

DOI: 10.7667/PSPC160621

## 电动汽车充电站负荷建模研究

胡宇航<sup>1</sup>, 皮一晨<sup>2</sup>, 崔静安<sup>2</sup>, 孙建军<sup>2</sup>

(1. 江苏省电力公司昆山市供电公司, 江苏 昆山 215300; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 电动汽车是汽车行业未来的发展方向, 充电站作为电动汽车的配套服务设施, 其建设也在积极进行。通过仿真分析了基于 PWM 整流+DC/DC 变换器拓扑的单台充电机负荷特性, 得到其负荷特性数学模型。基于该负荷特性利用数学模型进行分析, 对影响充电站负荷的多种随机性因素分别进行了概率建模。在此基础上, 利用蒙特卡罗建模方法, 综合考虑了充电站负荷的各种随机性因素影响, 得到了反应充电站时变性的静态负荷模型并给出了其不同渗透率情况下的日负荷曲线。

**关键词:** 电动汽车; 充电站; 负荷特性; 蒙特卡罗; 负荷建模

### Research on electric vehicle charging station modeling

HU Yuhang<sup>1</sup>, PI Yichen<sup>2</sup>, CUI Jing'an<sup>2</sup>, SUN Jianjun<sup>2</sup>

(1. Kunshan Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Corporation, Kunshan 215300, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The electric vehicle is the future direction of the automotive industry. As the ancillary service facility of electric vehicles, the development of charging station is rapid. Through simulation analysis of single charger's load characteristic based on PWM rectifier + DC / DC converter topology, its mathematical model is obtained. Based on the load characteristics and using the mathematical model, probabilistic modeling of a variety of random factors affecting the charging station loads is carried out respectively. On this basis, using Monte Carlo modeling methods, comprehensively considering the influence of various random factors of charging station load, the static load model reflecting the charging station time-varying characteristics is got and the daily load curves under different permeability are given.

**Key words:** electric vehicles; charging stations; load characteristic; Monte Carlo method; load modeling

## 0 引言

目前环境保护和能源危机问题日益严峻, 电动汽车因其具有环保、节能的优点, 已逐渐成为各国政府和汽车制造商关注的焦点, 充电站作为电动汽车的配套服务设施, 其建设也正在如火如荼进行着。随着电动汽车充电站的大规模建设, 电动汽车的广泛应用会使得负荷需求急剧增加, 当大规模的电动汽车一起充电时, 会造成尖峰负荷, 给当地配电网的安全稳定运行带来极大的威胁。以北京为例, 目前北京的电动汽车保有量有 20 万多辆, 如果一起充电的话, 这些电动汽车的电量需求将占到整个北京用电需求的 4% 左右<sup>[1]</sup>。因而作为未来用电负荷的主要组成成分, 电动汽车充电站的负荷模型在电能的生产及电力系统的经济调度与安全运行方面起着越来越重要的作用。建立符合电动汽车充电站的实际综合负荷模型, 对于电力系统更加科学合理地进行

调度与规划设计、系统静态稳定性研究, 充分挖掘电网供电潜力, 节约电网建设投资以及确保电动汽车充电站安全稳定经济运行等均具有重要且迫切的现实工程意义。然而目前针对充电站的研究, 大部分研究集中在充电站规划设计<sup>[2-4]</sup>, 负荷需求预测<sup>[5-7]</sup>等方面。

本文首先分析了单台充电机负荷特性, 然后采用蒙特卡罗方法, 对多种随机性因素对充电站负荷进行了概率建模, 最后在此基础上, 得到了充电站的一个静态负荷模型。

## 1 单台充电机负荷特性仿真分析

目前常用的充电机有 3 种类型: (1) “不控整流+斩波器”形式; (2) “不控整流+DC/DC 变换器(有高频变压器)”形式; (3) “三相 PWM 整流+隔离 DC/DC 变换器(有高频变压器)”形式。本文以“PWM 整流+DC/DC 变换器”充电机进行负荷特

