

考虑用户行为特性的电动乘用车 充电负荷建模

考虑电动汽车用户充电行为的不确定性,选取充电起始时间和充电持续时间作为影响充电负荷时间分布的关键因素,建立电动汽车充电负荷的时间分布模型。在空间分布上,对充电负荷区域进行划分,并与时间分布模型结合,建立电动汽车充电负荷的时空分布综合模型。通过算例分析,研究电动汽车充电负荷对电网日负荷预测的影响及其对局部配电网稳定运行的影响,并提出了两点关于电动汽车充电设施规划布局的建议。

曾 爽¹ 陈海洋² 刘秀兰¹ 李香龙¹ 焦东升¹/1.国网北京市电力公司电力科学研究院 2.国网北京市电力公司

0 引言

近年来,世界各国都在大力发展电动汽车,我国更是将其列为七大战略性新兴产业之一。电动汽车的发展是我国减少石油消耗和降低二氧化碳排放的重要举措之一,而其中纯电动汽车的发展更被认为是汽车工业的未来^[1]。

随着电动汽车的普及,电动汽车大规模接入电网充电,将对电力系统的规划与运行产生不可忽视的影响^[2]。一方面,电动汽车充电将导致负荷增长,若大量电动汽车集中在负荷高峰期充电,将进一步加剧电网负荷峰谷差,增加电网负担;另一方面,电动汽车用户充电时间与空间分布的不确定性,将加大电网控制的难度^[3]。因此,开展电动汽车充电负荷的时空分布及其对电网影响的研究具有重要意义。

文献[4-5]研究电动汽车对配电系统负荷、网络损耗和电压的影响,未考虑电动汽车充电负荷在时间和空间上的不确定性;文献[6]以丹麦为背景,考虑用

户日常驾车模式及充电模式,对电动汽车充电负荷特性作了初步分析,采用蒙特卡洛仿真研究了电动汽车在不同普及程度、电价条件和季节下对配电系统的影响;文献[7]通过对不同类型电动汽车充电行为在时间和空间上的差异分析,确定配电网中各类电动汽车的比重,再结合电动汽车充电负荷的蒙特卡洛模拟,建立电动汽车对配电网负荷影响的评估方法;文献[8]在一定假设条件下,根据燃油车的统计数据,考虑了部分随机因素的概率分布,建立了电动汽车功率需求的统计模型;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。上述文献在电动汽车开始充电时间、日行驶里程和动力电池SOC等方面作了不同程度的假设,或者以燃油车统计数据作为支撑,并以此为前提进行分析论述,这可能与实际电动汽车用户的充电行为和驾驶习惯并不相符。

本文考虑了电动汽车充电负荷的不确定性,建立电动汽车充电负荷的时间分布模型;对用户驾车行为空间进行划分,建立电动汽车充电负荷的时空分布模型;最后,通过实例分析不同时空分布情况下的电动汽车负荷对电网产生的影响。

1 电动汽车充电负荷的不确定性

影响电动汽车充电需求的因素主要包括动力电池、充电设施和用户行为3个方面^[9]。动力电池的容量影响用户的充电



曾 爽/工程师

关键词/Keywords

电动汽车·
不确定性·
时空分布·
综合模型·
稳定运行·

频率；充电设施的等级、分布和配置比例影响用户充电频率和充电功率^[10]；用户行为的随机性是导致电动汽车充电负荷不确定性的关键因素^[11]。电动汽车充电负荷的时间不确定性主要体现在起始充电时间的不确定性和充电持续时间的不确定性两个方面。这两个方面的累积效应决定了电动汽车充电负荷在时间上的分布；而充电负荷在空间上的分布主要依赖于充电设施的规划和布局。

考虑到公共服务车辆（公交车、环卫车等）负荷的充电需求较为固定，乘用车负荷的充电需求不确定性程度较高^[12]，因此，以乘用车作为本文的研究对象。

2 电动汽车充电负荷的时间分布

按照充电需求，电动汽车用户可选择交流和直流两种充电方式进行充电。对于SOC为0的动力电池来说，采用1~5 C充电倍率的直流快速充电，在SOC达到100%时充电时间在1 h以内；而采用0.1~0.3 C充电倍率的交流充电，在SOC达到100%时充电时间为3~10 h。

