

电动汽车充放电模式对电网日负荷的影响

李含怡, 赵彩虹, 陈笑, 胡骏, 陈子奇

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 根据传统汽车的行驶特性, 分析各类电动汽车充电行为的影响因素, 考虑在3种充放电模式下电动汽车的充放电方式、电池特性、充放电时间及充电成本等因素, 建立基于蒙特卡罗模拟法的规模化电动汽车在不同充放电模式下的日负荷模型. 分析结果表明, 电动汽车无序充电会导致电网峰谷差率增加, 单向有序充电则可在一定程度上实现“填谷”目标, 而双向有序充放电模式下的电动汽车负荷可以更好地平抑电网负荷波动, 缓解电力紧张, 并给用户带来一定的经济收益.

[关键词] 电动汽车, 充放电模式, 蒙特卡罗模拟法, 负荷模型

[中图分类号] TM714 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)03-0011-07

Impact of Charging-Discharging Modes of Electric Vehicles on Daily Load of Power Grid

Li Hanyi, Zhao Caihong, Chen Xiao, Hu Jun, Chen Ziqi

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: On the basis of traditional vehicles' driving characteristic, this paper analyzes the impacting factors of charging behaviors of different types of electric vehicles (EVs), and considers charging-discharging methods and time, battery characteristic and charging cost under three charging-discharging modes. A daily load model of large-scale EVs under each modes is built by Monte Carlo simulation. The results show that EVs' free charging power will increase the peak-valley ratio of the grid load, while orderly charging will realize 'valley filling' to some extent, and charging-discharging regularly will restrain the grid load fluctuation better, mitigate the strained situation of power shortage and bring certain economic benefits to the users as well.

Key words: electric vehicle, charging-discharging mode, Monte Carlo simulation, load model

随着石油资源的日趋紧张和动力储能电池技术的不断发展, 电动汽车已成为最受关注的新能源汽车发展方向. 我国电动汽车起步较晚, 但发展迅速, 近几年相继出台了《电动汽车电池管理系统与非车载充电机之间的通信协议》等4项国家标准, 同时对包括电动汽车在内的新能源汽车实施了补贴扶持政策.

规模化电动汽车入网, 其总体负荷将会很大, 且由于其在时空上具有一定的随机性, 势必会对电网的安全稳定运行带来一定的影响. 文献[1-4]提出了电动汽车主要有3种充放电模式, 即单向无序充电、单向有序充电以及双向有序充放电. 文献[5]从影响电动汽车功率需求的因素着手, 考虑电动汽车开始充电的时间、行驶里程以及充电功率3个随机变量, 建立了充电功率需求模型. 文献[6, 7]分析了通勤用和非通勤用电动汽车充电功率需求和负荷时间分布, 对比了不同车型、不同充电功率以及不同渗透率等影响因素下电动汽车充电需求的变化情况. 文献[8]分析了主要类型电动汽车对应的充电方式和充电时间, 并分别考虑工作日以及节假日不同的充电行为, 建立了充电负荷模型. 文献[9]提出了一种基于电动汽车驾驶、停放特性的考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法. 但上述文献在建立电动汽车充电负荷模型时, 假设条件较为单一、理想化, 且未考虑动力电池充电损耗等问题.

收稿日期: 2015-02-04.

通讯联系人: 赵彩虹, 教授, 研究方向: 电力系统稳定与控制、电力市场、电力系统电压/无功优化控制、电动汽车入网技术、智能电网等.

