

基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略

苏 粟¹,刘紫琦²,王世丹³,杨恬恬¹,胡 勇¹,张仁尊¹,李玉璟¹

(1. 北京交通大学 国家能源主动配电网技术研发中心,北京 100044;

2. 内蒙古电力科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010020;

3. 国网北京市电力公司海淀供电公司,北京 100086)

摘要:电动汽车用户重点关注充电的便利性,但用户在享受便利的同时往往会对电网产生不良的影响。因此,在充电过程中如何同时兼顾用户的便利性和电网的安全性,成为亟待解决的问题。针对上述问题,提出基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略。采用主成分分析和模糊聚类相结合的方法研究用户的驾驶行为特性,预测电动汽车的续驶里程。据此计算车辆每次充电的充电量,同时根据局域配电网负荷曲线,对电动汽车充电进行调度。通过模拟群体电动汽车用户的出行行为,对比分析了电动汽车在无序充电和不同用户响应率下有序充电时的配电网负荷曲线,结果表明所提策略可以有效地减少配电网负荷的峰谷差,提高用户对有序充电策略的积极性。

关键词:电动汽车;有序充电;驾驶行为特性;里程预测;主成分分析;模糊聚类

中图分类号:TM 73;U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.009

0 引言

随着人们对环境问题认识的逐步提高,电动汽车的快速发展已成必然趋势。预计到2020年,中国电动汽车总量将突破500万辆^[1]。作为一种新型的电力负荷,电动汽车充电具有随机性、间歇性的特征,规模化电动汽车充电将会改变电网当前的负荷状况,加大电网负荷的峰谷差,影响配电网的稳定运行^[2-5]。为了减轻电动汽车大规模接入对配电网的影响,需要对电动汽车充电行为进行引导(即有序充电),提高电网运行的可靠性和经济性。

目前国内外关于电动汽车有序充电的研究已有较多成果。传统电动汽车有序充电策略大多是以改善配电网负荷状况或以降低配电网网损为目标,通过调节电动汽车分时充电费用来引导电动汽车驾驶者进行有序充电。我国针对商业负荷特点,制订了相关的政策,提出了分时电价的机制^[6],引导用户进行夜间低谷充电,避免造成峰上加峰的局面。文献[7-9]提出了通过调度电动汽车充电时间,设置电动汽车充电的优先级的方案,提高了馈线末端的负荷利用率,减小了配电网系统的网损。文献[10-12]在使用分时电价的基础上,进一步考虑了用户的出行规律,利用蒙特卡洛法模拟电动汽车的充电行为,设计了有序充电策略,形成兼顾电网和用户利益的多目标控制策略。文献[13-14]具体分析了电动汽车

用户的出行规律,对电动汽车的离家时间、到家时间、每日行程个数、单个行程距离分别进行了建模,建立了车辆行驶行为特性模型;在此模型的基础上,采用分时电价,制定了相应的充放电策略。文献[15]利用概率分布随机模拟的方法模拟用户的运行特征,提出了基于粒子群优化算法的电动汽车有序充电策略的动态优化方案,减小了配电网负荷方差。在此基础上,文献[16-17]将电动汽车有序充电系统化,文献[16]利用多代理系统,以削峰及三相平衡为目标,对电动汽车充电进行有效的调度;文献[17]利用实时负荷管理系统对电动汽车进行有序充电,可以有效地减小压降及网损。

上述研究在计算电动汽车充电量时仅考虑了用户的出行行为,却没有考虑到用户的驾驶行为特性(例如空调使用程度、加减速比例等驾驶过程中的驾驶状态)。当行驶相同距离时,用户不同的驾驶行为特性会导致电动汽车的耗电量不同,充电量也会产生差异。在计算电动汽车充电量时,首先需要预测当前荷电状态(SOC)下车辆的续驶里程。目前相关研究多采用电池参数预测电动汽车的续驶里程^[18-20],用户不同的驾驶行为特性并不会影响车辆的续驶里程。然而,以用户在驾驶过程中是否使用空调为例,在其他条件相同的情况下,当用户使用空调和不使用空调时,电动汽车的续驶里程相差接近23%^[21]。因此,有必要考虑用户驾驶行为特性对电动汽车续驶里程的影响。

为了解决上述问题,本文提出了基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略。利用电动汽车实际行驶数据分析影响电动汽车能耗的因素,在此基础上研究电动汽车用户的驾驶行为特性。根据用户的驾驶行为特性预测电动汽车的续驶里程。在用

收稿日期:2016-12-15;**修回日期:**2018-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677004);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(E16JB00140)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677004) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(E16JB00140)

户到达充电地点后,根据下次充电前的行驶里程,计算该次电动汽车的充电量。结合局域配电网负荷日前预测曲线,以车辆起始充电时间最早和局域配电网负荷曲线峰谷差最小为目标,对电动汽车充电进行调度。

1 电动汽车能耗分析

对电动汽车进行能耗分析,是研究电动汽车用户驾驶行为特性、准确预测电动汽车续驶里程的基础。为了达到上述目的,本文以丰田公司可插入式混合动力电动汽车(Prius PHEV,下文简称为 PHEV)为研究对象,采集其 2013 年 6 月至 2015 年 6 月共 2 年的行驶数据进行研究。PHEV 有 2 种行驶模式:纯电动模式和混合动力模式。本文主要研究 PHEV 在纯电动模式下的行驶状况。通过文献[22-24]中对纯电动汽车能耗规律以及文献[25-27]中关于 PHEV 能量消耗过程的分析,结合本节对 PHEV 在纯电动模式下能耗规律的相关研究,可以看出,纯电动汽车的能耗规律与 PHEV 在纯电动模式下的能耗规律类似。因此对于纯电动汽车而言,其在相应条件下的能耗规律可通过 PHEV 预测得到。本节分别考虑了 PHEV 在纯电动模式下耗电量与平均速度的关系、空调功率随环境温度的变化以及行驶里程与环境温度的关系。