定义第1类充电行为为 S_1 ：无充电时长约束，用户充电过程持续较长至电池充满；定义第2类充电行为为 S_2 ：有充电时长约束，用户充电过程的结束具有随机性^[13]。居民小区的交流充电桩由车企给用户配置，并且居民小区停车场和单位自有停车场不受交流慢充的时间约束，能够持续较长充电时间至电池充满，因此，将其归为第1类充电行为；公用停车场通常交流和直流充电设施并存，并且用户充电结束时间具有随机性。因此，将商场超市等公用停车场充电的行为归为第2类充电行为。充电行为架构定义如图1所示。

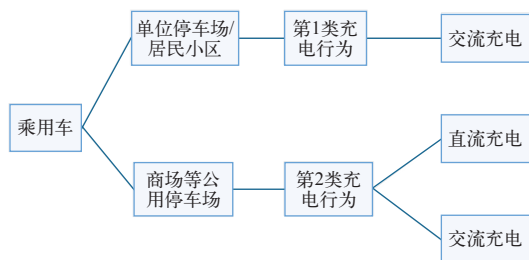


图1 用户充电方式选择架构

定义电动乘用车用户充电方式为随机变量 J ，采用交流充电方式取值为1，采用直流充电方式充电取值为0；定义用户充电行为为随机变量 S ，第1类充电行为取值为1，第2种充电行为取值为0，则

$$P(J=1) = P(S=1) + \eta P(S=0) \quad (1)$$

$$P(J=0) = (1-\eta)P(S=0) \quad (2)$$

$$P(S=1) = P(t_c \geq T_0) \quad (3)$$

$$P(S=0) = P(0 < t_c < T_0) \quad (4)$$

式中， t_c 为充电持续时间； η 为充电方式随机因子，与 T_0 有关； T_0 为时间常数，是界定第1类和第2类充电行为的时间边界。

设 T_D 为最大充电持续时间，依据目前交流慢充电倍率，取 T_D 为10。令 $\eta = (e^{kT_0} - 1)\varepsilon(T_0)$ ， $\eta(T_D) < 1$ 且 $T_0 < T_D$ ， k 为在区间 $(0, (\ln 2)/T_D)$ 内的随机数， $\varepsilon(T_0)$ 为单位阶跃函数。且 η 满足

$$\eta = P(J=1|S=0) \quad (5)$$

由式(1)~式(5)可以分别得到充电方式被采用的概率，即

$$P(J=1) = P(t_c \geq T_0) + \eta P(0 < t_c < T_0) \quad (6)$$

$$P(J=0) = (1-\eta)P(0 < t_c < T_0) \quad (7)$$

将充电过程近似为恒功率特性，定义交流充电功率为 P_j ，直流充电功率为 P_z 。根据充电方式的概率分析，电动汽车充电功率期望 P_c 应满足

$$P_c = P(J=1)P_j + P(J=0)P_z = P_j[P(t_c \geq T_0) + \eta P(0 < t_c < T_0)] + P_z(1-\eta) \quad (8)$$

定义电动汽车在某一时刻 t_i 充电状态为随机变量 ε_i 。 $\varepsilon_i=1$ 表示处于充电状态； $\varepsilon_i=0$ 表示未处于充电状态^[6]。随机变量 ε_i 的概率满足

$$P(\varepsilon_i=0) = F_{sc}(t_s + t_c < t_i) + F_{sc}(t_s > t_i, t_s + t_c < t_i + 24) \quad (9)$$

$$P(\varepsilon_i=1) = 1 - P(\varepsilon_i=0) \quad (10)$$

式中， F_{sc} 为充电起始时间和充电持续时间的联合分布函数。

假设充电起始时间与充电持续时间相互独立，则 $F_{sc} = F_s F_c$ 。

由式(8)~式(10)可以得到在时刻 t_i 单辆电动汽车充电负荷 $P_i = P_c \varepsilon_i$ 及其概率分布，即

$$P(P_i=0) = P(\varepsilon_i=0) \quad (11)$$

$$P(P_i=P_c) = P(\varepsilon_i=1) \quad (12)$$

假设一天之内需要充电的电动汽车规模为 n ，每辆电动汽车平均每天补一次电，且电动汽车充电负荷之间为独立的同分布随机变量，则由大数定律可认为， n 辆电动汽车的充电负荷期望收敛于单辆电动汽车充电负荷的 n 倍，即

