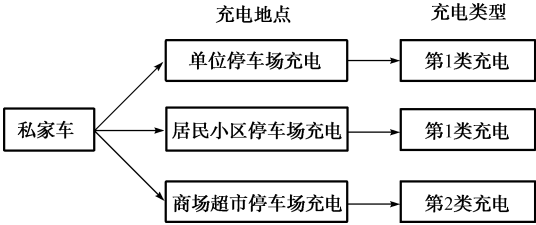


图 3 私家车充电地点及充电类型
Fig. 3 Charging places and charging types of private PEVs

接入电网后随即开始充电。采用蒙特卡洛模拟抽取单位车辆起始 SOC、起始充电时间的电动汽车充电负荷计算方法,其流程图如图 4 所示。

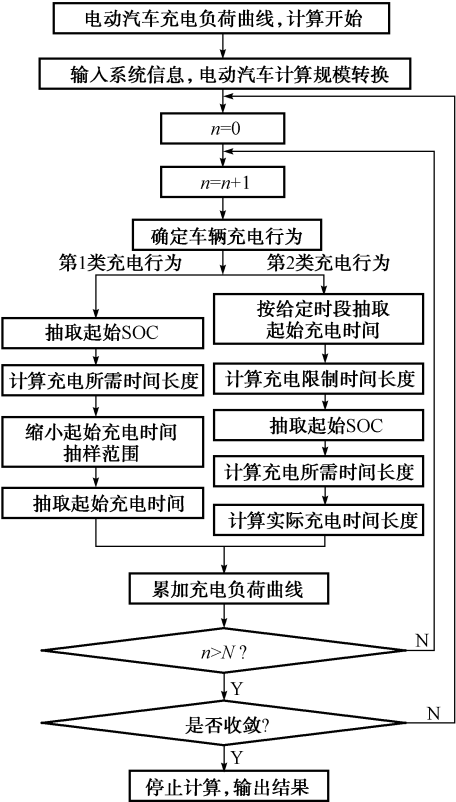


图 4 基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算流程图
Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm based on Monte Carlo simulation

系统输入信息包括电动汽车总规模、各种充电行为发生的概率分布、可能的充电时段及起始充电时间的概率分布、充电时长约束、不同类型充电行为对应的起始 SOC 概率分布。

对单辆车充电负荷计算时,首先确定该车的充电行为,若该车有多种可能的充电行为,系统产生一个满足 $U(0,1)$ 均匀分布的随机数,根据不同充电行为发生的概率分布,确定车辆的充电行为。

本文假设常规、快速充电电流分别为 0.2 C 和

1. 25 C, 电池从零电量充满分别需要 5 h 和 0.8 h。对第 1 类充电行为,通过蒙特卡洛模拟抽取起始 SOC。假设车辆希望离开时充满电,计算得出充电需求。基于充电方式、充电需求计算充电所需时长。在满足充电所需时长的约束下,缩小起始充电时间抽样范围。按指定概率分布对起始充电时间进行抽样。实际充电时长等于充电所需时间。对第 2 类充电行为,在给定的起始充电时间范围内,通过蒙特卡洛模拟方法抽取起始充电时间,计算充电限制时长。根据随机抽取的起始 SOC 和给定的目标 SOC,计算满足充电需求所需充电时长。实际充电时间为充电所需时长与充电限制时长中的较小值。

3 中国电动汽车充电负荷预测及分析

3.1 电动汽车发展规模预测

《中国汽车产业发展报告(2008 年)》^[13]中预测的中国私家车、公共车辆(主要为出租车以及公务车)未来总量,如表 2 所示。

表 2 中国私家车及公共车辆保有量预测
Tab. 2 Predicted numbers of private and public cars in China

年份	私家车/万辆	公共车辆/万辆
2010	2 524.2	580
2015	4 699.2	
2020	8 298.6	1 100
2030	17 683.0	1 800