E-mail: zhaocaihong@njnu.edu.cn

本文充分考虑在典型工作日中,不同类型电动汽车在3种充放电模式下的充放电行为,包括充放电方式、电池充放电特性、充放电时间以及充电成本等因素,建立基于蒙特卡罗模拟法(以下简称蒙特卡罗法)的电动汽车充放电负荷模型,分析在不同模式下电动汽车负荷对电网典型日负荷曲线的影响,并讨论不同模式下的经济成本问题。

1 电动汽车充电行为的影响因素

目前,电动汽车主要分为电动公交车、出租车、公务车以及私家车4类。根据文献[8]对我国4类汽车传统车型保有量预测,预计2015年某地区电动汽车保有量约为25 000辆,其中,公交车、出租车、公务车以及私家车所占比例分别为2%、8%、10%以及80%。本文仅考虑在典型工作日中,4类汽车在3种充放电模式下对电网日负荷的影响。

电动汽车动力电池充电以恒流—恒压2阶段法为主^[5],本文采用的充电过程近似为恒功率充电,即忽略开始充电和结束充电两个时间较短的过渡阶段;充电方式分为常规充电和快速充电,充电电流倍率分别为0.2 C和1 C。

电池荷电状态SOC是表征动力电池的一个非常重要的参数,其表达式为:

$$\text{SOC} = \frac{C_1}{C_n}, \quad (1)$$

式中, C_1 为动力电池当前剩余容量/(kW·h); C_n 为动力电池额定容量/(kW·h)。

电动汽车动力电池的起始充电SOC值对车辆充电时长和充电电量起决定性作用,结合汽车日行驶里程及电池额定续航里程,电动汽车的起始充电SOC表达式为^[6]:

$$\text{SOC} = \left(\frac{\text{SOC}_0}{100} - \frac{d}{D} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中, SOC_0 为上一次充电完成后的电池荷电状态; d 为日行驶里程/km; D 为电池额定续航里程/km。

本文仅考虑纯电动汽车。电动公交车车型选用BYD K9,电动出租车、公务车以及私家车均选用BYD E6,各车型动力电池具体参数如表1所示。

表1 不同型号电动汽车动力电池参数

Table 1 Power battery parameters of different types of EVs

汽车型号	电池类型	额定里程/km	电池容量/(kW·h)
BYD K9	磷酸铁锂电池	250	324
BYD E6	磷酸铁锂电池	300	57

文献[8]根据调研指出,公交车日均行驶里程约为150 km~200 km,为满足公交车的正常运营需求,每天需充电2次;日间公交车在运营时段06:00~24:00内,采用快速充电方式,按往返一趟4h计算,则充电负荷在时段10:00~20:00内满足均匀分布,起始充电SOC满足正态分布 $N(0.5, 0.1^2)$;夜间公交车在非运营时段0:00~06:00内,采用常规充电方式,充电负荷在该时段内满足均匀分布,且满足开始运营时电池SOC为1,起始充电SOC同样满足正态分布 $N(0.5, 0.1^2)$ 。

文献[8]给出的出租车日均行驶里程约为350 km~500 km,出租车每天需充电2次以满足运营需求。为避免在交接高峰期造成充电拥堵现象,假设出租车充电负荷在全天内满足均匀分布,即起始充电时间在全天内满足均匀分布,起始充电SOC满足正态分布 $N(0.3, 0.1^2)$,采用快速充电方式。

公务车在未执行任务时即可进行充电,大多数情况下公务车拥有充足的充电时间,每天充电1次即可满足需求。假设公务车在下班后进行充电,在第二天上班前满足电池SOC为1,即充电时段为18:00~07:00,充电负荷在该时段内满足均匀分布,起始充电SOC满足正态分布 $N(0.4, 0.1^2)$,采用常规充电方式。

一般情况下,私家车日行驶里程取决于用户的行驶习惯,假设其充电行为同样只受用户行驶习惯影响,根据美国交通部NHTS2009调研结果^[10],采用极大似然估计出用户日行驶里程满足对数正态分布^[5,9,11],其概率密度为:

$$f_d(d) = \frac{1}{d\sigma_d\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right), \quad (3)$$

式中, $\mu_b=3.7, \sigma_b=0.9$.