$$\mu_n = n\mu \quad (13)$$

式中， μ 为单辆电动汽车的充电负荷期望，可由式(1)~式(12)求出； μ_n 为 n 辆电动汽车的充电负荷期望。

3 电动汽车负荷的时空概率分布模型

根据图1，将乘用车充电负荷所在空间区域划分为单位/居民小区和商场等公用停车场两类，分别定义为第1类区域和第2类区域^[14]。第1类区域的电动汽车采用交流方式充电；第2类区域的电动汽车随机地采用交流和直流方式充电。第1类区域和第2类区域电动汽车充电功率期望分布为

$$P_{c1} = P_j \quad (14)$$

$$P_{c2} = (1-\eta)P_z + \eta P_j \quad (15)$$

在时刻 t_i 单辆电动汽车充电负荷的概率分布如式(16)、式(17)。 ε_{1i} 、 ε_{2i} 分别为时刻 t_i 第1类区域和第2类区域电动汽车充电状态变量，值为1表示处于充电状态，值为0表示未处于充电状态，对应概率可由式(9)、式(10)计算得到，即

$$P(P_{1i} = P_{c1}) = P(\varepsilon_{1i} = 1) \quad (16)$$

$$P(P_{2i} = P_{c2}) = P(\varepsilon_{2i} = 1) \quad (17)$$

根据式(3)、式(4)、式(9)和式(10)可得到第1类区域和第2类区域内电动汽车充电负荷数量分别满足

$$N_1 = P(S=1)N / P(\varepsilon_i = 1) \quad (18)$$

$$N_2 = P(S=0)N / P(\varepsilon_i = 1) \quad (19)$$

由此可以得到第1类区域和第2类区域充电负荷期望分别为

$$\mu_{n1} = n_1\mu_1 \quad (20)$$

$$\mu_{n2} = n_2\mu_2 \quad (21)$$

式中， μ_1 、 μ_2 为第1类区域和第2类区域单辆电动汽车的充电负荷期望，可由式(14)~式(17)求出； μ_{n1} 、 μ_{n2} 分别为第1类区域和第2类区域电动汽车的充电负荷期望。

4 算例分析

4.1 充电起始时间和充电持续时间

选取15辆北汽新能源E150EV纯电动乘用车车载终端记录的5个月车载信息作为本文的数据源。假设电动汽车充电过程中功率恒定，交流充电功率为7 kW，直流充电功率为37.5 kW。取一天内的整点时刻作为用户充电起始时间的度量尺度，计算用户起始充电时间在各个整点区间内的概率，如表1所示。计算时，将 $[n, n+1)$ 时间段内开始的充电事件归为时刻 n 发生的事件， n 取 $[1, 23]$ 区间内的整数。数据源中充电持续时间 T 分布于半开区间 $T \in (0, 10]$ 内。取 $(0, 10]$ 区间内的整数作为充电持续时间的度量尺度，计算充电持续时间在各个时间刻度上的概率，如表2所示。

表1 充电起始时间

时刻	1	2	3	4	5	6
概率	0	0	0	0	0	0.005 0
时刻	7	8	9	10	11	12
概率	0.049 8	0.213 9	0.094 5	0.079 6	0.104 5	0.069 7
时刻	13	14	15	16	17	18
概率	0.059 7	0.054 7	0.059 7	0.054 7	0.084 6	0.014 9
时刻	19	20	21	22	23	24
概率	0.029 9	0.005 0	0.010 0	0.005 0	0.005 0	0

表2 充电持续时间

时间	1	2	3	4	5
概率	0.242 4	0.203 5	0.069 3	0.095 2	0.186 1
时间	6	7	8	9	10
概率	0.073 6	0.069 3	0.034 6	0.026 0	0

