

基于模糊控制的区域电动汽车入网充放电调度策略

张怡冰, 刘其辉, 洪晨威, 唐光钰

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:提出一种基于模糊控制的电动汽车入网(V2G)充放电调度策略。首先,提出 V2G 管理系统的整体结构,其主要由有序充电调度系统和 V2G 变流器控制系统组成,前者合理安排各充电桩的充放电功率,实现削峰填谷的辅助功能;后者响应上层调度下发的功率指令,控制实际充放电行为,提供稳定的电能变换和能量交换的接口。然后,在有序充电调度系统中综合当前配电网的负荷特点,对当前接入充电站的全部电动汽车进行调配,并采用模糊控制算法计算充放电功率并下发给各充电桩,改善区域电网的负荷特性,实现削峰填谷的辅助功能。最后,通过仿真实验证明所提有序充电调度系统在满足电动汽车充电需求的同时,能够充分地利用电动汽车负荷的灵活性;在实现对电网削峰填谷的同时,有效地避免了电网负荷低谷时段大量电动汽车充电引起新负荷尖峰的问题。

关键词:电动汽车;V2G;模糊控制;有序调度策略;充放电控制

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.022

0 引言

面对日益严峻的能源危机和环境问题,高耗能、高排放的燃油汽车将被低耗能、零排放、低噪声的电动汽车所替代,这已成为现代社会发展的趋势^[1-3]。电动汽车作为新兴的清洁、高效、智能的交通工具,其发展潜力巨大,应用前景广阔^[4]。

随着电动汽车的广泛应用以及电池技术的进步,电动汽车入网 V2G(Vehicle-to-Grid)技术^[5-6]越来越受到人们的关注。V2G 的核心是在满足用户需求的前提下利用大量电动汽车的储能资源作为电网和新能源的缓冲。文献[7]指出,V2G 系统具备向电网提供功率调节、削峰填谷、频率调节等辅助服务的功能,可有效改善电网的运行效率和稳定性。

目前,V2G 技术涉及的关键问题主要分为 2 类:一类是如何制定合理有效的调度策略对电动汽车进行有序充放电控制,合理安排充电计划既能满足电动汽车的充电需求,又能够为电网提供辅助服务;另一类是如何对 V2G 双向变流器进行控制,实现电能变换和能量双向流动。合理的有序充放电策略和 V2G 变流器控制策略是实现 V2G 技术的关键,两者缺一不可。有序充放电策略能够实现区域电动汽车的削峰填谷、频率调节等辅助功能,而 V2G 变流器控制策略能够为 V2G 提供底层支持,实现电能变换以及电动汽车与电网之间能量的双向流动。目前,V2G 变流器控制策略已有较多的研究成果,本文主要关注 V2G 管理系统的调度策略问题。

以往对 V2G 管理系统的研究中,文献[8]提出

一种将电动汽车作为储能元件参与 V2G 调度运行,但是提出的调度方法不适用于大量电动汽车共同参与 V2G 服务的情况;文献[9-10]提出基于模糊控制器的电动汽车充电站的控制策略,引入基于模糊控制的调度方法,基于降低电网峰谷差和电压稳定的目标对电动汽车进行控制,但是其调度方法没有很好地解决电动汽车充电导致新负荷尖峰的问题;文献[11]提出采用整数规划方法对电动汽车充放电功率进行优化控制,同时考虑了电动汽车在不同可控比例下的有序充电优化情况,有效地降低了电网峰谷差,但由于固定了电动汽车的充放电功率,最终结果仍有较大的优化空间;文献[12]提出一种基于同步逆变器的电动汽车充放电控制方法,利用电动汽车参与电网的频率调节,但其调度策略没有考虑新接入电动汽车之间的相互影响,缺乏约束条件,有可能会在电网频率较高时出现充电高峰;文献[13]提出了以减小系统负荷日峰谷差率和降低电动汽车用户用电成本为目标的多目标协同优化调度模型,并采用粒子群优化算法进行寻优,但是,当电动汽车数量较多时,该模型运行缓慢,效率较低。