2009 年底全国出租车约为 110 万辆,等比例计算出中国 2020 年、2030 年公务车、出租车总量分别为 891.38 万辆、208.62 万辆和 1 458.62 万辆、341.38 万辆。以线性回归拟合出租车、公务车增长趋势,得出 2015 年中国出租车、公务车总量分别为 680.69 万辆、159.31 万辆。按目前北京出租车与公交车比例,预测 2015 年、2020 年、2030 年全国公交车分别为 66.58 万辆、87.18 万辆、128.4 万辆。以表 2 预测值为常态预测值,以常态预测值的 110% 作为高预测值,以常态预测值的 90% 作为低预测值,预测中国各类车辆总量可能的范围,作为仿真的输入参数,预测结果如表 3 所示。

表 3 中国汽车保有量预测结果
Tab. 3 Forecasting the scale of vehicles in China

年份	公交车/万辆	公务车/万辆
2015	59.92~73.24	612.62~748.76
2020	78.46~95.90	802.20~980.52
2030	115.56~141.24	1 310.96~1 602.28
年份	出租车/万辆	私家车/万辆
2015	143.38~175.24	4 229.28~5 169.12
2020	187.76~229.48	7 468.74~9 128.46
2030	307.24~375.52	15 914.7~19 451.30

假设私家电动车在 2020 年、2030 年占私家车总量的比例分别为 10% 和 30%,其余类型电动汽车在 2015 年、2020 年、2030 年占 5%,15% 和 30% 时,预测中国电动汽车总充电负荷。

3.2 参数设置与收敛性分析

在计算电动汽车充电负荷时,对大班出租车在白天以及私家车在商场超市充电加入了充电时长的限制,分别为 120 min 和 80 min。假设周末私家电动汽车在零点之前与零点之后起始充电车辆的数量之比为 5 : 1。私家车在居民停车场、单位停车场、商场超市停车场,充电的比例分别为 0.7、0.2 和 0.1。私家车上班到达时间相对下班回家时间集中且考虑到不同单位上、下班时间有所区别,假设私家车在单位停车场以及居民停车场起始充电时间分布服从 $N(9, 0.5^2)$ 和 $N(19.5, 1.5^2)$ 的正态分布,其余第 1 类充电行为起始充电时间服从均匀分布。第 2 类充电行为起始充电时间满足直角梯形分布,其概率密度函数为 $f(t)$,见附录 A 图 A1。

考虑未来充电技术的发展,假设所有车辆充电方式为常规或快速充电,充电效率为 90%^[8]。充电功率依照国家标准,出租车日常运营需要容量较大的电池,以 BYD E6 为参考,其所使用的锂离子电池额定电压为 320 V、额定容量 200 A · h,其常规、快速充电功率分别为 14 kW 和 90 kW。其余乘用车(私家车、公务车)假设使用的锂离子电池额定电压 320 V、额定容量 100 A · h,计算得出常规、快速充电功率分别为 7 kW 和 45 kW,假设公交车充电功率为私家车的 3 倍。

系统参数设置如表 4 所示。计算周末电动汽车充电负荷曲线时,不考虑公务车、私家车上下班的用车行为。本文采用方差系数 β ^[14] 评判蒙特卡洛法模拟的精度,即

$$\beta_i = \frac{\sqrt{V_i(\bar{L})}}{\bar{L}_i} = \frac{\sigma_i(\bar{L})}{\sqrt{k} \bar{L}_i} \tag{2}$$

式中: β_i 为第 i 时刻充电负荷方差系数, $i=1, 2, \dots, 1\ 440$; $V_i(\bar{L})$ 为第 i 时刻充电负荷的方差; $\bar{L}_i$ 为第 i 时刻充电负荷期望值; $\sigma_i(\bar{L})$ 为充电负荷的标准差; k 为计算次数。