根据中心极限定理，将用户充电起始时间和充电持续时间均采用双峰高斯分布概率密度函数进行拟合，即

$$f(x) = a_1 \exp[-(\frac{x-b_1}{c_1})^2] + a_2 \exp[-(\frac{x-b_2}{c_2})^2] \quad (22)$$

式中， a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 和 c_2 均为待拟合参数。

定义充电起始时间概率密度函数为 $f_s(t_s)$ ，通过高斯分布拟合得到概率密度曲线如图2所示。其中， $a_{s1} = 0.176 7$ ， $b_{s1} = 8.101$ ， $c_{s1} = 0.752 1$ ； $a_{s2} = 0.079 3$ ， $b_{s2} = 12.6$ ， $c_{s2} = 5.591$ 。

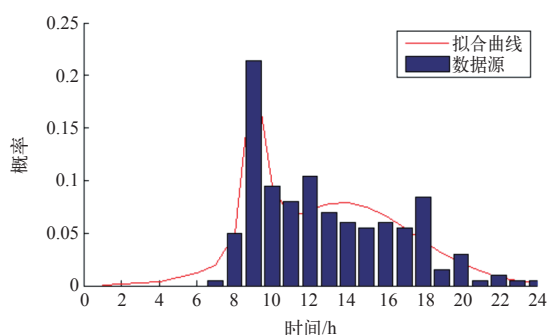


图2 充电起始时间概率密度

定义充电持续时间概率密度函数为 $f_c(t_c)$,通过高斯分布拟合得到概率密度曲线如图3所示。其中, $a_{e1}=0.426\ 2$, $b_{e1}=1.452$, $c_{e1}=0.590\ 4$; $a_{e2}=0.143\ 3$, $b_{e2}=4.953$, $c_{e2}=2.189$ 。

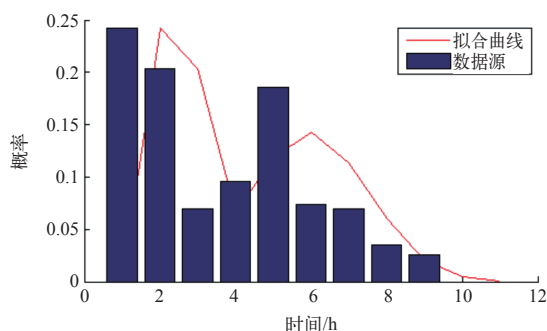


图3 充电持续时间概率密度

由图2可知,充电起始时间主要集中于7:00~19:00。在8:00用户开始为电动汽车充电的可能性最大,这与当前北京地区电动汽车及其充电设施发展条件下的用户充电行为相符。通常,用户在8:00左右到达单位之后即为电动汽车充电;现阶段,由于居民小区内的充电桩建设滞后,用户下班回到家之后(19:00之后),为电动汽车充电的机会偏低。因此,认为第1类区域充电起始时间的概率密度满足式(22)中第一个高斯分布,其充电起始时间集中于8:00~10:00。第2类区域充电起始时间的概率密度满足式(22)中第2个高斯分布。由图3可知,充电持续时间主要集中于1 h以内和5~7 h之间。