1.1 纯电动模式下电能消耗与平均速度的关系

PHEV 在行驶时,其行驶速度的不同会导致电能消耗量的不同,图 1 以 1 km 为一个片段,作出了在不同环境温度下 PHEV 行驶的平均速度与耗电量的关系曲线。

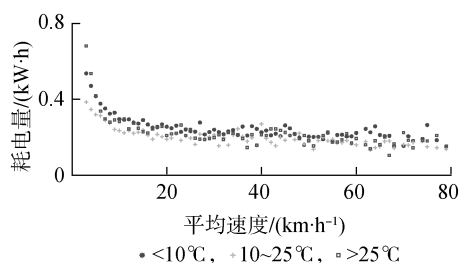


图 1 平均速度与耗电量的关系

Fig.1 Relationship between average speed and power consumption

由图 1 可以看出在不同环境温度下行驶速度对耗电量的影响:随着行驶速度的增加,PHEV 的耗电量逐渐趋于稳定;当行驶速度小于 20 km/h 时,耗电量较大,这主要是由行驶过程中频繁加减速导致的;随着速度的增加,耗电量趋于稳定,这是由于行驶速度在 20~50 km/h 之间时 PHEV 行驶较为稳定,此时最为节能;行驶速度大于 50 km/h 时,发动机会参与驱动,此时 PHEV 的耗电量仍保持稳定。从环境温度上而言,当行驶速度小于 50 km/h 时,PHEV 在

常温下的耗电量相较于低温和高温下较低;高速时发动机的较多参与使得环境温度对耗电量的影响变得较小。通过上述分析可以预测,纯电动汽车在低速、高速及低温下的耗电量均会增加。

1.2 空调功率随环境温度的变化

空调运行功率会随着环境温度的变化而发生变化,具体表现为空调功率大小的差异。本文统计了 2 年内空调功率随环境温度的变化趋势,如图 2 所示。

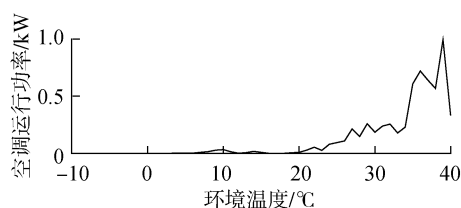


图 2 空调运行功率与环境温度的关系

Fig.2 Relationship between air condition power and environment temperature

图 2 仅反映了 PHEV 在纯电动模式下空调功率随环境温度变化的关系。当环境温度高于 0 °C 时,空调耗能由电池组提供;当环境温度小于 20 °C 时,空调耗能很少,随着环境温度升高,空调功率快速增大,其耗能也会增加;低温下(低于 0 °C)时,空调并不消耗电池组中的电能,因此低温时空调功率几乎为 0。可以预测,纯电动汽车在低温及高温下,空调消耗功率均会有较大幅度的增加。由此可以看出,电动汽车的耗电量与环境温度及空调功率有密切的联系,同时也反映了不同用户驾驶行为特性的不同。

1.3 电动模式下行驶里程与环境温度的关系

PHEV 以纯电动模式行驶的距离会随着环境温度的不同而发生变化,图 3 为 PHEV 在纯电动模式下行驶里程与环境温度的关系。

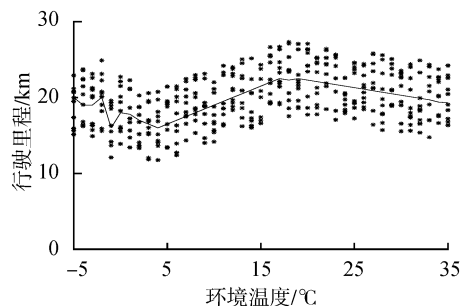


图 3 纯电动模式下行驶里程与环境温度的关系

Fig.3 Relationship between driving distance and environment temperature in pure electric mode

PHEV 在纯电动模式下由于行驶状态的不同,发动机有时会参与驱动,而发动机的参与对电能消耗速度有影响,因此 PHEV 在纯电动模式下的行驶里程受行驶状态影响。另外,纯电动模式下主要依赖电能满足空调等装置的消耗,因此 PHEV 在纯电动模式下的行驶里程还受到环境温度的影响。由图 3 可见,在同一环境温度下,PHEV 的行驶里程主要受行驶状态的

影响,纯电动模式行驶里程波动幅度较大。就平均值而言,在常温下 PHEV 平均里程达到最长,温度升高或者降低,平均里程都有缩短的趋势。当环境温度较低(在 0℃以下)时,发动机更多的参与使平均纯电动模式行驶里程反而有延长的趋势。

根据以上分析可知,环境温度、空调运行功率、平均速度等都会对电动汽车的耗电量产生影响,第2节将具体研究。

2 基于用户驾驶行为特性的续驶里程预测

本节对基于电动汽车用户驾驶行为特性进行续驶里程预测的方法进行了详细阐述,并且通过实测数据验证了该行驶里程预测方法的准确性以及可行性。不同用户的驾驶行为特性通过不同的车辆行驶工况进行描述。采用主成分分析和模糊聚类相结合的方法,对电动汽车的行驶工况进行划分以及识别,预测续驶里程。本节仍以 PHEV 纯电动行驶模式为例进行说明。

2.1 电动汽车行驶工况参数

本文将电动汽车本次充电后到下次充电前的行驶过程称为一个循环,每个循环中,将电动汽车每行驶 1 km 分为一个片段。为了准确地描述每个片段,确保不会出现数据的丢失和失真,选择并计算如下 9 个参数用于描述每个片段:平均速度 v_m ,单位为 km/h;最大速度 $v_{\max}$,单位为 km/h;速度的平方和 $\sum v^2$,单位为 km^2/h^2 ;加速比例 p_{jia} ;减速比例 p_{jian} ;匀速比例 p_{yun} ;怠速比例 p_{dai} ;环境温度 T ,单位为℃;空调功率 P ,单位为 kW。加速度通过对速度计算一阶导数得到。表 1 为前 5 个片段的特征参数值。按照这种方法,选取 3 368 个片段进行分析计算。