到目前为止,有关 V2G 充放电调度策略的研究主要存在 2 方面的问题:①大多研究对象为集中式夜间电动汽车充电负荷,但实际上是不同接入地点、接入时间的电动汽车只要停留时间多于充电所需时间,均存在可调度空间,且调度过程中需要避免因电动汽车充电而出现新的充电尖峰情况;②部分研究选择对电动汽车的功率进行连续调节,同时采用规划或启发式算法对电动汽车的充放电功率进行寻优以求得整体最优解,这类模型往往需要耗费较多的时间进行求解,不适用于大量电动汽车接入时的在线控制。

V2G 的实现包含 2 个方面:一方面,调度层面应

收稿日期:2018-12-05 修回日期:2019-03-25

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFB0101900)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0101900)

合理安排各电动汽车的充电计划,下发调度指令给各充电桩;另一方面,各充电桩的变流器应及时响应调度指令。上述两方面协调配合方能保证 V2G 的实现。因此,本文首先介绍 V2G 管理系统的组成结构及相互关系,包括调度系统以及 V2G 变流器系统;然后,提出一种基于模糊控制的 V2G 充放电控制策略,采用模糊控制算法根据当前电网的供需情况以及已接入电动汽车的荷电状态调节新接入电动汽车的充放电功率。算例仿真表明,本文所提有序调度策略能够在满足电动汽车用户需求的前提下,实现对电网削峰填谷的辅助功能,同时能够避免在电网负荷低谷时因电动汽车接入数量过多而导致产生新的负荷尖峰。

1 V2G 管理系统

本文所提 V2G 管理系统如图 1 所示,其由有序充电调度系统和 V2G 变流器控制系统组成,前者为上层优化调度层,负责管理某区域内各充电桩的功率分配,主要职责为合理安排各充电桩的充放电功率,改善区域电网的负荷特性,实现削峰填谷的辅助功能;后者为下层实时控制层,负责控制每个充电桩的实际充放电行为,主要职责为响应调度系统下发的功率指令以控制实际的充放电行为,提供稳定的电能变换和能量流动的接口。其中,有序充放电调度系统为充电桩变流器控制系统下发功率参考指令,V2G 变流器控制系统响应功率指令,控制实际充放电行为^[14]。含 V2G 管理系统的配电网结构如图 2 所示。

有序充电调度系统收集当前配电网的电源出力数据、负荷数据以及各充电桩上报的已接入电动汽车负荷数据,计算各个充电桩接入电动汽车的充放电功率并下发给各充电桩。V2G 变流器系统接收上层调度系统下发的功率指令后,控制电动汽车进行有序充放电,从而控制实际的充放电行为。

V2G 管理系统的总体控制流程具体如下:

(1) 有序充电调度系统收集当前时段各充电桩已接入的电动汽车数据,同时从区域电网调度中心获取该时段电网的发电信息和负荷信息;

(2) 有序充电调度系统根据电动汽车充电数据计算电动汽车的电量需求、允许放电的电量以及最晚充电时刻,考虑当前电网的功率供需情况,计算电动汽车的参考充放电功率,并下发给各充电桩;



图 1 V2G 管理系统

Fig.1 V2G management system

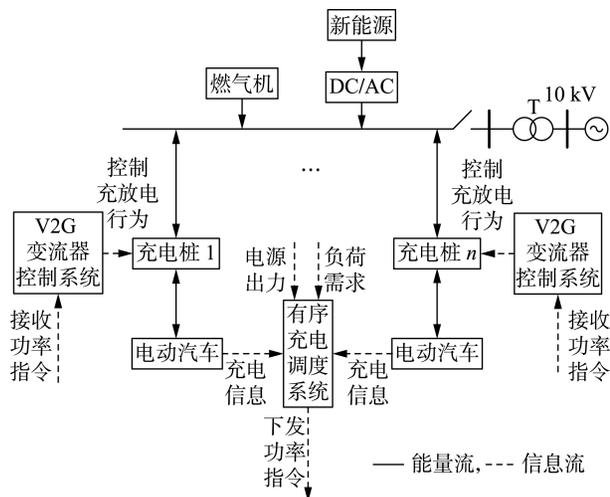


图 2 含 V2G 管理系统的电网结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of power grid with V2G management system