性分析, 其拓扑如图 1 所示。

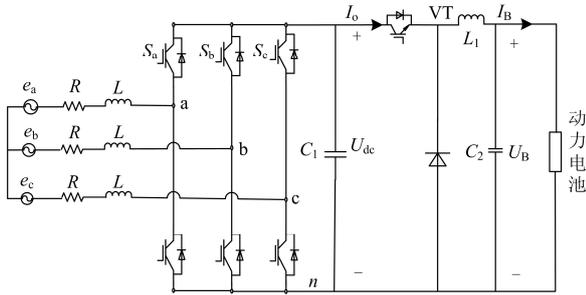


图 1 “PWM 整流+DC/DC 变换器” 结构充电机原理图

Fig. 1 Charger principle of PWM rectifier and DC/DC converter

由文献[8]知, 充电机的 PV 关系可以表示为

$$P = u_B i_B + \frac{2}{3} \left( \frac{R i_B^2 k^2}{S_d^2} \right) \quad (1)$$

$$k = \frac{u_B}{u_{dc}} \quad (2)$$

$$S_d = \frac{E_m \pm \sqrt{E_m^2 - \frac{8}{3} R i_o u_{dc}}}{2u_{dc}} \quad (3)$$

记

$$P_H = u_B i_B \quad (4)$$

$$P_B = \frac{2}{3} \left( \frac{R i_B^2 k^2}{S_d^2} \right) \quad (5)$$

则

$$P = P_H + P_B \quad (6)$$

式中:  $k$  为 DC/DC 电路稳态开关函数;  $S_d$  为稳态时  $dq$  旋转坐标系下的开关函数;  $E_m$  为电网电压峰值。

现通过仿真获取单台充电机负荷特性。利用 Matlab/Simulink 对 100 kW 的充电机搭建仿真模型, 充电机输入电压采用交流 380 V, 整流侧输出直压设定为 900 V, 电池模型采用 Matlab2011b 中的 Battery 模型进行搭建, 整流桥管和 BUCK 电路功率管均采用理想开关管, 设置电池类型为锂离子电池, 标称电压 500 V, 比率容量 500 Ah, 荷电状态可调, 电池内阻为 0.01  $\Omega$ 。仿真模型中动力电池充电采用常见的先恒流限压后恒压限流的充电方式, 控制框图如图 2 所示。

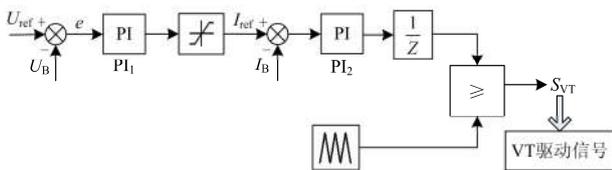


图 2 DC/DC 电路控制框图

Fig. 2 DC / DC circuit control block

本仿真设置恒压限值为 544.5 V, 恒流限值为 200 A, 在 SOC 小于 80%时采用恒流(200 A)充电, 当 SOC 达到 80%时转为恒压(544.5 V)充电直到电池满充。如图 3、图 4 所示。