表 1 前 5 个片段的特征参数值
Table 1 Characteristic parameter values of first five segments

参数	参数值				
	片段 1	片段 2	片段 3	片段 4	片段 5
$v_m/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	49.32	76.60	34.95	64.29	56.25
$v_{\max}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	54.60	86.49	49.81	69.74	63.14
$\sum v^2/(\text{km}^2\cdot\text{h}^{-2})$	154 086	272 353	122 422	227 743	198 380
p_{jia}	0.506 8	0.319 1	0.524 3	0.285 7	0.500 0
p_{jian}	0.411 0	0.531 9	0.398 1	0.589 3	0.312 5
p_{yun}	0.068 5	0.127 7	0.068 0	0.107 1	0.171 9
p_{dai}	0	0	0	0	0
$T/^\circ\text{C}$	17	18	2	15	15
P/kW	0	0	0	0	0

2.2 电动汽车行驶工况参数的主成分分析

主成分分析就是用较少的几个综合变量代替原来较多的变量,而这些较少的综合变量能尽可能多地反映原来变量的有用信息,且相互之间又是无关的,这些综合变量就称为主成分^[28]。根据主成分分析的原理,若前 $e(e=1,2,\cdots)$ 个主成分的累积贡献

率达到 80%,即可对这 e 个主成分进行分析,从而代替原始变量。对 3 368 个片段特征参数的数据进行主成分分析,得到 9 个主成分。每个主成分的特征值、贡献率如表 2 所示。按主成分分析原理选取前 4 个主成分,并进行特征参数与主成分间的相关性分析,从前 4 个主成分中选取具有代表性的平均速度、加速比例、减速比例、匀速比例、空调功率和环境温度 6 个参数用于聚类分析。

表 2 各主成分的特征值和贡献率
Table 2 Characteristic value and contribution rate of each principal component

主成分	特征值	贡献率/%
Y_1	2.399 2	34.27
Y_2	1.462 4	20.89
Y_3	1.057 1	15.10
Y_4	0.732 1	10.46
Y_5	0.438 2	6.69
Y_6	0.414 8	6.35
Y_7	0.296 2	4.23
Y_8	0.156 8	1.54
Y_9	0.043 2	0.47

2.3 电动汽车行驶工况的模糊 C 均值聚类分析

聚类的目的是将被分类事物按照一定的规则分成若干类,分类规则是根据对象的特征确定的,处于同一类的事物之间存在一定的相似性。但通常将每个待分类对象严格地划分为某一类必然有其不合理性,因此,结合模糊集合理论处理聚类问题可以使聚类的应用更合理可靠^[29]。模糊 C 均值聚类是一种基于目标函数的聚类方法,每一个对象是以一定的隶属度隶属于每个聚类中心的。本文的研究对象是包含 3 368 个样本和 6 个变量的数据,其观测矩阵可以用如下矩阵表示:

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{3\ 368} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{1,1} & \mathbf{x}_{1,2} & \cdots & \mathbf{x}_{1,6} \\ \mathbf{x}_{2,1} & \mathbf{x}_{2,2} & \cdots & \mathbf{x}_{2,6} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{x}_{3\ 368,1} & \mathbf{x}_{3\ 368,2} & \cdots & \mathbf{x}_{3\ 368,6} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵 X 的每一行为一个样本,每一列为变量的观测值。模糊聚类就是将样本划分为 c 类 ($2 \leq c \leq 3\ 368$)。 $V = \{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \cdots, \mathbf{V}_c\}$ 记为 c 类聚类的中心,其中 $\mathbf{V}_i = [V_{i1}, V_{i2}, \cdots, V_{i6}]$ 。令 u_{ik} 表示第 k 个样本属于第 i 类的隶属度 ($0 \leq u_{ik} \leq 1, \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1$), $d_{ik} = \|\mathbf{x}_k - \mathbf{V}_i\|$ 。因此,目标函数为:

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^{3\ 368} \sum_{i=1}^c u_{ik}^m d_{ik} \quad (2)$$

其中, $U = [u_{ik}]_{c \times 3\ 368}$ 为隶属度矩阵。 $J(U, V)$ 即为样本到聚类中心的加权平方距离之和,权重是第 k 个样本属于第 i 类的隶属度的 m 次方。聚类就是计算合适的 U 和 V ,使得 $J(U, V)$ 最小。计算步骤如下。

a. 确定类的个数 c 、幂指数 $m > 1$ 和初始隶属度矩阵 $\mathbf{U}^{(0)} = [u_{ik}^{(0)}]$, 本文中初始隶属度矩阵的确定方法是取 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

b. 计算第 l 步迭代的聚类中心 $V^{(l)}$:

$$V_i^{(l)} = \frac{\sum_{k=1}^{368} (u_{ik}^{(l-1)})^m \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^{368} (u_{ik}^{(l-1)})^m} \quad i = 1, 2, \dots, c \quad (3)$$

其中, l 为迭代次数。

c. 更新隶属度矩阵 $\mathbf{U}^{(l)}$, 计算第 l 步迭代的目标函数 $J^{(l)}(\mathbf{U}^{(l)}, V^{(l)})$:

$$J^{(l)}(\mathbf{U}^{(l)}, V^{(l)}) = \sum_{k=1}^{368} \sum_{i=1}^c (u_{ik}^{(l)})^m (d_{ik}^{(l)})^2 \quad (4)$$

$$u_{ik}^{(l)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c (d_{ik}^{(l)} / d_{jk}^{(l)})^{2/(m-1)}} \quad i = 1, 2, \dots, c; k = 1, 2, \dots, 368 \quad (5)$$

d. 已知计算精度 $\varepsilon_u > 0$, 若 $\max \{ |u_{ik}^{(l)} - u_{ik}^{(l-1)}| \} < \varepsilon_u$, 则已满足精度要求, 停止计算。