(3) 各充电桩 V2G 变流器控制系统根据下发的充放电功率指令,进行实际的充放电控制,提供稳定的电能变换和能量交换接口。

2 有序充电调度系统

有序充电调度系统负责管理区域配电网中各充电桩处电动汽车的充放电功率,综合当前时段电网的负荷特点,计算并下发各充电桩电动汽车的充放电功率指令,改善区域的负荷特性,实现削峰填谷的辅助功能。

考虑到电动汽车接入的随机性,未来电动汽车的准确接入时间和充电需求无法预测。因此,本文将 1 d 分为 288 个时段,每个时段 5 min,在每个时段的开始时刻更新电网的运行状态,该时刻为调度系统的运行计算点,如图 3 所示。若电动汽车的到达时刻处于时段的中间部分,则电动汽车需要等待在下一个时段统一进行充放电控制。

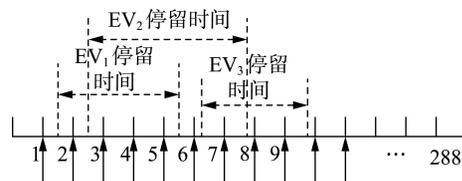


图 3 控制时段示意图

Fig.3 Schematic diagram of control period

有序充电调度系统主要分为计量部分和决策部分,下文将对各部分分别进行介绍。

2.1 计量部分

当电动汽车接入区域充电站时,可以得到该电动汽车接入充电桩的类型(直流/交流充电桩)、接入充电站的时刻 T_1 、初始荷电状态 SOC_0 以及用户设定的离开时刻 T_2 。计量单元可以计算得到接入电动汽车的需求充电电量 Q_d 以及允许放电电量 Q_a ,分别如式(1)、(2)所示。

$$Q_c = \begin{cases} Q(\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}) & \text{SOC} < \text{SOC}_{\max} \\ 0 & \text{SOC} = \text{SOC}_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_d = \begin{cases} Q(\text{SOC} - \text{SOC}_{\min}) & \text{SOC} > \text{SOC}_{\min} \\ 0 & \text{SOC} = \text{SOC}_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Q 为电动汽车电池的容量; SOC 为电动汽车电池当前的荷电状态; SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为电动汽车充放电过程中电池电量的上限和下限, 一般情况下 $\text{SOC}_{\max} = 1, \text{SOC}_{\min} = 0.2$ 。

同时, 为了满足电动汽车的充电需求, 使得电动汽车在离开之前充满, 定义电动汽车最晚充电时刻为 T_3 。在该时刻之前, 电动汽车处于可调度状态, 既能充电也能放电, 在该时刻之后, 电动汽车以额定充电功率充电。由于未来电动汽车的充放电状态无法预测, 充电时间 T 用电动汽车的最长充电时间替代, 并定义电动汽车充电时时间裕度为 k , 则 T_3 的计算公式为:

$$T_3 = k(T_2 - T_1 - T) + T_1 \quad (3)$$

其中, T 为电动汽车以最低充电功率从 SOC_{\min} 充至 SOC_{\max} 所需要的最长充电时间, 其表达式如式(4)所示; k 与电动汽车电池当前的荷电状态 SOC 、预期达到的 SOC_{\max} 、停留时间等因素有关, k 越小, 电动汽车的充电时间越充足, 其表达式如式(5)所示。

$$T = (\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}_{\min})Q/P_{\min} \quad (4)$$

$$k = \frac{k_1(\text{SOC}_{\max} - \text{SOC})Q/P_{\min}}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

其中, k_1 的取值范围为 $(1, 3)$; P_{\min} 为电动汽车的最低充电功率。

2.2 决策部分

决策部分的核心思想为: 当电网处于负荷高峰时, 大量的电动汽车进行充电必然会加剧电网负担, 若此时电动汽车处于可调度时段, 可以控制电动汽车减少从电网吸收的电能, 甚至可以控制电动汽车向电网注入电能; 当电网处于负荷低谷时, 可以控制电动汽车增加从电网吸收的电能, 提高电网的运行效率。同时, 在可调度时段内, 电动汽车的充电功率与电动汽车的需求电量有关, 当需求电量很高时, 电动汽车可以以较高的功率充电; 当需求电量很低时, 为了防止过充, 充电功率应处于较低的水平。