同时,结合文献[12]对私家车年均行驶里程的调研统计结果,假设私家车起始充电SOC约满足正态分布 $N(0.6, 0.1^2)$. 根据文献[5]统计结果分析指出,用户最后行程返回时刻近似为正态分布 $N(18, 3^2)$,假设用户在每天最后行程返回之后进行充电,即用户起始充电时间满足正态分布 $N(18, 3^2)$,采用常规充电方式,充电频率为每天一次.

2 电动汽车日负荷计算模型

2.1 电动汽车日充电负荷计算

结合电动汽车起始充电SOC,汽车充电时长 t_c 可表示为:

$$t_c = \frac{(1 - \text{SOC}) \times C_n}{p_c}, \quad (4)$$

式中, p_c 为电池充电功率/kW.

采用恒功率充电方式,并考虑电动汽车充电效率,则每辆电动汽车的日实际充电量 w_i 为:

$$w_i = \frac{w_{i0}}{\eta_i} = t_{ci} \times p_i, \quad (5)$$

式中, w_i 为第 i 辆汽车日实际充电量/kW; w_{i0} 为第 i 辆汽车日所需充电量/kW; η_i 为第 i 辆汽车电池充电效率,取 90%; t_{ci} 为第 i 辆汽车日充电时长/h; p_i 为第 i 辆汽车电池实际充电功率/kW.

一天中,第 t 时刻的电动汽车总充电负荷 P_{tin} 为:

$$P_{tin} = \sum P_{j,t} + \sum P_{c,t} + \sum P_{w,t} + \sum P_{s,t}, \quad (6)$$

式中, $\sum P_{j,t}$ 、 $\sum P_{c,t}$ 、 $\sum P_{w,t}$ 、 $\sum P_{s,t}$ 分别为电动公交车、出租车、公务车以及私家车在第 t 时刻的总充电负荷.

2.2 电动汽车日放电负荷计算

由于受诸如电池寿命短、充放电效率低、放电电能质量难以保障等技术因素的限制,以及诸如电池成本高、缺少电价差推动等经济因素的制约,双向有序充放电技术仍处于试验示范阶段^[13]. 考虑到公交车、出租车以及公务车在白天时段的使用需求,本文仅考虑私家车参与双向有序充放电行为. 假定在蓄电池容量充裕的前提下,除保证原有行程需求,还新增一部分充电量用于向电网送电^[13]. 假定该部分电量与原充电量的比例用送电系数 α 表示,则第 i 辆私家车的日实际充电量 w_i 为:

$$w_i = \frac{(1 + \alpha_i)w_{i0}}{\eta_i}. \quad (7)$$

送电效率 β 取 90%,则第 i 辆私家车向电网的日实际送电量 w_{iout} 为:

$$w_{iout} = \alpha_i w_{i0} \times \beta_i = \beta \int p_{iout} dt, \quad (8)$$

式中, p_{iout} 为第 i 辆私家车电池放电功率/kW.

一天中,第 t 时刻的电动汽车总放电负荷 P_{tout} 为:

$$P_{tout} = \sum P_{s,tout}, \quad (9)$$

式中, $\sum P_{s,tout}$ 为参与放电行为的电动私家车在第 t 时刻的总放电负荷.

2.3 基于蒙特卡罗法的电动汽车日负荷计算模型

一天中,单向无序及单向有序充电模式下的电动汽车在第 t 时刻的总负荷 $P_{d,t}$ 等同于该时刻的总充电负荷 P_{tin} ;双向有序充放电模式下的电动汽车在第 t 时刻的总负荷 $P_{a,t}$ 为:

$$P_{d,t} = P_{tin} - P_{tout}. \quad (10)$$

考虑电动汽车充放电行为,新的电网日负荷 $P_{a,t}$ 为:

$$P_{a,t} = P_{i,t} + P_{d,t}, \quad (11)$$

式中, $P_{i,t}$ 为原电网在第 t 时刻的总负荷.