经过以上步骤, 可求得最终的隶属度矩阵和聚类中心, 使得目标函数 $J(\mathbf{U}, V)$ 的值达到最小, 即可确定所有样本的归属。

根据上述过程, 对平均速度、加速比例、减速比例、匀速比例、空调功率和环境温度这 6 个特征参数进行聚类分析。首先确定类的个数 c 。根据能耗分析的结论, 平均速度可以反映电动汽车的行驶状态, 而环境温度则是电动汽车行驶的外部环境。根据驾驶过程中的实际情况, 一般可将车速分为低速、中速和高速, 外部环境一般可分为冬季、夏季和春秋季节 (北京地区春季、秋季天气情况较为类似, 因此春秋两季不做区分), 同时按照上述描述, c 取值应为 3 的倍数, 因此, c 的最小值取为 9。

对 3 368 个片段分别取 c 为 9、12、15、18、... 进行尝试, 将平均速度和环境温度的聚类中心进行对比, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, $c=9$ 时各类的特征参数差异很大, 分类粗糙, 因此需增加分类数; c 为 15、18 时, 各类的特征参数区分已经不明显, 因此分类数无需再增大; $c=12$ 时, 各类的特征参数区分都较为明显且较详细, 工况数为 12 类时较为合理, 因此确定最佳的聚类中心个数为 12。

确定聚类中心个数为 12 后, 根据上文所述聚类分析的步骤, 对 3 368 个片段进行聚类分析, 可以得到各聚类中心如表 3 所示。

从环境温度来看, 各聚类中心基本呈现低温 ($< 10^\circ\text{C}$)、常温 ($10 \sim 25^\circ\text{C}$)、高温 ($> 25^\circ\text{C}$) 3 种分布, 分别代表冬季、春秋两季和夏季, 说明环境温度是影响电动汽车能耗的因素之一; 从平均速度来看,

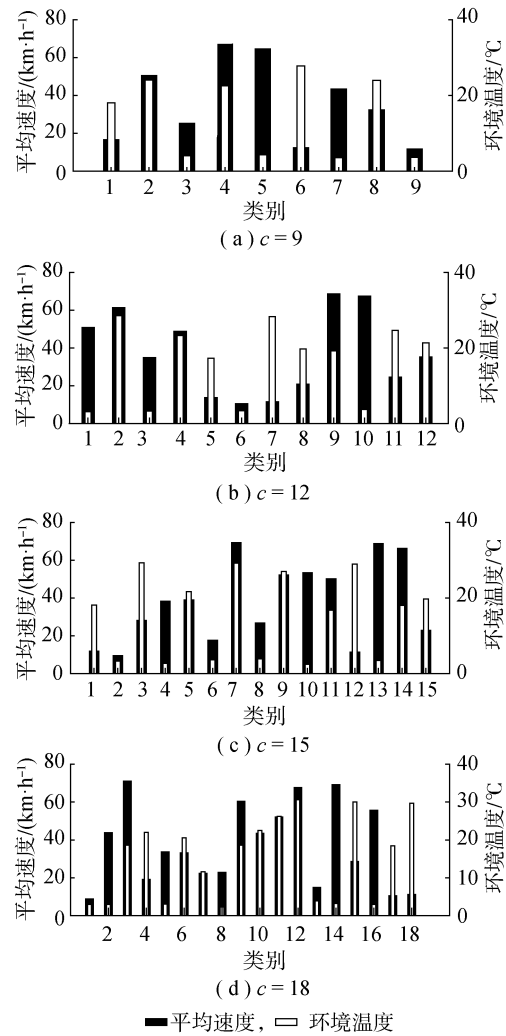


图4 平均速度和环境温度的聚类中心

Fig.4 Clustering center of average speed and environment temperature

表3 各工况聚类中心参数

Table 3 Parameters of each clustering center

类别	$v_m / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	P_{jia}	P_{jian}	P_{yun}	P / kW	$T / ^\circ\text{C}$
C_1	50.80	0.501 7	0.401 8	0.075 5	0.003 1	3.151 6
C_2	61.32	0.487 0	0.408 9	0.085 3	0.231 5	28.501 9
C_3	34.86	0.473 1	0.405 9	0.060 7	0.005 0	3.320 8
C_4	48.73	0.499 9	0.394 5	0.080 6	0.110 4	23.297 8
C_5	13.68	0.307 3	0.294 5	0.060 6	0.013 5	17.276 5
C_6	10.58	0.270 8	0.266 7	0.061 9	0.002 7	3.379 9
C_7	11.47	0.277 6	0.269 0	0.062 1	0.184 6	28.273 7
C_8	20.93	0.388 0	0.359 4	0.057 6	0.004 7	19.729 4
C_9	68.53	0.478 6	0.406 1	0.094 8	0.031 4	19.252 5
C_{10}	67.36	0.494 8	0.391 9	0.087 4	0.004 2	3.737 8
C_{11}	24.60	0.403 4	0.363 7	0.059 8	0.123 1	24.694 0
C_{12}	35.30	0.466 2	0.392 0	0.066 2	0.061 2	21.252 5

各聚类中心可以基本分为低速 ($< 20 \text{ km/h}$)、中低速 ($20 \sim 35 \text{ km/h}$)、中速 ($35 \sim 50 \text{ km/h}$)、高速 ($> 50 \text{ km/h}$) 4 类, 这表明速度对能耗的影响也很明显; 而加速比例、减速比例、匀速比例和空调功率等则主要反映了电动汽车用户的驾驶行为特性。

2.4 电动汽车续驶里程预测

电动汽车续驶里程预测中,根据各工况的聚类中心,按照距离最小原则,确定电动汽车每一个行驶片段的类别,可以将行驶片段按照工况划分为12类。其中,距离计算公式为:

$$d_q = \| \mathbf{x} - \mathbf{c}_q \| \quad q = 1, 2, \dots, 12 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_6]$ 为某片段的特征参数; $\mathbf{c}_q = [c_{q1}, c_{q2}, \dots, c_{q6}]$ 为聚类 q 的聚类中心参数。