4.2 充电负荷时间分布特性

采用式(14)电动汽车时间分布模型,分析电动汽车充电负荷对典型日负荷特性的影响。选取某地区2013年夏季的最大日负荷曲线作为研究对

象。分别选取 $n=10\ 000$ 、 $n=50\ 000$ 和 $n=100\ 000$ 时的电动汽车充电负荷和日负荷曲线,如图4、图5所示。

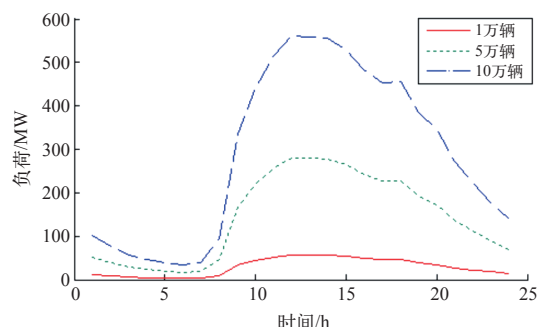


图4 电动汽车充电负荷

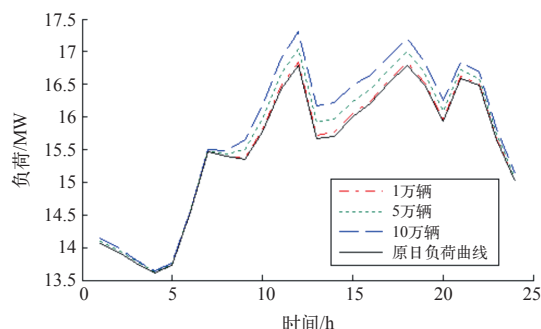


图5 电动汽车充电负荷对电网负荷的影响

由图4、图5可以看出,在现有充电设施建设布局和用户行为导向下,随着电动汽车规模的增长,电动汽车充电负荷与日负荷曲线呈正相关关系,即电动汽车负荷提高了日负荷高峰时段的峰值,而且对于日负荷峰谷差没有明显的改善作用^[15]。这是因为目前电动汽车用户在用电负荷高峰时段,通过单位或其他公共停车场为电动汽车充电;而在深夜至次日凌晨,由于缺乏私人充电设施,为电动汽车充电的可能性较小。

4.3 充电负荷时空分布特性

采用式(20)、式(21)电动汽车时空分布模型,基于图6所示的IEEE 33节点系统,分析电动汽车负荷对配电网稳定运行的影响。系统容量为 $3.715\ \text{MV}\cdot\text{A}$,系统负荷为 $1\ \text{MV}\cdot\text{A}$,电压等级为 $110\ \text{kV}/10\ \text{kV}$ 。充电设施规划于节点7、节点13、节点21、节点23和节点29。

(1) 初始条件

电动汽车负荷未接入系统,计算系统的潮流

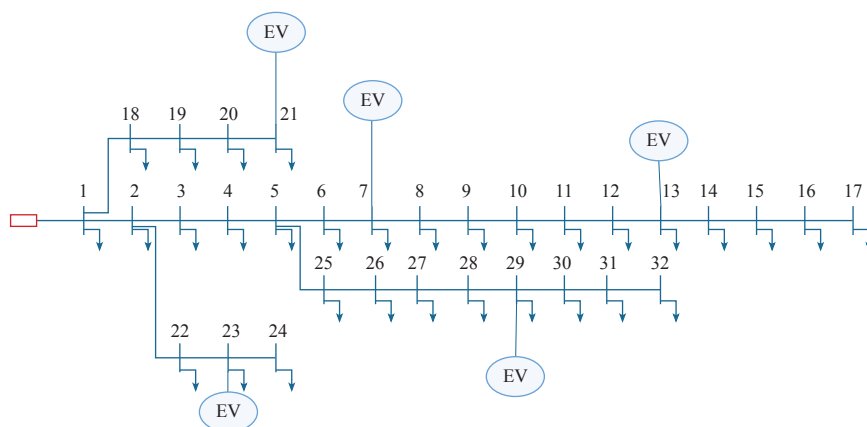


图6 IEEE 33节点系统图

分布得到的部分节点电压标么值如表2所示。

表2 初始条件

节点	1	7	13	17
电压(pu)	0.998 8	0.976 9	0.966 6	0.964 3
节点	21	23	29	32
电压(pu)	0.996 4	0.988 6	0.968 0	0.965 8

为便于分析，定义电动汽车渗透率为

$$r_p = \frac{Pn}{S} \quad (23)$$

式中， P 为单台电动汽车充电功率的期望； n 为一天内实际接入系统的电动汽车负荷数量； S 为系统容量。

(2) 计算条件1

假定所在配电网区域为第1类区域，电动汽车负荷平均分配于5个节点上。计算电动汽车渗透率分别为20%、50%和90%时系统节点的最大电压偏差，计算结果如表3所示。

表3 第1类区域的计算结果

渗透率(%)	最大电压偏差(%)	发生节点	发生时间
20	1.547	17	10: 00
50	3.948	17	10: 00
90	7.309	17	10: 00