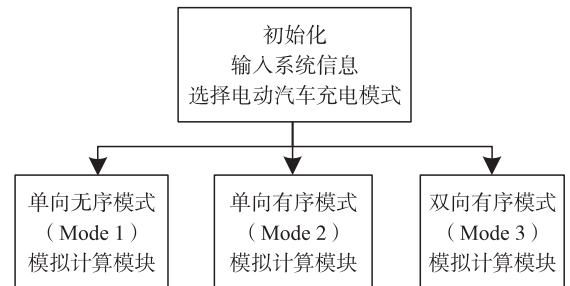


图1 电动汽车日负荷预测模型系统框图

Fig.1 System block diagram of EV's daily load prediction model

采用蒙特卡罗法分别模拟单向无序、单向有序以及双向有序模式下各类电动汽车的充放电行为,从而得到各充放电模式下电动汽车的日负荷曲线。

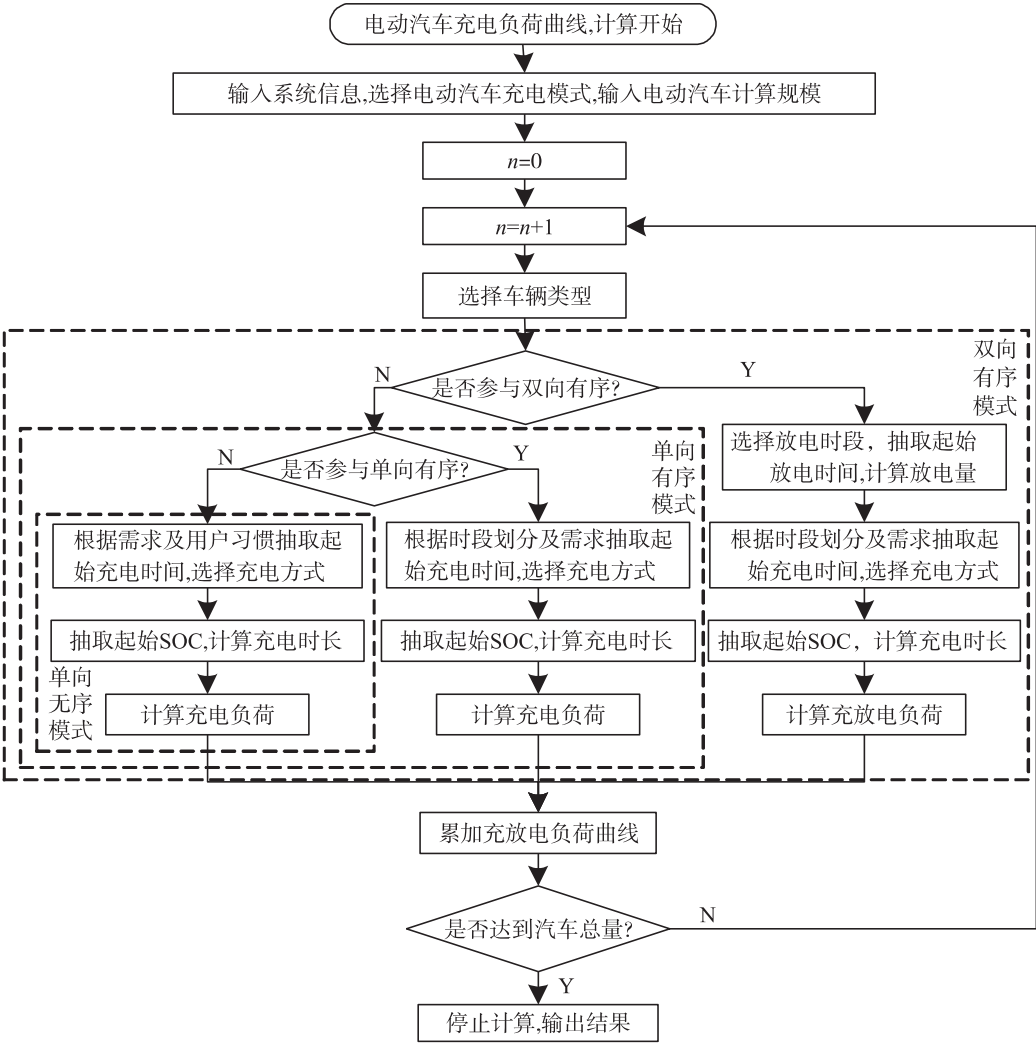


图 2 基于蒙特卡罗法的电动汽车日负荷计算流程图

Fig.2 Flow chart of proposed algorithm based on Monte Carlo simulation

3 电动汽车对电网日负荷曲线的影响分析

3.1 单向无序充电模式下的电网日负荷曲线

单向无序充电模式下,电动汽车充电全天采用统一电价 0.548 元/(kW·h)^[14],依据前文分析给出其充电负荷参数设置如表 2 所示,其电网日负荷曲线如图 3 所示。

3.2 单向有序充电模式下的电网日负荷曲线

单向有序充电模式采用峰谷分时电价机制引导用户充电行为,该地区峰谷时段划分及电价情况^[14]如表 3 所示。

表 2 单向无序充电模式充电负荷参数设置

Table 2 Charging load parameters setting under Mode 1

车辆类型	充电频率(次/天)	充电时段与方式	起始充电 SOC 分布	起始充电时间分布
公交车	2	10:00~20:00 快速充电	$N(0.5, 0.1^2)$	均匀分布
		00:00~06:00 常规充电	$N(0.5, 0.1^2)$	均匀分布
出租车	2	00:00~24:00 快速充电	$N(0.3, 0.1^2)$	均匀分布