由以上分析可知, 电动汽车的充放电功率与电动汽车当前的电量、电网负荷情况有关, 且难以用解析模型描述。模糊控制是以人对被控对象的操作经验为依据, 无需知道被控对象的内部结构及其解析模型, 其鲁棒性和适应性均能满足控制要求^[15]。因此, 决策部分采用模糊控制的方法, 在可调度时段内根据当前电网的供需情况以及接入电动汽车的荷电状态, 自主调节电动汽车的充放电功率, 在满足用户需求的同时, 参与电网削峰填谷。

设定 ΔP 为电网发电与负荷的功率差额, 基本

论域设置为 $[-100, 100]$ kW, 模糊论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 量化因子 $K_1 = 3/100$, 对应的模糊子集为 $\{\text{NB}_g, \text{NM}_g, \text{NS}_g, \text{ZE}_g, \text{PS}_g, \text{PM}_g, \text{PB}_g\}$ 。其中, 模糊子集 ZE_g 表示功率差额为 0, 当前电网供需达到平衡; 模糊子集 NB_g 表示当前电网的功率缺额非常高, 此时处于用电尖峰; 模糊子集 PB_g 表示当前电网发出的电能剩余很多, 此时处于用电低谷; 模糊子集 $\text{NM}_g, \text{NS}_g, \text{PS}_g, \text{PM}_g$ 分别表示发电量较为不足、不足、充裕、十分充裕的情况。

设定 Q_c 为电动汽车的需求电量, 基本论域设置为 $[0, Q]$, 电动汽车的模糊论域为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 量化因子 $K_2 = 6/Q$, 对应的模糊子集为 $\{Z_c, \text{VS}_c, \text{S}_c, \text{M}_c, \text{B}_c, \text{VB}_c\}$ 。其中, 模糊子集 Z_c 表示电动汽车的充电需求接近 0, 此时电池电量几乎充满; 模糊子集 $\text{VS}_c, \text{S}_c, \text{M}_c, \text{B}_c$ 分别表示电动汽车充电需求很低、较低、较高、很高的情况; 模糊子集 VB_c 表示电动汽车的充电需求极高, 此时电池电量非常低。电动汽车允许放电电量 Q_d 与 Q_c 类似, 基本论域设置为 $[0, Q]$, 模糊论域为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 量化因子 $K_2 = 6/Q$, 对应的模糊子集为 $\{Z_d, \text{VS}_d, \text{S}_d, \text{M}_d, \text{B}_d, \text{VB}_d\}$ 。其中, 各模糊子集的含义与 Q_c 类似, 分别表示电动汽车允许的放电电量极少、很低、较低、较高、很高和极高的情况。

在通常情况下, 直流充电桩的充放电功率可以在 0 和额定功率之间连续调节, 而交流充电桩为开断式调节(即功率只能为 0 或额定功率)。因此需对接入直流或交流充电桩的电动汽车采用不同的模糊策略。对于直流充电桩而言, 其充电和放电功率的基本论域分别设置为 $[0, P_{nc}^{\text{DC}}]$ 和 $[0, P_{nd}^{\text{DC}}]$, 其中, P_{nc}^{DC} 和 P_{nd}^{DC} 分别为接入直流充电桩的电动汽车的额定充电功率和允许的最大放电功率。模糊论域设置为 $[0, 1, 2, 3, 4]$, 量化因子分别为 $K_3 = 5/P_{nc}^{\text{DC}}$ 以及 $K_4 = 5/P_{nd}^{\text{DC}}$, 对应的模糊子集为 $\{\text{ZE}_{\text{DC}}, \text{L}, \text{M}, \text{H}, \text{RP}_{\text{DC}}\}$ 。其中, 各模糊子集的含义分别表示电动汽车允许的充/放电功率为 0、较低、中等、较高和以额定功率充/放电的情况。对于交流充电桩而言, 充电和放电功率的基本论域分别设置为 $[0, P_{nc}^{\text{AC}}]$ 和 $[0, P_{nd}^{\text{AC}}]$, 其中, P_{nc}^{AC} 和 P_{nd}^{AC} 分别为接入交流充电桩的电动汽车的额定充电和放电功率。将其模糊论域设置为 $[0, 1]$, 量化因子为 $K_5 = P_{nc}^{\text{AC}}$ 和 $K_6 = P_{nd}^{\text{AC}}$, 对应的模糊子集为 $\{\text{ZE}_{\text{AC}}, \text{RP}_{\text{AC}}\}$, $\text{ZE}_{\text{AC}}, \text{RP}_{\text{AC}}$ 分别表示充/放电功率为 0 和以额定功率充/放电的情况。