取每一类中各片段能耗的平均值作为该工况下电动汽车的能耗。车辆电池容量为 Q , 读取车辆当前的 SOC, 根据车辆驾驶者长期的行驶数据确定各工况的比例, 各工况的比例为 $p_1:p_2:\dots:p_n:\dots:p_{c-1}:p_c$ ($1 \leq n \leq c; c = 12$), 每种工况的能耗分别为 $E_1, E_2, \dots, E_c$, 根据车辆的电池容量 Q 及当前的 SOC, 计算续驶里程 L_1 :

$$L_1 = \frac{QS_s \sum_{n=1}^{12} p_n}{\sum_{j=1}^{12} E_j p_j} \quad (7)$$

其中, S_s 为车辆电池当前的 SOC。

根据以上方法, PHEV 行驶数据前 5 个行驶片段的工况划分结果如表 4 所示。

表 4 行驶片段隶属工况划分结果

Table 4 Condition identification result of driving segments

片段	隶属工况	片段	隶属工况
1	C_4	4	C_9
2	C_9	5	C_4
3	C_3		

对上述 PHEV 进行 6 次独立的道路测试, 记录车辆的 SOC 及行驶里程, 与利用该方法计算所得的预测行驶里程进行对比, 结果如表 5 所示。表 5 中结果表明, 该方法可以较为准确地预测电动汽车在不同环境及行驶工况下的续驶里程。

表 5 里程预测结果

Table 5 Predictive result of driving distance

测试	环境温度/ ℃	空调使用 情况, 功率/ kW	初始 SOC/%	结束 SOC/%	行驶 里程/ km	预测 里程/ km
1	-6	—	100	0	17	17.8
2	-6	制热, 1	100	0	15	16.2
3	12	—	100	0	20	21.2
4	12	制热, 1	100	0	18	17.3
5	27	—	100	0	21	20.1
6	27	制冷, 1	100	0	18	18.6

3 电动汽车有序充电策略

本节中提出的电动汽车有序充电策略, 利用了第 1、2 节提出的电动汽车续驶里程预测方法计算电

动汽车的充电量, 同时考虑到局域配电网的负荷曲线, 制定电动汽车有序充电计划。

3.1 有序充电策略模型

建立该有序充电策略的双层模型, 上层模型为用户侧, 用以确定电动汽车每次充电的充电量; 下层为电网侧, 以用户起始充电时间最早及配电网负荷曲线峰谷差最小为优化目标, 采用遗传算法, 确定车辆的充电计划。

上层模型为用户层, 读取车辆当前的 SOC、驶离时间 t 及下次充电前的预计行驶里程 L , 根据第 2 节的续驶里程预测方法预测车辆在当前 SOC 下的续驶里程 L_1 , 若 L_1 满足式 (8), 表明当前电动汽车电量充足, 由电动汽车用户决定是否对电动汽车进行充电。

$$L_1 \geq (1 + 10\%)L \quad (8)$$

其中, 10% 为车辆的电量裕量。若当前续驶里程不满足式 (8) 或使用者仍要进行充电, 此时仍由用户决定是否愿意接受充电调控, 若用户不愿意接受调控, 则当前为电动汽车开始充电并充满; 若用户愿意接受调控, 则计算满足车辆出行的最小充电量并进入下层——电网层, 此时优化目标为用户起始充电时间最早及局域配电网负荷曲线峰谷差最小。

局域配电网当日负荷曲线根据历史负荷预测得到。本文将一天看作 96 个时段, 则每个负荷点的时间间隔为 15 min, 设第 i 个时段内局域配电网原始负荷大小为 P_i ($i = 1, 2, \dots, 96$)。此外, 本文假设电动汽车电池容量为 Q , 其充电过程为恒功率充电, 充电功率为 ΔP 。用户到达充电地点的时间为 T_s , 起始充电时间为 T_c 。由第 2 节的结论预测车辆行驶里程 L 所需的电量 S_E , 则用户所需的充电电量 S_{soc} 计算方法如下:

$$S_{soc} = \begin{cases} (1+10\%)S_E - S_s & (1+10\%)S_E < Q \\ Q - S_s & (1+10\%)S_E \geq Q \end{cases} \quad (9)$$

设第 i 个时段内正在充电的电动汽车负荷为 P_{EVi} , 共有 N 辆电动汽车进行充电, 则有:

$$P_{EVi} = \sum_{k=1}^N \Delta P_k \quad (10)$$

第 i 个时段内局域配电网的总负荷 $P_{loadsumi}$ 为电动汽车充电负荷 P_{EVi} 与原始负荷 P_i 之和:

$$P_{loadsumi} = P_{EVi} + P_i \quad (11)$$

在用户停车的时间 (T_s, t) 内, 以用户起始充电时间最早以及局域配电网的峰谷差最小作为充电控制的目标函数, 即:

$$\begin{cases} \min \text{var}(P_{loadsumi}) \\ \min T_c \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\text{var}(P_{loadsumi})$ 为 $P_{loadsumi}$ 的方差函数。

$P_{loadsumi}$ 应满足:

$$P_{loadsumi} \leq P_{\max} \quad (13)$$

其中, $P_{\max}$ 为局域配电网的最大负荷。

此外, 起始充电时间 T_c 还应满足:

$$T_s \leq T_c \leq t \quad (14)$$

$$(t - T_c) \Delta P \geq S_{\text{soc}} \quad (15)$$

上述即为该有序充电调度问题, 采用遗传算法求解该问题。选取每个时段的充电功率作为染色体个体, 进行二进制编码, 执行交叉与变异操作, 并根据约束条件计算目标函数, 对优秀染色体进行保留与重插入, 反复循环后可得电动汽车有序充电调度结果。整体流程如图 5 所示。