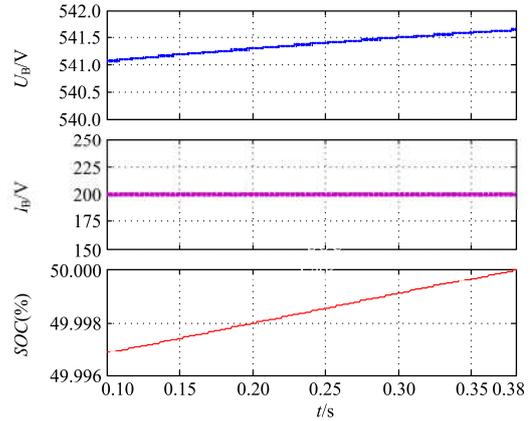


图 3 SOC 在 50%左右变化时电压电流随 SOC 变化曲线

Fig. 3 Voltage and current variation curve with SOC at around 50%

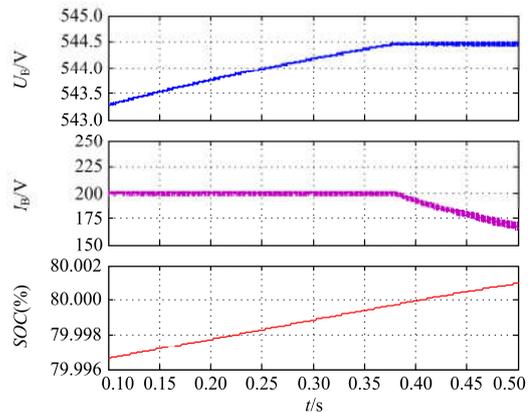


图 4 SOC 在 80%左右变化时电压电流随 SOC 变化曲线

Fig. 4 Voltage and current variation curve with SOC at around 80%

考虑到实际情况, 电动汽车不会在电池 SOC=0%去充电, 大部分动力电池在 SOC 低于 20% 时, 就不能稳定工作且效率下降<sup>[9]</sup>, 而且考虑到充电时间限制, 客户每次给电动汽车充电也不会充满 (SOC=100%), 故本次研究假设电动汽车充电时 SOC 处于 20%~90%。

根据上面推导的单台充电机负荷特性数学模型, 即式(4), 可知, 充电机输入功率  $u_B i_B$  部分与系统电压无关, 而且  $u_B, i_B$  受电池初始荷电量 SOC 及其内部阻抗的影响, 因此  $P_H$  采用如下方法获取:

- (1) 选取 10 组 SOC;
- (2) 对应不同的 SOC 值通过仿真测取对应的  $U_d,$

$I_d$  值, 然后求出与  $U_d, I_d$  对应的  $P_H$  值;

(3) 计算  $P_H$  的平均值  $\bar{P}_H$ 。

由式(5)可知,  $P_B$  随系统电压变化而变化, 而系统电压的变化不影响整流输出侧直压, 也即不影响  $P_H$ , 故  $P_B$  的获得采用如下方法:

(1) 选取 9 组变化的系统电压(系统电压  $U$  从  $0.7U_n \sim 1.5U_n$ , 以  $0.1U_n$  递增);

(2) 以  $0.7U_n$  为例, 分别根据不同的 SOC 值(从 10%~100%, 以 10%递增, 共 10 组)计算出对应于  $0.7U_n$  的  $P_B$ , 最后计算  $P_B$  的平均值  $\bar{P}_B$ 。

(3) 以此求出  $\bar{P}_{B1} \sim \bar{P}_{B9}$ 。

仿真过程中改变系统电压和电池的荷电状态来记录电池充电过程的负荷特性变化情况, 可得仿真结果如表 1 所示。其中  $P_n$  为额定电压时充电机输入功率。

表 1 仿真结果数据表格

Table 1 Data table of simulation result

$\frac{U}{U_n}$	$\frac{\bar{P}_H}{P_n}$	$\frac{\bar{P}_{B_i}}{P_n}$ ( $i=1\sim 9$ )
0.7	0.907 230 197	0.260 260 563
0.8	0.909 379 231	0.169 531 985
0.9	0.906 475 73	0.121 528 146
1.0	0.906 554 888	0.093 445 112
1.1	0.908 711 911	0.074 394 331
1.2	0.907 843 83	0.060 551 363
1.3	0.906 548 28	0.050 345 302
1.4	0.907 441 433	0.042 844 821
1.5	0.908 547 93	0.036 922 025