以各个时间点中方差系数最大值 $\beta = \max(\beta_i)$ 作为判据。

3.3 预测结果

设置蒙特卡洛法模拟的次数至少为 50 000 次,要求方差系数小于 0.05%。在汽车总量常态预测情景集下,2015 年、2020 年、2030 年中国电动汽车充电负荷曲线如图 5 所示。

表 4 中国电动汽车充电负荷预测参数设置
Tab. 4 Parameter settings for charging load prediction in China

车辆类型	每天充电次数	充电时段	是否有充电 时间长度限制	各时段充电的概率	起始充电容量分布	起始时间分布
公交车	2	10:00—16:30	否	1	$N(0.5, 0.1^2)$	均匀分布
		23:00—5:30	否	1	$N(0.5, 0.1^2)$	
出租车(大)	2	2:00—5:00	120 min	1	$N(0.3, 0.1^2)$	直角梯形分布
		11:30—14:30	否	1	$N(0.3, 0.1^2)$	均匀分布
出租车(小)	2	2:00—4:00	否	1	$N(0.3, 0.1^2)$	均匀分布
		11:30—14:00	否	1	$N(0.3, 0.1^2)$	均匀分布
公务车	1	18:00—7:00	否	1	$N(0.4, 0.1^2)$	均匀分布
私家车(工作日)	1	7:30—17:00	否	0.2	$N(0.6, 0.1^2)$	$N(9, 0.5^2)$
		19:00—7:00	否	0.7	$N(0.6, 0.1^2)$	$N(19, 1.5^2)$
		19:00—22:00	80 min	0.1	$N(0.6, 0.1^2)$	直角梯形分布
私家车(周末)	0.8	20:00—5:00	否	0.5	$N(0.6, 0.1^2)$	均匀分布
		0:00—7:00	否	0.1	$N(0.6, 0.1^2)$	均匀分布
		12:00—22:00	80 min	0.2	$N(0.6, 0.1^2)$	直角梯形分布