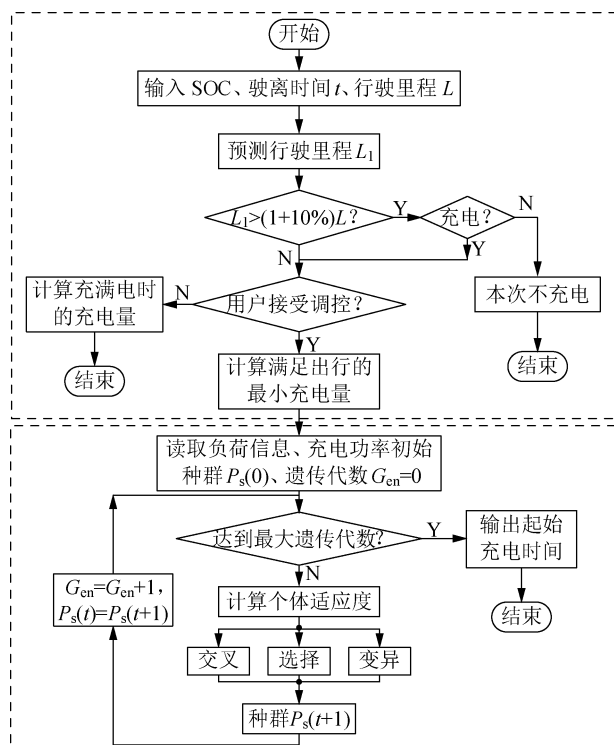


图 5 有序充电策略流程图

Fig.5 Flowchart of orderer charging strategy

3.2 算例分析

以图 6 所示简单局域配电网为例, 分析节点 3 的负荷变化。由于前文所述 PHEV 电池容量较小, 为了使该算例更加接近实际情况, 本算例中车辆将以纯电动汽车北汽 E150 ev 代替, 而电动汽车续航里程预测过程中的相关参数, 除电池容量外, 其余均与 PHEV 相同。设区域内共有 100 辆北汽 E150 ev 运行, 其电池容量为 25.6 kW·h, 充电使用常规充电方式, 充电功率为 3 kW, 且充电桩数量足够。由于并不清楚个体用户的出行规律, 因此本算例对区域内所有用户的出行规律(具体见 3.2.1 节)进行抽样得到电动汽车用户的出行规律。用户的出行规律主要包括用户进入及驶离该区域的时间、用户进入区域时电动汽车的 SOC 以及电动汽车在 2 次充电间的行驶里程。同时, 由于并不清楚电动汽车用户是否会接受该有序充电策略, 因此在算例中引入用户

响应率参数 δ , δ 为能够接受该有序充电策略的电动汽车用户数与该区域内所有电动汽车用户数之比, 其中接受该有序充电策略的用户同时能够接受对电动汽车充电量以及电动汽车起始充电时间的调控。

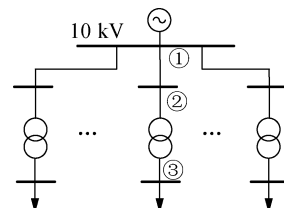


图 6 局域配电网结构图

Fig.6 Structure of local distribution network

3.2.1 用户出行规律

分析群体用户的出行规律, 建立用户出行规律概率模型, 按照概率模型进行抽样, 得到单个电动汽车用户的出行规律。

统计该区域中车辆的进入时间及驶离时间, 得到如图 7 所示的结果。从图 7 中可以看出, 08:00 和 14:00 为车辆进入该区域的高峰时间, 12:00、17:00 为车辆驶离该区域的高峰时间。

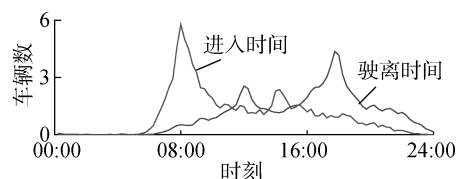


图 7 进入和驶离时间分布

Fig.7 Distribution of entry and departure time

图 7 中车辆的进入时间和驶离时间曲线可用 6 次高斯模型表示, 具体如式 (16) 所示。

$$y = \sum_{i=1}^6 a_i e^{-[(z-b_i)/e_i]^2} \quad (16)$$

参数具体如下: 进入时间模型中, $a_1 = 1.751$, $b_1 = 8.004$, $e_1 = 0.308$, $a_2 = 0.996$, $b_2 = 17.31$, $e_2 = 3.625$, $a_3 = 3.536$, $b_3 = 8.164$, $e_3 = 1.289$, $a_4 = 1.405$, $b_4 = 10.92$, $e_4 = 2.986$, $a_5 = 1.488$, $b_5 = 14.22$, $e_5 = 0.520$, $a_6 = 0.585$, $b_6 = 15.46$, $e_6 = 0.752$; 驶离时间模型中, $a_1 = 1.816$, $b_1 = 17.86$, $e_1 = 0.454$, $a_2 = 0$, $b_2 = 21.57$, $e_2 = 0.011$, $a_3 = 1.187$, $b_3 = 12.07$, $e_3 = 0.458$, $a_4 = -5.059$, $b_4 = 15.97$, $e_4 = 4.383$, $a_5 = 5.060$, $b_5 = 15.97$, $e_5 = 4.385$, $a_6 = 1.699$, $b_6 = 17.09$, $e_6 = 1.749$ 。

统计该区域电动汽车进入时的初始 SOC, 结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 进入时初始 SOC 在 40%~65% 的车辆较多。

统计该区域内电动汽车 2 次充电间行驶里程, 结果如图 9 所示。从图 9 中可看出, 行驶 30~50 km 时进行充电的车辆较多。

图 8、9 中的曲线可用 8 次傅里叶模型表示, 具

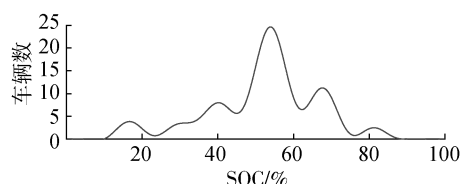


图8 电动汽车初始SOC分布
Fig.8 Initial SOC distribution of EV

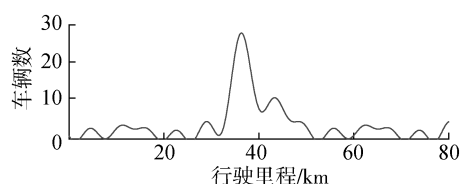


图9 2次充电间的行驶里程
Fig.9 Driving distance between two chargings

体如式(17)所示。

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^8 [a_i \cos(i\omega z) + b_i \sin(i\omega z)] \quad (17)$$