经过曲线拟合工具, 可得单台充电机负荷特性曲线如图 5 所示。

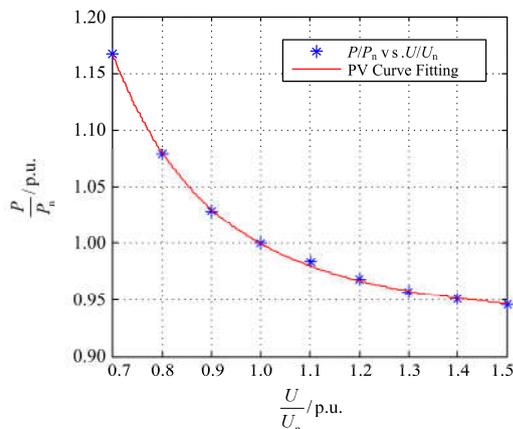


图 5 充电机负荷特性拟合曲线

Fig. 5 Charger load characteristic curve fitting

表达式为

$$\frac{P}{P_n} = 0.9285 + 0.07105 \left( \frac{U}{U_n} \right)^{-3.391} \quad (7)$$

式(7)分为恒功率部分和随系统电压变化部分, 由文献[10], 可以按功率比例可求出其静态特性系数为

$$p_u = -0.241 \quad (8)$$

可得单台充电机负荷特性曲线为

$$P = P_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{-0.241} \quad (9)$$

由式(9)可知, 充电机的功率变化对系统电压有一定的影响, 当充电机功率需求增加时, 其节点输入电压下降, 简单地把充电机负荷作为恒功率负荷将存在准确性不足的问题, 故研究系统暂态稳定性等问题时, 要综合考量充电机负荷的电压特性, 这样才能得到负荷实际的研究效果。

## 2 充电站负荷建模随机因素概率模型

在上节对单台充电机负荷特性分析的基础上, 为考虑充电站负荷的时变性, 某时刻充电站的在充车辆数目便成为了充电站负荷建模的关键所在。而某时刻充电站的在充车辆数目主要受到车辆进站数量、车辆进站时刻、车辆充电时长等随机性因素影响, 下面将对以上随机因素逐一进行概率建模。

### 2.1 车辆进站数量概率模型

电动汽车到充电站进行充电的过程是一个随机服务过程, 站内充电机和进站充电的电动汽车构成了一个随机服务系统, 对于随机服务系统, 满足以下 3 个条件的输入称为最简单流<sup>[11]</sup>。

(1) 平稳性: 在某个时间间隔  $[a, a+t]$  内到达  $k$  个顾客概率与间隔起始时间  $a$  无关, 而只与间隔时间长短  $t$  以及到达顾客数量  $k$  有关, 记此概率为  $U_k(t)$ 。

(2) 无后效性: 没有时间重叠的时间间隔内顾客到达数量是相互独立的。

(3) 有限性: 任意时间长度有限的时间间隔到达有限个顾客的概率为 1, 也即  $\sum_{k=0}^{\infty} U_k(t) = 1$ 。

对于最简单流, 长为  $t$  的时间间隔内到达  $k$  个顾客的概率  $U_k(t)$  服从泊松分布, 即

$$U_k(t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

式中,  $\lambda > 0$  为一常数。

电动汽车进站充电的行为很明显满足最简单流的 3 个条件, 因此, 电动汽车依次抵达充电站的

行为可用泊松过程描述。记  $N$  为时间间隔  $[t, t + \Delta t]$  内到达充电站的车辆数目, 则  $N \sim P(\lambda)$ , 且

$$P\{N = k\} = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

### 2.2 车辆进站时刻概率模型

令第  $i$  车到达的时刻为  $\tau_i (i=1, 2, \dots)$ ,  $\tau_0=0$ , 并令  $\xi_i = \tau_i - \tau_{i-1}, i=1, 2, \dots$  则相继到达车辆时间间隔  $\xi_i (i=1, 2, \dots)$  为相互独立、相同分布的随机变量。

可以证明相继车辆到达时间间隔服从指数分布, 即

$$T(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\lambda$  为车辆进站间隔指数分布参数, 显然其同时为进站车辆数量服从泊松分布参数。