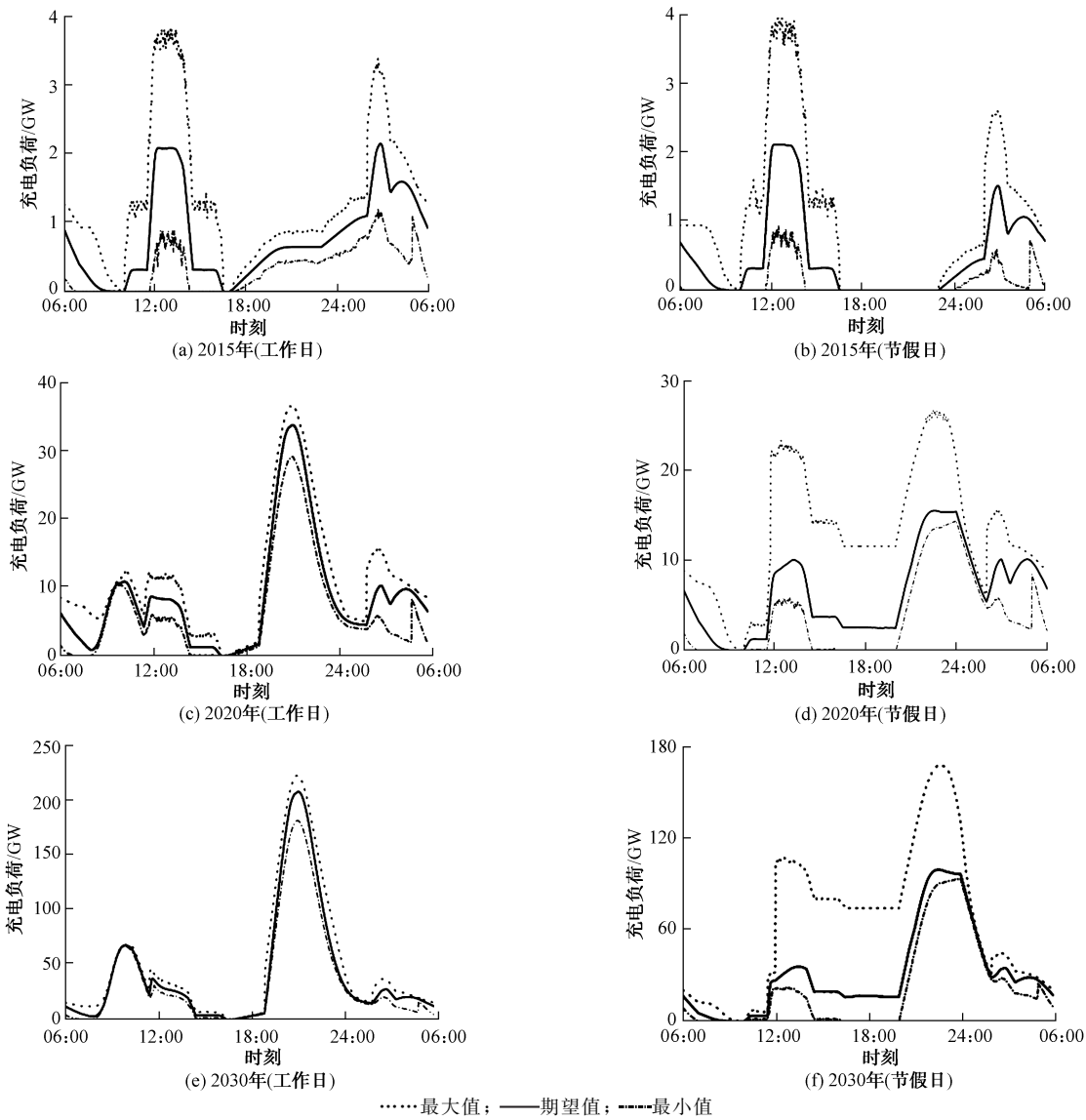


图 5 中国 2015 年、2020 年、2030 年电动汽车充电负荷曲线
Fig. 5 Prediction of charging curves in China in 2015, 2020, 2030

2030 年汽车总量常态预测情景集下,其余类型电动汽车占该类型车辆总量的比例不变,当电动私家车占私家车总量的 10%,30%和 50%时,充电负荷期望值曲线如图 6 所示。

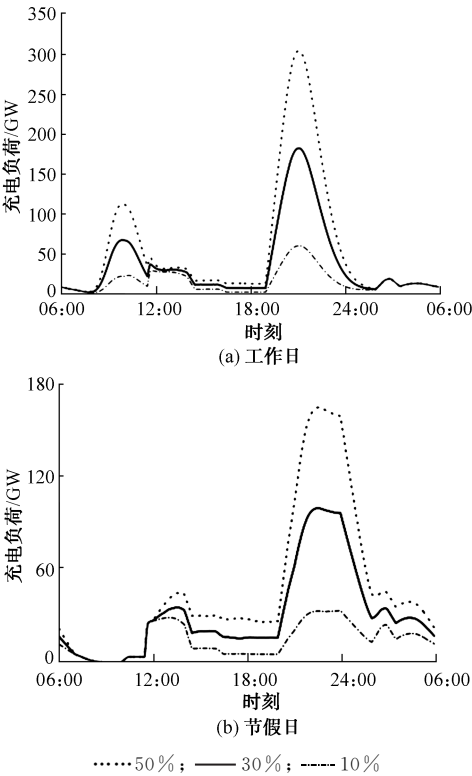


图 6 2030 年中国电动私家车不同渗透率下充电负荷曲线
Fig.6 Charging curves at different penetration levels of private PEVs in China in 2030