公务车	1	18:00~07:00 常规充电	$N(0.4, 0.1^2)$	均匀分布
私家车	1	由起始 SOC、起始充电时间决定, 常规充电	$N(0.6, 0.1^2)$	$N(18, 3^2)$

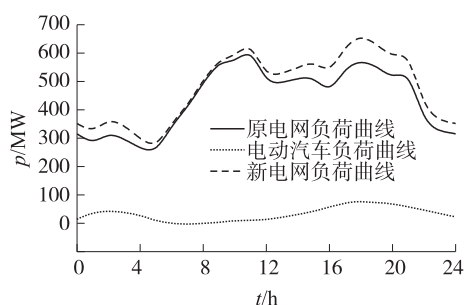


图3 单向无序充电模式下电网典型日负荷曲线

Fig.3 Typical grid daily load curves under Mode 1

充电,40%的用户选择在平时段充电,且在高峰时段到来之前充电完成,其余10%的用户充电行为不受电价机制影响. 综上,单向有序充电模式下,电动汽车充电负荷参数设置如表4所示,其电网日负荷曲线如图4所示.

表4 单向有序充电模式充电负荷参数设置

Table 4 Charging load parameters setting under Mode 2

车辆类型	充电频率/(次/天)	充电时段与方式	起始充电 SOC 分布	起始充电时间分布
公交车	2	10:00-20:00 快速充电	$N(0.5,0.1^2)$	均匀分布
		00:00-06:00 常规充电	$N(0.5,0.1^2)$	均匀分布
出租车	2	除去高峰时段的其余时段,快速充电	$N(0.3,0.1^2)$	均匀分布
公务车	1	21:00-07:00 常规充电	$N(0.4,0.1^2)$	均匀分布
		00:00-08:00(50%)常规充电	$N(0.6,0.1^2)$	均匀分布
私家车	1	12:00-17:00(20%)常规充电	$N(0.6,0.1^2)$	均匀分布
		21:00-24:00(20%)常规充电	$N(0.6,0.1^2)$	均匀分布
		10%用户同单向无序模式	$N(0.6,0.1^2)$	$N(18,3^2)$