在知道了相继车辆到达时间间隔分布以后, 可通过式(13)计算车辆进站时刻。

$$\begin{cases} \tau_i \equiv \xi_i + \tau_{i-1}, i = 1, 2, \dots \\ \tau_0 \equiv 0 \end{cases} \quad (13)$$

考虑到用户到充电站充电行为具有明显的高峰和低谷期<sup>[12]</sup>, 选取某中心区域充电站进行连续 100 天的车辆进站数量统计, 可得不同渗透率情况下, 进站数量和进站时刻概率模型参数如表 2 所示。

表 2 充电站各时段进站车辆均值

Table 2 Charger station average vehicle of each time

时段	进站车辆均值	
	渗透率 20%	渗透率 39%
23:00~06:59	19.76	38.53
07:00~08:59	22.45	43.78
09:00~11:59	12.40	24.19
12:00~13:59	28.17	54.93
14:00~16:59	16.28	31.74
17:00~18:59	33.87	66.04
19:00~20:59	17.60	34.31
21:00~22:59	37.57	73.26

### 2.3 车辆充电时长概率模型

充电时长极大程度上受进站车辆的动力电池的剩余荷电量(SOC)决定<sup>[13]</sup>。车剩余电量又与车辆载重、行车距离、路况及驾驶操作等诸多随机因素有关, 由于剩余荷电量的各不相同, 使得在相同充电设施上的充电时间有长有短, 而如果考虑充电设施不一致的情况, 则充电时长将会受到更多随机因素的影响, 文献[14]通过概率统计规律描述充电时长, 其认为充电时长近似服从  $N(\mu_c, \sigma^2)$  的正态分布, 也即充电时长可表示为

$$F(T_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(T_c - \mu_c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (14)$$

式中:  $T_c$  为充电时长随机变量;  $\mu_c$  为充电时长均值, 取  $\mu_c=17.5$ ;  $\sigma$  为充电时长标准差, 取  $\sigma=6.57$ 。

## 3 基于蒙特卡罗方法的充电站负荷建模流程

### 3.1 充电站负荷建模假设条件

- (1) 站内充电机类型一致;
- (2) 不考虑电动汽车种类和动力电池类型对充电功率的影响;
- (3) 车辆进站即进行充电, 车辆达到满充即离开充电站。

### 3.2 充电站在充车辆计算流程图

充电站在充车辆数目计算流程如图 6 所示。

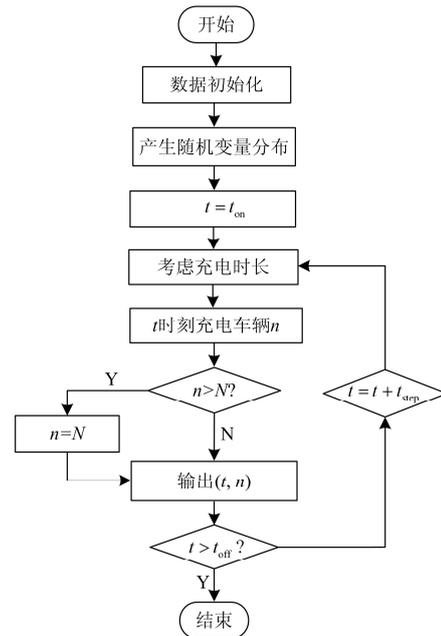


图 6 充电站在充车辆蒙特卡罗流程图

Fig. 6 Monte Carlo flowchart of vehicle in charging stations

计算过程仿真步长取  $10 \text{ min}$ <sup>[15-19]</sup>, 按表 2 分 8 个时间段分别计算, 以时间段 07:00~08:59 为例, 计算结果如表 3、表 4 所示。