充放电模糊控制器的输入、输出量的隶属度均采用三角形隶属度函数描述, 其数学表达如式(6)所示。图 4 给出了功率差额 ΔP 的隶属度函数曲线^[16], 其他输入、输出量的隶属函数曲线见附录 A 中的图 A1—A6。

$$\mu = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (6)$$

其中,参数 a 和 c 为三角形的“脚”;参数 b 为三角形的“峰”。

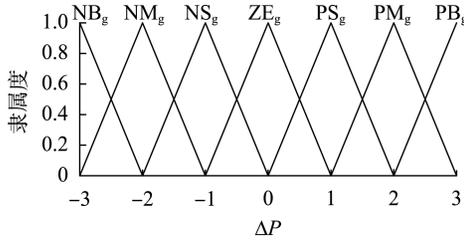


图 4 ΔP 的隶属度函数

Fig.4 Membership function of ΔP

模糊逻辑推理结果决定控制器的输出指令,不同的模糊逻辑推理规则会导致不同的控制效果。本文采用充电模糊控制器和放电模糊控制器这 2 个模糊控制器。充、放电模糊控制器的核心思想为:在满足用户需求的前提下,当负荷水平较高时,根据电动汽车电池的荷电状态设置电动汽车的充电功率处于较低的水平,放电功率处于较高的水平,避免在用电高峰时较多电动汽车充电而加剧功率缺额;当负荷水平较低时,设置电动汽车的充电功率处于较高的水平,消纳多余的电能。以下以直流充电桩为例介绍电动汽车的充、放电模糊控制规则及控制器原理,交流充电桩的控制规则及原理介绍详见附录 B。设计直流充电桩的充、放电模糊控制规则分别如表 1、表 2 所示。

表 1 直流充电桩的充电模糊控制规则

Table 1 Charging fuzzy control rules of DC charging pile

Q_c	ΔP						
	NB _g	NM _g	NS _g	ZE _g	PS _g	PM _g	PB _g
Z _c	ZE _{DC}						
VS _c	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	L	L	H
S _c	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	M	M	H
M _c	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	M	H	H
B _c	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	RP _{DC}	RP _{DC}	RP _{DC}
VB _c	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	RP _{DC}	RP _{DC}	RP _{DC}

表 2 直流充电桩的放电模糊控制规则

Table 2 Discharging fuzzy control rules of DC charging pile

Q_d	ΔP						
	NB _g	NM _g	NS _g	ZE _g	PS _g	PM _g	PB _g
Z _d	ZE _{DC}						
VS _d	M	L	L	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}
S _d	M	H	H	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}
M _d	RP _{DC}	RP _{DC}	H	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}
B _d	RP _{DC}	RP _{DC}	RP _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}
VB _d	RP _{DC}	RP _{DC}	RP _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}	ZE _{DC}

设定 p_c 和 p_d 分别为电动汽车的充电功率、放电功率,控制器可用上述 $N=42$ 条模糊规则进行描述,第 i 条模糊规则的输出为 u_i ,则输出表达式如式(7)所示。

$$\begin{cases} p_c = \frac{\sum_{i=1}^N v_{ic} u_{ic}}{\sum_{i=1}^N v_{ic}} P_{nc}^{DC}/5 \\ p_d = \frac{\sum_{i=1}^N v_{id} u_{id}}{\sum_{i=1}^N v_{id}} P_{nd}^{DC}/5 \end{cases} \quad (7)$$

其中, u_{ic} 、 u_{id} 分别为充、放电控制器中第 i 条规则的输出结果; v_{ic} 、 v_{id} 分别为充、放电控制器中第 i 条规则在总输出中所占据的权重,计算公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} v_{ic} = \prod_{l=1}^2 A_{lc}^i(x_c) \\ v_{id} = \prod_{l=1}^2 A_{ld}^i(x_d) \end{cases} \quad (8)$$