3.3 双向有序充放电模式下的电网日负荷曲线

双向有序充放电模式下,可通过与电网的通信使得参与放电的车辆在高峰电价时段进行放电,高峰时段内放电负荷均匀分布,放电速率可调,控制最大放电速率不超过 $0.5 C^{[11]}$,本文取 $0.5 C$. 考虑到目前双向有序充放电模式正处于试验示范阶段,假定只有私家车参与放电,电量上网政府补贴暂定与新能源分布式上网补贴一致,为 0.42 元/(kW·h);参与放电的私家车充电行为仍同单向有序模式,受电价约束,充电行为在放电行为之后,且有10%的用户不参与放电. 考虑到目前双向技术的限制,私家车参与的放电负荷比例较小,送电系数 α 取10%.

该模式下,4类车型的充电参数设置仍同单向有序模式,私家车放电负荷预测参数设置如表5所示,其电网日负荷曲线如图5所示.

通过仿真,可以得出4类电动汽车负荷在单向无序、单向有序以及双向有序3种充放电模式下对电网日负荷曲线的影响数据及充电成本情况,如表6所示.

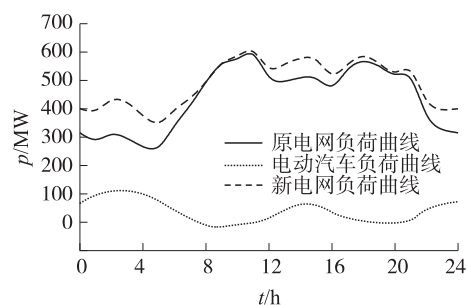


图4 单向有序充电模式下电网典型日负荷曲线

Fig.4 Typical grid daily load curves under Mode 2

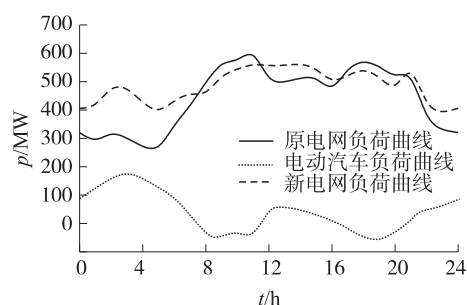


图5 双向有序充放电模式下电网典型日负荷曲线

Fig.5 Typical grid daily load curves under Mode 3

表 5 双向有序充放电模式私家车放电参数设置

Table 5 Discharging parameters setting of private vehicles under Mode 3

车辆类型	放电频率/(次/天)	放电时段	放电速率	起始放电时间分布
私家车	1	08:00–12:00	0.5 C	均匀分布
		17:00–21:00	0.5 C	均匀分布

表 6 中, $M1$ 为计及电动汽车单向无序充电负荷; $M2$ 为计及电动汽车单向有序充电负荷; $M3$ 为计及电动汽车双向有序充放电负荷. 分析图表数据可以看出, 电动汽车无论采用何种充放电模式, 其负荷均会对电网负荷产生一定的影响, 其中, 在单向无序充电模式下, 电动汽车负荷会造成电网峰上加峰现象, 严重影响电网安全稳定运行; 单向有序充电模式可有效实现电动汽车负荷“填谷”, 对平抑电网峰谷差起到一定作用; 双向有序充放电模式则进一步实现了电网负荷“削峰填谷”的目标, 同时, 电动汽车负荷在用电高峰时段向电网反向送电也在一定程度上缓解了高峰时段电网的电力紧张. 从用户经济角度来看, 单向无序充电成本最高, 而选择双向有序充放电则可以实现充电成本最低, 保证用户经济效益最大化.