令

$$S_2 = [(n_{2,1}, t_{2,1}), (n_{2,2}, t_{2,2}), \dots, (n_{2,12}, t_{2,12})]$$

其中,  $t_{2,1} \sim t_{2,12}$  依次表示表格 3 中按仿真步长递增的 12 个时间点,  $n_{2,1} \sim n_{2,12}$  为对应时间点  $t_{2,1} \sim t_{2,12}$  的充电站在充车辆数量。

表 3 20%渗透率下充电站在充车辆离散数表

Table 3 Discrete number of vehicle in charging stations below 20% penetration

$t$	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00
$n$	3	3	0	1	4	5
$t$	08:10	08:20	08:30	08:40	08:50	09:00
$n$	5	6	8	3	2	4

表 4 39%渗透率下充电站在充车辆离散数表

Table 4 Discrete number of vehicle in charging stations

below 39% penetration

$t$	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00
$n$	5	4	5	9	7	4
$t$	08:10	08:20	08:30	08:40	08:50	09:00
$n$	7	3	8	11	8	4

令

$$I_2 = [(n_{2,1}^*, t_{2,1}^*), (n_{2,2}^*, t_{2,2}^*), \dots, (n_{2,12}^*, t_{2,12}^*)]$$

其中:  $t_{2,1}^* \sim t_{2,12}^*$  依次表示表 4 中按仿真步长递增的 12 个时间点;  $n_{2,1}^* \sim n_{2,12}^*$  为对应时间点  $t_{2,1}^* \sim t_{2,12}^*$  的充电站在充车辆数量。

同理可得其他时间段不同渗透率情况下充电站在充车辆数量。

根据仿真数据, 可得电动汽车 20% 渗透率情况, 充电站日负荷曲线如图 7 所示。

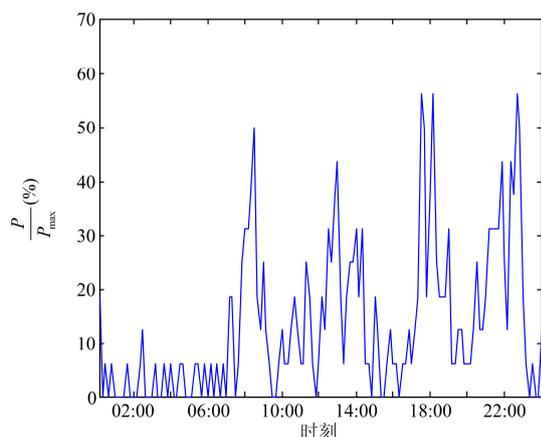


图 7 电动汽车 20% 渗透率情况下电动汽车充电站有功功率日负荷曲线

Fig. 7 Active daily load curve of electric car charging stations at 20% penetration rate case

电动汽车 39% 渗透率情况下, 充电站日负荷曲线如图 8 所示。

以上负荷数据及曲线为相关部门提供了一定数据参考和理论依据。

### 3.3 充电站负荷模型

利用蒙特卡罗仿真得到了充电站各时间段在充车辆数目随时间变化的关系, 结合单台充电机负荷模型  $P = P_n (U/U_n)^{-0.241}$ , 充电站的负荷模型如下所述。

(1) 20% 电动汽车渗透率情况下

令

$$S = [S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8]$$

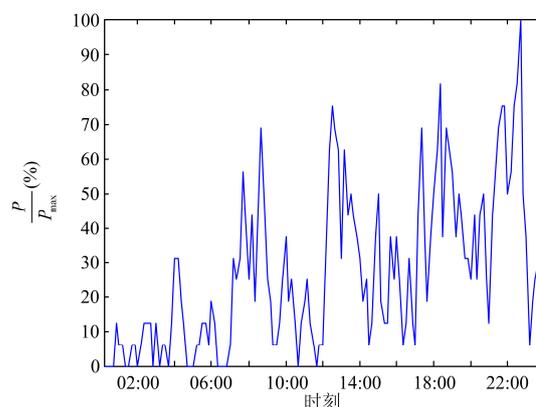


图 8 电动汽车 39% 渗透率情况下电动汽车充电站有功功率日负荷曲线

Fig. 8 Active daily load curve of electric car charging stations at 39% penetration rate case