参数具体如下:图8中曲线, $\omega = 0.065$, $a_0 = 5.161$, $a_1 = -6.413$, $b_1 = -2.111$, $a_2 = 1.769$, $b_2 = 2.634$, $a_3 = -0.829$, $b_3 = -1.573$, $a_4 = -0.063$, $b_4 = 1.003$, $a_5 = 0.090$, $b_5 = -1.950$, $a_6 = -0.330$, $b_6 = 2.017$, $a_7 = 1.766$, $b_7 = -0.859$, $a_8 = -1.200$, $b_8 = 0.167$;图9中曲线, $\omega = 0.122$, $a_0 = 5.074$, $a_1 = 0.067$, $b_1 = -5.963$, $a_2 = -4.668$, $b_2 = 0.570$, $a_3 = 1.336$, $b_3 = 1.608$, $a_4 = 1.139$, $b_4 = -1.976$, $a_5 = -2.437$, $b_5 = -0.188$, $a_6 = -0.291$, $b_6 = 1.990$, $a_7 = 1.804$, $b_7 = -0.851$, $a_8 = -1.304$, $b_8 = -1.558$ 。

3.2.2 算例结果

为了与有序充电的结果进行对比,首先分析电网在无序充电下的负荷曲线及峰谷差。无序充电指电动汽车到达该区域即开始充电,直到电量充满或者车辆驶离该区域。电动汽车无序充电和当用户响应率 $\delta = 50\%$ 、电动汽车有序充电时电网节点3的负荷曲线如图10所示。

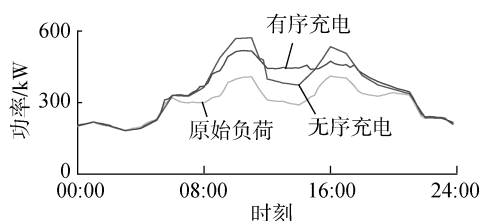


图10 节点3的负荷曲线
Fig.10 Load curve of Node 3

由图10可以看出,有序充电时,由于考虑了用户出行需求,电动汽车充电负荷仍多集中在白天,充电负荷多被转移到白天负荷较低点,而被转移到夜间的充电负荷很少,白天整体负荷依然较高;但是相比于无序充电,有序充电仍减小了局域配电网负荷

的峰谷差,所以该有序充电策略能够引导用户进行有序充电,减小电网负荷的峰谷差。

用户响应率 δ 分别为 30% 、 50% 、 70% 时的电网负荷曲线如图11所示。

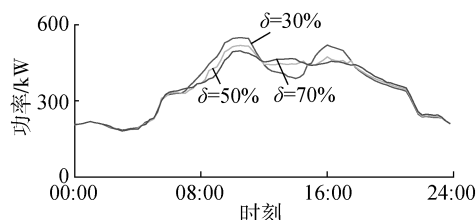


图11 不同用户响应率下的电网负荷曲线
Fig.11 Network load curves with different user response rate values

由图11可以看出,充电负荷仍然多被转移到白天负荷较低点进行充电,且用户响应率越大,充电负荷被转移的越多。上述结果表明,受该有序充电策略引导的电动汽车越多,电网负荷曲线的峰谷差越小。

电动汽车无序充电及不同用户响应率有序充电时电网负荷曲线的方差,如表6所示。

表6 不同充电模式下负荷曲线的方差
Table 6 Variance of network load curve in different charging modes

充电模式	负荷峰谷差/kW	负荷方差/kW ²
原始负荷	227.69	4.641×10^3
无序充电	413.69	1.580×10^4
有序充电 $\delta = 30\%$	384.32	1.517×10^4
有序充电 $\delta = 50\%$	349.40	1.326×10^4
有序充电 $\delta = 70\%$	320.99	1.252×10^4

由表6可以看出,接入电动汽车后,电网负荷曲线的方差增加了 83.88% ,电动汽车的接入对局域配电网造成了较大的冲击。相比于无序充电, 50% 用户响应率下的有序充电使得电网负荷曲线的方差减小了 6.28% ,而且用户响应率越高,该策略对于减小电网负荷曲线方差的效果就越明显。

4 结论

本文针对电动汽车无序充电对局域配电网峰谷差产生的影响,提出了基于用户驾驶行为特性的有序充电策略。采用主成分分析法和模糊聚类算法,提出了一种基于用户驾驶行为特性的电动汽车续驶里程预测方法,通过实测数据验证了该方法的准确性。根据车辆的续驶里程计算电动汽车每次充电的充电量,同时考虑到局域配电网的负荷曲线,制定电动汽车有序充电调度策略。算例分析表明,本文提出的有序充电策略能够在符合用户驾驶行为特性的基础上对局域配电网起到削峰填谷的作用,在保证调控效果的基础上提高了用户对策略的满意度,在电动汽车规模化应用后的效果会更加明显。由于目

前还处于电动汽车发展的初期,用户充电响应率并不明确,本文给出的不同用户响应率下的算例结果有一定的参考意义。

用户响应率对有序充电策略的有效实施具有重要的作用。笔者下一步的研究思路是从电动汽车用户的根本需求和利益,例如驾驶的舒适度、电池寿命、充电的便利性等方面出发,进一步提高用户对有序充电调度计划的满意度。

参考文献:

- [1] 国务院. “十二五”节能环保产业发展规划[J]. 中国环保产业, 2012, 5(8): 7-12.
The State Council of China. The development planning of environmental protection in the 12th five-year plan[J]. China Environmental Protection Industry, 2012, 5(8): 7-12.
- [2] BEAUDE O, HE Y, HENNEBEL M. Introducing decentralized EV charging coordination for the voltage regulation [C] // Innovative Smart Grid Technologies Europe. Lyngby, Denmark; IEEE, 2014: 1-5.
- [3] CLEMENT-NYNS K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [4] SHAO S, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network [C] // Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [5] HADLEY S W, TSVETKOVA A A. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation[J]. Electricity Journal, 2008, 22(10): 56-68.
- [6] 苏海峰, 梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 17-22.
SU Haifeng, LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 17-22.
- [7] MASOUM A S, DEILAMI S, MOSES P S, et al. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 877-888.
- [8] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [9] 占恺峤, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 11-18.
ZHAN Kaiqiao, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 11-18.
- [10] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [11] 张振夫, 黄小庆, 曹一家, 等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 24-29.
ZHANG Zhenfu, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 24-29.
- [12] 朱龙琴. 规模化电动汽车有序充电控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
ZHU Longqin. Research on large scale of electric vehicle coordinated charging strategy[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [13] 王岱, 管晓宏, 吴江, 等. 基于车辆行驶行为特性建模的电动汽车充放电策略与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2322-2327.
WANG Dai, GUANG Xiaohong, WU Jiang, et al. Vehicle driving pattern based modeling and analysis of centralized charging/dis-charging strategy for plug-in electric vehicles [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2322-2327.
- [14] 韩海英, 和敬涵, 王小君, 等. 基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 165-169.
HAN Haiying, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. An improved particle swarm optimization-based load response strategy with participation of vehicle to grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 165-169.
- [15] 苏粟, 孙晓明, 罗敏, 等. 面向局域配电网的电动汽车充电控制系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 19-23.
SU Su, SUN Xiaoming, LUO Min, et al. Charging control system of electric vehicles orientating to local distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 19-23.
- [16] LEEMPUT N, GETH F, CLAESSENS B, et al. A case study of coordinated electric vehicle charging for peak shaving on a low voltage grid [C] // IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Berlin, Germany: IEEE, 2013: 1-7.
- [17] MASOUM M A S, MOSES P S, HAJFOROOSH S. Distribution transformer stress in smart grid with coordinated charging of plug-in electric vehicles [C] // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Washington DC, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [18] ZHANG Y, WANG W, KOBAYASHI Y, et al. Remaining driving range estimation of electric vehicle [C] // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). Greenville, SC, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [19] KESSELS J, ROSCA B, BERGVELD H J, et al. On-line battery identification for electric driving range prediction [C] // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Chicago, IL, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [20] 李顶根, 邓杰, 陈军. 电动汽车车载 SOC 测量及续驶里程的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2008(5): 91-94.
LI Dinggen, DENG Jie, CHEN Jun. A study of the electric vehicle battery's state of charge estimation and its continued driving mileage [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2008(5): 91-94.
- [21] 曹中义. 电动汽车电动空调系统分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
CAO Zhongyi. Electric A/C system study of electric vehicle [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [22] 宋媛媛. 基于行驶工况的纯电动汽车能耗建模及续驶里程估算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
SONG Yuanyuan. Energy consumption modeling and cruising range estimation based on driving cycle for electric vehicles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [23] 郑宁安. 纯电动汽车能耗预测与续驶里程估算[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHENG Ning'an. Energy consumption prediction and driving range estimation for electric vehicles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [24] YU H, TSENG F, MCGEE R. Driving pattern identification for EV range estimation [C] // 2012 IEEE International Electric Vehicle

Conference (IEVC). Greenville, SC, USA; IEEE, 2012; 1-7.

- [25] 吕志梁. 插电式混合动力汽车能量管理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
LÜ Zhiliang. Research on power management of PHEV[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [26] 彭文明, 杨慧萍, 李孟良, 等. 插电式混合动力电动汽车能耗研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(9): 144-148.
PENG Wenming, YANG Huiping, LI Mengliang, et al. Investigation on the energy consumption of PHEV[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(9): 144-148.
- [27] LU H Y, SMART J. Report on the field performance of A123 systems' hymotion™ plug-in conversion module for the Toyota Prius [R]. [S.l.]: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2009.
- [28] 李柏年. MATLAB 数据分析方法[M]. 北京:机械工业出版社, 2012; 105-135.
- [29] 王淑芬. 应用统计学[M]. 北京:北京大学出版社, 2011: 190-214.

作者简介:

苏 粟(1981—), 女, 北京人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电动汽车与电网互动研究以及电力系统稳定性分析(E-mail: ssu@bjtu.edu.cn);



苏 粟

刘紫琦(1993—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 主要研究方向为新能源与微网发电、电动汽车对配电网的影响分析(E-mail: lzq19930131@sina.com);

王世丹(1988—), 男, 北京人, 高工, 硕士, 主要研究方向为分布式电源无功补偿与配电网稳定性分析(E-mail: wang.shidan@163.com);

杨恬恬(1993—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车智能充放电(E-mail: 16121563@bjtu.edu.cn);

胡 勇(1990—), 男, 河北廊坊人, 硕士, 主要研究方向为电动汽车无功补偿对配网影响分析(E-mail: 14121415@bjtu.edu.cn);

张仁尊(1995—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电动汽车充放电与配网互动分析(E-mail: zhangrenzun@126.com);

李玉璟(1996—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源汽车与配网互动分析(E-mail: 2460838130@qq.com)。

Ordered charging strategy of electric vehicles based on users' driving behavior

SU Su¹, LIU Ziqi², WANG Shidan³, YANG Tiantian¹, HU Yong¹, ZHANG Renzun¹, LI Yujing¹

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Inner Mongolia 010020, China;

3. State Grid Beijing Haidian Electric Power Supply Company, Beijing 100086, China)

Abstract: Electric vehicle users are focused on the convenience of charging, which may cause some problems for power grid at the same time. So how to take both users' convenience and security of power grid into account is an urgent problem to be solved. Aiming at this problem, an ordered charging strategy of electric vehicles based on users' driving behavior is proposed. The principal component analysis and fuzzy clustering algorithm are used to study the electric vehicle users' driving behavior and predict the driving distance, based on which to calculate the charging power of each charging process and to dispatch the electric vehicles according to the load curves of local distribution network. By simulating electric vehicle users' driving behavior, the load curves of distribution network when electric vehicle disordered charging and ordered charging with different user response rates are analyzed and compared, whose results show that the proposed strategy can reduce the peak valley of distribution network load effectively and can increase the electric vehicle users' motivation to ordered charging.

Key words: electric vehicles; ordered charging; driving behavior; driving distance prediction; principal component analysis; fuzzy clustering