其中, x_c 、 x_d 分别为充、放电控制器的输入量; A_{lc}^i 、 A_{ld}^i 分别为充、放电控制器中输入量属于模糊集合 l 的第 i 条规则所对应模糊子集的隶属度, $l=1$ 表示模糊集合(Q_c/Q_d), $l=2$ 表示模糊集合(p_c/p_d)。

将充电模糊控制器输出的结果 p_c 与放电模糊控制器输出的结果 p_d 进行耦合可以得到功率指令 P_{ref} ,如式(9)所示。

$$P_{ref} = \sum (p_c - \alpha p_d) \quad (9)$$

其中, α 为电动汽车放电参与度因子。若区域电网不允许电动汽车放电,可将该因子置 0;若区域电网允许电动汽车放电,可根据电网对放电容忍度定义因子的取值。该值设定得越高,电动汽车放电的程度越高。一般情况下, α 的取值范围为 0.5~0.8。

2.3 有序充电调度系统运行流程

有序充电调度系统的运行流程如图 5 所示。

3 仿真验证

3.1 算例基础数据

图 6 为某区域配电变压器下的总基础负荷曲线。假设区域内的电动汽车数量为 500 辆,其中 200 辆接入交流充电桩,300 辆接入直流充电桩,电池的容量为 32 kW·h,假设充电站内交流充电桩的额定充/放电功率均为 7 kW,直流充电桩允许的最大放电功率为 5 kW,最大充电功率为 12 kW。根据文献[17]提出的基于蒙特卡洛方法的电动汽车出行链