其中,  $S_1 \sim S_8$  为蒙特卡罗仿真结果定义的 20% 电动汽车渗透率情况下各时间段矩阵。

则 20% 电动汽车渗透率情况下考虑充电站负荷时变性的充电站站负荷模型为

$$P = sP_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{-0.241} \quad (15)$$

(2) 39% 电动汽车渗透率情况下

令

$$I = [I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8]$$

其中,  $I_1 \sim I_8$  为蒙特卡罗仿真结果定义的 39% 电动汽车渗透率情况下各时间段矩阵。

则 39% 电动汽车渗透率情况下考虑充电站负荷时变性的充电站站负荷模型为

$$P = lP_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{-0.241} \quad (16)$$

该充电站负荷模型考虑了充电站负荷的时变性, 对研究充电站负荷接入以及其随机波动对配电网的影响具有重大意义。

## 4 结论

本文旨在进行充电站的负荷模型, 主要得到以下结论: (1) 对单台充电机进行了负荷特性分析, 并得到其负荷特性数学模型; (2) 对影响充电站负荷建模的随机性因素进行了概率建模; (3) 基于蒙特卡罗方法, 综合考虑了充电站负荷的各种随机性因素影响, 得到了反映充电站时变性的静态负荷模型以及不同渗透率情况下的日负荷曲线, 为相关部门提供了数据参考和理论依据。

参考文献

[1] WANG Z P, SUN F C, LIN C. Forecasting and simulation of the distribution capacity of E-bus charge station[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(12): 1061-1064.

[2] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 65-73.  
WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 65-73.

[3] 杨玉青, 苏栗, 姜久春, 等. 改善配电网符合特性的充电站有序充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 60-66.  
YANG Yuqing, SU Su, JIANG Jiuchun, et al. Dynamic optimizing strategy of coordinated charging to improve the load characteristics of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 60-66.

[4] 蔡驥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.  
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.

[5] 张威, 施伟锋, 胡红钱. 船舶区域配电系统全智能体重构及其优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 9-15.  
ZHANG Wei, SHI Weifeng, HU Hongqian. Research on agent based reconfiguration and its optimization for shipboard zonal power systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 9-15.

[6] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.  
DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.

[7] 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.

[8] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.  
CAO Nan, LI Gang, WANG Dongqing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.

[9] 郑亮宏, 戴梦婷, 张曼, 等. 住宅区式电动汽车充电站负荷集聚特性及其建模[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 32-38.  
ZHENG Jinghong, DAI Mengting, ZHANG Man, et al. Load cluster characteristic and modeling of EV charge station in residential district[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 32-38.

[10] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-145.  
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-145.

[11] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122.  
LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.

[12] 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.

[13] DHARMAKEERTHI C H, MITHULANANTHAN N, SAHA, T K. Modeling and planning of EV fast charging station in power grid[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012: 1-8.

[14] DAS T, ALIPRANTIS D C. Small-signal stability analysis of power system integrated with PHEVs[C] // Energy 2030 Conference, Atlanta, GA, USA, 2008: 1-4.

[15] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 85-196.

[16] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学出版社, 1985: 230-232.

[17] 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.  
YANG Shaobing, WU Mingli, JIANG Jiuchun, et al. An approach for load modeling of electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1190-1195.

[18] 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): 1-7.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-7.

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-07-18

作者简介:

胡宇航(1977-), 男, 工学硕士, 工程师, 高级技师, 研究方向为变、配电检修与运行管理;

皮一晨(1994-), 男, 通信作者, 工学硕士, 研究方向为微电网建模研究与数字物理混合仿真; E-mail: 479441357@qq.com

崔静安(1990-), 男, 工程硕士, 研究方向为微电网建模研究与电力系统分析。

(编辑 姜新丽)