最大电压偏差出现在10:00时节点17上。在第1类区域内，10:00为电动汽车充电负荷最大的时刻。由表3可以看出，当渗透率为90%时，节点电压偏差为7.309%，超出电压偏差的国标范围

±7%，系统处于非正常运行状态。目前此区域内的用户过于依赖单位附近的充电设施，用户充电行为较为集中。

(3) 计算条件2

假定所在配电网区域为第2类区域，电动汽车负荷平均分配于5个节点上。计算电动汽车渗透率分别为20%、50%和90%时系统节点的最大电压偏差，计算结果如表4所示。

表4 第2类区域的计算结果

渗透率(%)	最大电压偏差(%)	发生节点	发生时间
20	0.735	17	14: 00
50	1.856	17	14: 00
90	3.384	17	14: 00

最大电压偏差出现在14:00时节点17上。在第2类区域内，14:00为电动汽车充电负荷最大的时刻。由表4可以看出，此区域内的电动汽车负荷虽然对系统运行有一定的影响，但能够保证系统的正常稳定运行。这与该区域内用户充电行为较为分散的特征有关。

(4) 计算条件3

假定节点7、节点13所在区域为第1类区域，节点21、节点23和节点29所在区域为第2类区域，计算电动汽车渗透率分别为20%、50%和90%时系统节点的最大电压偏差和网损率，计算结果如表5所示。

最大电压偏差出现在12:00节点32上。第1类区域和第2类区域的电动汽车在12:00同时充电的

表5 第1、2类混合区域的计算结果

渗透率(%)	最大电压偏差(%)	发生节点	发生时间
20	0.516	32	12: 00
50	1.288	32	12: 00
90	2.300	32	12: 00

概率最高。电压偏差的响应为两区域内的电动汽车充电负荷激励叠加的结果。

对比表3~表5可知，在同一配电网系统下，第1类区域和第2类区域混合建设有利于缓解电动汽车对电网稳定运行的影响。

5 结束语

在大量实测数据的基础上，考虑了电动汽车充电的不确定性，提出了电动汽车充电负荷的时空分布模型，并通过算例分析了电动汽车充电负荷对大电网负荷特性的影响，以及对配电网稳定运行的影响，得出以下结论。

- 1) 所提出的模型能够适应基于不同的充电设施规划和建设条件的充电负荷数据，分两类区域计算充电负荷的时空分布概率和负荷大小。
- 2) 充电设施的布局 and 规划影响着用户充电行为，用户充电行为影响电网的运行状态。加大私人小区周围的充电设施建设有利于降低日负荷峰谷差，缓解电网压力。
- 3) 第1类区域和第2类区域混合布局有利于降低电动汽车充电负荷对电网稳定运行的影响。

参考文献

[1] 孙逢春. 电动汽车发展现状及趋势 [J]. 科学中国人, 2006 (8) : 44-47.

[2] 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) : 1-10.

[3] 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.

[4] Rahman S, Shrestha G B. Investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility

distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (2) : 591-597.

[5] Pieltain F L, Gómez S R T, Cossent R, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (1) : 206-213.

[6] 徐立中, 杨光亚, 许昭, 等. 电动汽车充电负荷对丹麦配电系统的影响 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (14) : 18-23.

[7] 徐国钧, 刘永胜, 李题印, 等. 基于层次分析和概率模拟的电动汽车对配网负荷影响研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012 (22) : 38-45.

[8] 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.

[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.

[10] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 电动汽车我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33 (4) : 1-5.

[11] Bradley T, Quinn C. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195 (16) : 5399-5408.

[12] 贾俊国. 电动汽车智能充换电服务网络建设与运营 [J]. 电力需求侧管理, 2011 (2) : 50-51.

[13] 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.

[14] 张明霞, 田立亭. 一种基于需求分析的电动汽车有序充电实施架构 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (3) : 118-122.

[15] 葛少云, 黄镠, 刘洪, 等. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (10) : 1-5.

(收稿日期: 2015-11-15) EA