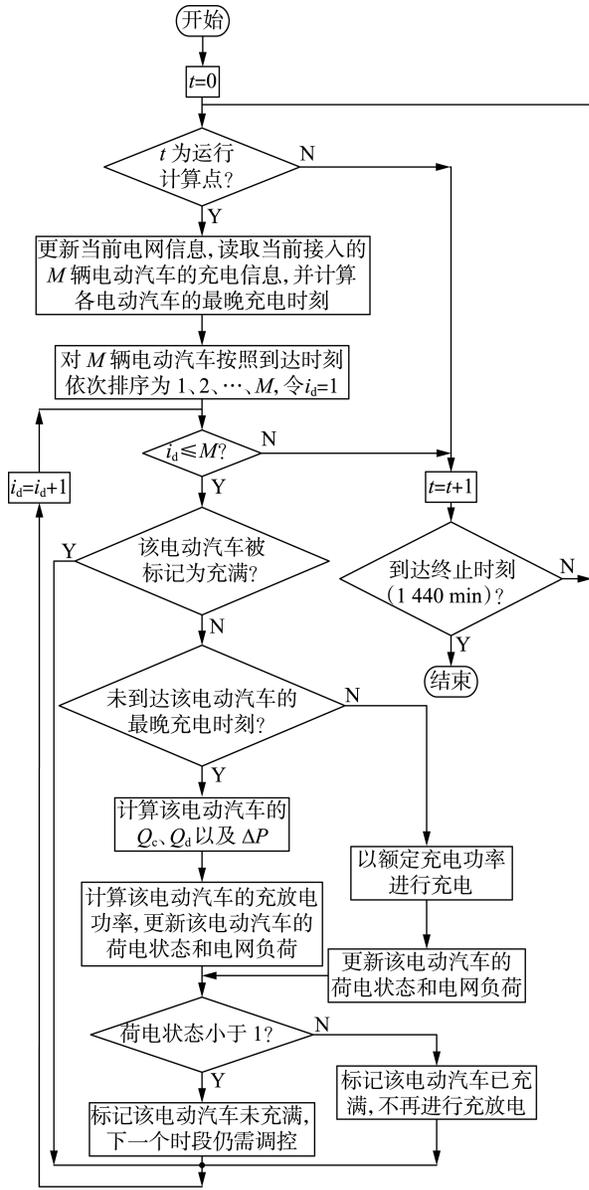


图 5 电动汽车有序充电调度流程

Fig.5 Flowchart of orderly charging dispatch of electric vehicles

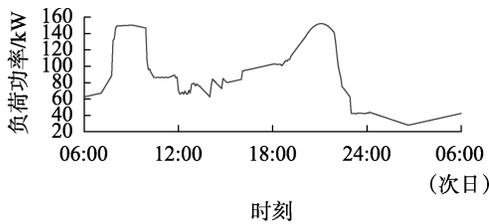


图 6 配电网基础负荷曲线

Fig.6 Basic load curve of a distribution network

模拟得出办公区、商业区和居民区内电动汽车的充电需求,具体方法见附录 C。

3.2 有序充电调度系统运行结果分析

图 7 给出了电动汽车即时充电方式、本文所提有序充电调度策略下配电网的负荷曲线。由图可看出,由于大量的电动汽车接入配电网,09:00—10:00、18:00—21:00 这 2 个时段内很容易产生负荷尖峰,

09:00—10:00 时段负荷高峰产生的原因为大量的电动汽车驶入工作地点附近的充电站进行充电,而 18:00—21:00 时段负荷高峰产生的原因为大量电动汽车驶入居住地附近的充电站进行充电。与此同时,这 2 个时段也为一天内负荷用电高峰期,大量电动汽车的接入也加剧了这一负荷尖峰。采用本文所提有序充电调度策略后,可以明显看到,在满足用户需求的前提下,负荷高峰时段接入的电动汽车的充电需求延后至负荷低谷时段,中午用电低谷和夜间用电低谷时段的负荷需求明显增加,该策略能够充分利用电网电能,使负荷曲线走势更为平稳,有利于电网的稳定运行。

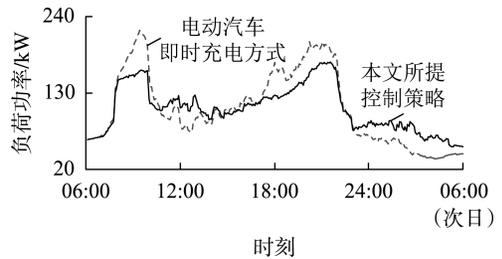
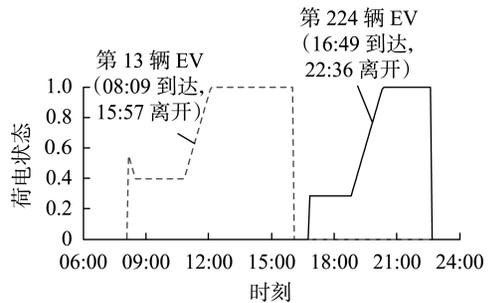


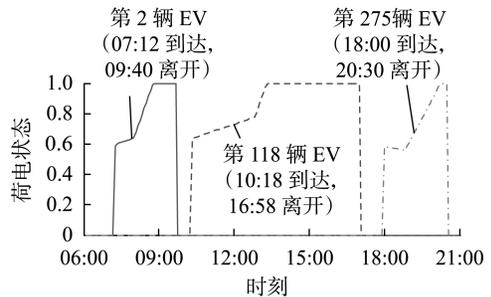
图 7 2 种策略下的配电网负荷曲线

Fig.7 Load curves of distribution network under two strategies

在即时充电方式下,电动汽车到达之后立即充电,充满电后停留在站内,没有充分利用电动汽车“分布式储能”的特性。图 8 给出了本文所提有序充电调度策略下部分接入电动汽车的荷电状态变化曲线。由图 8 可以看出,由于不同时段下接入电动汽车采用的充电桩类型、当前配电网的情况、充电需求、停留时间等方面的差异,有序充电调度系统安排的充电计划各不相同,但均能有效地利用电动汽车



(a) 接入交流充电桩的电动汽车



(b) 接入直流充电桩的电动汽车

图 8 部分电动汽车的荷电状态曲线

Fig.8 SOC curves of partial electric vehicles

的空闲时间,在规定的停留时间内完成充电任务。

综合图 7、8 可以看出,本文所提调度策略下的电动汽车在可调度时间段内以合适的充/放电功率进行充/放电,不仅避免了电动汽车长时间处于空闲状态,还能够为电网提供削峰填谷的服务。