在汽车总量不同规模的情景集下充电负荷峰荷、日均充电电量分别如表 5、表 6 所示。对所有情景经 50 000 次模拟计算,β均小于 0.035%。

表 5 电动汽车充电负荷峰荷
Tab.5 Peak charging load of PEVs

年份	高预测情景集充电负荷峰荷/GW		常态预测情景集充电负荷峰荷/GW		低预测情景集充电负荷峰荷/GW	
	工作日	节假日	工作日	节假日	工作日	节假日
2015	4.4	4.3	3.9	3.8	3.6	3.5
2020	40.0	29.0	37.0	26.0	33.0	24.0
2030	247.0	185.0	224.0	168.0	201.0	148.0

表 6 电动汽车日均充电电量
Tab.6 Power consumption of PEVs charging

年份	高预测情景集日均充电电量/(GW·h)		常态预测情景集日均充电电量/(GW·h)		低预测情景集日均充电电量/(GW·h)	
	工作日	节假日	工作日	节假日	工作日	节假日
2015	21	13	19	12	17	11
2020	227	171	206	155	186	139
2030	1 098	826	998	732	899	676

3.4 结果分析

1)2010—2015 年,在电动汽车示范运营阶段,充电负荷较小且充电时间相对固定。2016—2020 年,电动汽车充电负荷增加,出现充电负荷高峰。2021—2030 年,随着电动私家车的普及,电动汽车充电负荷快速上升。

2)未来电动汽车将会给电网带来新的负荷增长。充电负荷有一个明显的晚高峰,产生这个高峰的原因是私家车在工作日下班后以及节假日晚间集中充电。由于在节假日私家车回家的时间相对工作日更为分散,因此节假日的充电峰荷有所下降。当电动私家车占私家车总量的 10%,30%和 50%时,在工作日以及节假日电动汽车充电峰荷分别为 72 GW,224 GW,358 GW 以及 56 GW,168 GW,279 GW。

3)电动汽车充电负荷具有明显的峰谷差,其峰荷时段与全网负荷峰荷时段基本一致。若对电动汽车的充电负荷进行控制,实现有效的削峰填谷,则可减小电源和电网的投资并降低电网的运行成本。

4 结语

电动汽车充电负荷受很多因素的影响,很难在负荷和这些因素之间建立一种确定的数学模型。本文对电动汽车充电负荷的计算方法进行了有益的探索,并对中国电动汽车在 2015 年、2020 年、2030 年充电负荷进行了预测,计算方法和预测结果对研究未来中国电动汽车充电负荷对电网的影响具有一定的参考价值。

文中涉及电动汽车电能供给方式的数据均基于北京地区,未来可以在其他地区开展相关调研工作,以更加符合各个地区的实际情况;部分参数如起始 SOC 等选取具有一定的主观性,可以通过进一步调研各种类型汽车对应的不同驾驶行为并依据驾驶行为划分充电类型,设定对应的起始 SOC,使其更加合理。

· 广告 ·

空心电抗器设计软件

诚邀法人投资合作、经营电抗器产业

一流的设计技术与加工技术诚邀您的加盟

详细介绍见网站: <http://appreciate0.qiye.gd.cn>

电子邮箱: AppreciateAndIHelp@126.com

搜索关键字: 空心电抗器设计与制造、空心电抗器软件设计与制造、电抗器(空心电抗器,铁心电抗器)