表 6 不同充放电模式下电网负荷数据及总充电成本

Table 6 Grid load data and general charging costs under each mode

负荷类型		峰值/ MW	谷值/ MW	峰谷差/ MW	峰谷 差率/%	总充电 成本/万元
原电网负荷		590.4	275.2	315.2	53.39	—
新电	$M1$	656.2	286.4	369.8	56.35	53.46
网总	$M2$	605.3	353.7	251.6	41.57	42.92
负荷	$M3$	565.9	389.1	176.8	31.24	33.76

4 结语

本文通过建立各类电动汽车在 3 种充放电模式下的负荷模型, 分析了不同模式下规模化电动汽车入网对电网日负荷曲线的影响. 若对电动汽车充电行为不加以引导, 势必将导致电网日负荷曲线峰谷差率提高, 而通过峰谷分时电价机制引导用户有序充电则能有效降低电网负荷的峰谷差率. 电动汽车作为一种移动储能装置, 若能对其充放电行为进行良好有序地控制, 实现电动汽车的双向有序充放电, 不仅可以更好地平抑电网负荷曲线, 同时还能缓解电力紧张, 并带来一定的经济效益. 目前, 双向有序充放电模式仍在探索试验阶段, 对电动汽车充放电时段、负荷分配等问题的优化是未来研究的重点.

[参考文献](References)

[1] 李瑾, 杜成刚, 张华, 等. 智能电网与电动汽车双向互动技术综述[J]. 供用电, 2010, 27(3): 12–14.
Li Jin, Du Chenggang, Zhang Hua, et al. Summary on the two-way interaction between smart grid and the electric vehicle[J]. Distribution and Utilization, 2010, 27(3): 12–14. (in Chinese)

[2] 钱科军, 周承科, 袁越, 等. 纯电动汽车与电网相互关系的研究现状[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11): 1–7.
Qian Kejun, Zhou Chengke, Yuan Yue, et al. A review of research on the interaction between fully electric vehicles and power systems[J]. Advances of Power System and Hydroelectric Engineering, 2010, 26(11): 1–7. (in Chinese)

[3] 杨健, 王媚, 张屹, 等. 电动汽车动力电池参与电网调峰的应用[J]. 华东电力, 2010, 38(11): 1 685–1 687.
Yang Jian, Wang Mei, Zhang Yi, et al. Applying power battery of electric vehicles for regulating peak in grid[J]. East China Electric Power, 2010, 38(11): 1 685–1 687. (in Chinese)

[4] Mohseni P, Stevie R G. Electric vehicles: holy grail or fool’s gold[C]//Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN: IEEE Conference Publications, 2010: 1–5.

[5] 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. (in Chinese)

[6] 杨冰, 王丽芳, 廖承林, 等. 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.
Yang Bing, Wang Lifang, Liao Chenglin, et al. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22–27, 35. (in Chinese)

[7] Ikegami T, Ogimoto K, Hitoshi Y, et al. Balancing power supply-demand by controlled charging of numerous electric vehicles

- [C]//IEEE International Electric Vehicle Conference(IEVC). Greenville,SC:IEEE Conference Publications,2012.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] Santos A, Meguckin N, Nakamoto H Y, et al. Summary of travel trends:2009 National Household Travel Survey[R]. Springfield:U.S Department of Transportation Federal Highway Administration, 2011.
- [11] 王辉,文福拴,辛建波,等. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报,2011,38(5):17-24.
Wang Hui, Wen Fushuan, Xin Jianbo, et al. Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 17-24. (in Chinese)
- [12] 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论文集. 大连:大连理工大学出版社,2006.
Zhang Dexin, Chen Jinchuan, Liu Ying. Daily travel characteristics and the development strategy of private motor vehicles in Beijing[C]//Proceedings of the 6th International Conference of Transportation Professionals. Dalian:Press of Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [13] 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.
Xie Yinghua, Tan Chunhui, Zhang Xuefeng, et al. Impact of charge & discharge mode of electric automobile on daily load curve of shenzhen power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(12): 47-50, 69. (in Chinese)
- [14] 孙文川. 基于峰谷分时电价政策下的省级电网公司经营风险研究[D]. 长沙:长沙理工大学经济与管理学院,2010.
Sun Wenchuan. The research on bussiness risk of province grid company based on time-of-use price[D]. Changsha:School of Economics & Management, Changsha University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]