联系电话: 15295956802 联系人: 周先生

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] SONG Y H, YANG X, LU Z X, et al. Integration of plug-in hybrid and electric vehicles: experience from China[C]// Proceedings of Power & Engineering Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 1-5.
- [2] FERDOWSI M. Vehicle fleet as a distributed energy storage system for the power grid[C]// Proceedings of IEEE Power & Engineering Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-2.
- [3] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Optimization of vehicle-to-grid scheduling in constrained parking lots [C]// Proceedings of IEEE Power & Engineering Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-8.
- [4] CLEMENT K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [5] SHAO S N, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network [C]// Proceedings of IEEE Power & Engineering Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-8.
- [6] GETH F, WILLEKENS K, CLEMENT K, et al. Impact-analysis of the charging of plug-in hybrid vehicles on the production park in Belgium[C]// Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, April 26-28, 2010, Valletta, Malta: 425-430.
- [7] MOHSENI P, STEVIE R G. Electric vehicles: Holy Grail or fool's gold [C]// Proceedings of IEEE Power & Engineering Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 1-5.
- [8] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operation [C]// Proceedings of IEEE Power & Engineering Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-6.
- [9] HADLEY S W. Evaluating the impact of plug-in hybrid electric vehicles on regional electricity supplies [C]// Proceedings of Bulk Power System Dynamics and Control: VII Revitalizing Operational Reliability, 2007 iREP Symposium, August 19-24, 2007, Charleston, SC, USA: 1-12.
- [10] 吴憩棠. 我国“十城千辆”计划的进展[J]. 汽车与配件, 2009, 1(13): 15-19.
WU Qitang. Progresses in “Ten Cities & Thousand Units” plan[J]. Automobile and Parts, 2009, 1(13): 15-19.
- [11] 岳芳. 上班出行行为特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [12] 张德欣, 陈金川, 刘莹. 北京市私人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论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2006.
- [13] 国务院发展研究中心产业经济研究部, 中国汽车工程学会, 大众汽车集团(中国). 中国汽车产业发展报告(2008)[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2008.
- [14] 赵渊, 周家启, 刘志宏. 大电网可靠性的序贯和非序贯蒙特卡洛仿真的收敛性分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 127-133.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Zhihong. Convergence analysis and comparison of sequential and nonsequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 127-133.

罗卓伟(1984—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电动汽车、电网优化控制与运行。E-mail: luozhuoweil0@gmail.com

胡泽春(1979—),男,副教授,主要研究方向:智能电网、电力系统优化规划与运行。

宋永华(1964—),男,教授,英国皇家工程院院士,主要研究方向:智能电网和低碳电力。

Study on Plug-in Electric Vehicles Charging Load Calculating

LUO Zhuowei¹, HU Zechun¹, SONG Yonghua¹, YANG Xia¹, ZHAN Kaiqiao¹, WU Junyang²

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electric Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510623, China)

Abstract: The policy and the development of plug-in electric vehicles (PEVs) in China are analyzed first. Then the charging modes and charging time of different kinds of PEVs' charging behaviors in China are proposed according to the field survey. The charging periods of different kinds of PEVs' charging behaviors are divided. The Monte Carlo simulation method is applied to determine the starting state of charge (SOC) and the initial charging point. With the charging methods (either on slow, regular, or fast mode) and initial charging point, together with the sampled starting SOC and charging needs of different PEVs' charging behaviors, the charging time can be calculated to get the charging curve. Based on the study, the future charging load in China is forecasted. The results indicate that the charging of PEVs will have significant impacts on the planning and operation of the power system. The huge difference between charging peak and off-peak provides a substantial potential to coordinate the charging of PEVs.

Key words: plug-in electric vehicles; Monte Carlo simulation; charging load calculating; peak loads

附录 A

第 2 类车辆达到时刻概率密度函数 $f(t)$ 如图 A1 所示：

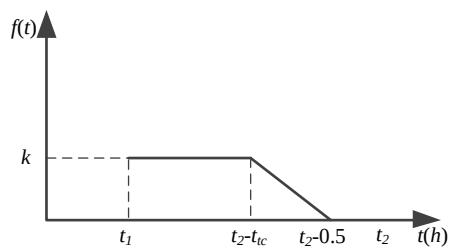


图 A1 第 2 类充电行为车辆到达时刻概率密度函数 $f(t)$
Fig.A1 The probability function of arrival time of the second charging behavior

图中， t_1 表示充电时段的起始时刻， t_2 表示充电时段的结束时刻， t_{tc} 表示充电限制时间。假设至少充电半小时，充电车辆最晚到达时刻为充电时段结束前半小时。