此外,本文所提调度策略仿真模型的运行时间仅为 73.6 s,相较于 1 d 的 288 个时段,每个时段平均用时仅为 0.256 s,用时较少,因此适用于大规模电动汽车的在线控制。

表 3 和表 4 分别给出了各时段的电价情况以及不同策略下电动汽车的充电成本和最大峰谷差。结合表 6 和图 7 可以看出,一方面,本文所提控制策略下的电动汽车在负荷高峰很少产生充电行为,负荷高峰时段接入电动汽车的充电时间延迟至负荷低谷时段,从而在一定程度上降低了充电成本;另一方面,本文所提控制策略下的最大峰谷差明显降低,负荷曲线走势也更加平稳,有利于电网的稳定经济运行。因此,本文所提控制策略不仅有效地降低了用户的充电成本,而且有效地降低了电网峰谷差,是一种双向有益的策略。

表 3 各时段电价

Table 3 Electricity price in each period

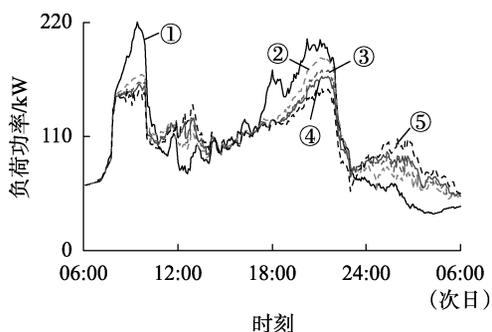
时段	电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	时段	电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
02:00—07:00	0.300	14:00—18:00	1.070
07:00—09:00	0.712	18:00—23:00	1.120
09:00—14:00	1.210	23:00 至 次日 02:00	0.712

表 4 不同策略下的最大峰谷差与充电成本

Table 4 Maximum peak-valley difference and charging cost under different strategies

策略	最大峰谷差/MW	充电成本/元
基础负荷	1.24	—
电动汽车即时充电方式	1.85	5 957.8
本文所提控制策略	1.17	5 359.3

图 9 对比了不同电动汽车参与度因子 α 下的负



- ① 电动汽车即时充电方式, ② 本文所提策略($\alpha=0$)
③ 本文所提策略($\alpha=0.5$), ④ 本文所提策略($\alpha=0.7$)
⑤ 本文所提策略($\alpha=1.1$)

图 9 不同 α 下的负荷曲线

Fig.9 Load curves under different values of α

荷曲线。从图中可以看出, α 越大,对电网削峰填谷的效果越好;但是当 α 的设定值过高时,容易在负荷低谷时引导大量电动汽车在该时段充电,从而形成新的负荷尖峰,负荷曲线波动较剧烈。因此,对参与度因子 α 的设置不宜过低或者过高,建议的取值范围为 0.5~0.8。

4 结论

V2G 技术是当前的研究热点,本文首先构建了 V2G 管理系统架构,然后从优化调度层面,对旨在抑制电网峰谷差及降低充电成本的电动汽车有序充电调度策略展开研究,并对提出的策略进行了验证,仿真结果表明:

(1) 本文所提基于模糊控制算法的电动汽车充放电调度模型对电动汽车的资源利用率高、优化计算速度快、运行效率高,适用于大规模电动汽车接入的情形;

(2) 本文制定的调度流程中,考虑先接入的电动汽车在进行充放电功率控制后,改变了电网的功率缺额状态,进而对后续接入电动汽车的控制产生影响的问题,克服了部分文献中未能考虑先接入的电动汽车对后续调度控制影响的不足;

(3) 本文采用的有序充电调度策略能够在满足电动汽车用户需求及尽可能降低充电成本的前提下,实现对电网削峰填谷的功能,同时可以有效地避免在电网负荷低谷时电动汽车大规模充电所产生的新负荷尖峰。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭建龙,文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):1-9,30. GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):1-9,30.
- [2] MOZINA C. Impact of green power distributed generation[J]. IEEE Industry Applications Magazine,2010,16(4):55-62.
- [3] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52. WANG Jian, WU Kuihua, LIU Zhizhen, et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-52.
- [4] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):2-10,29. ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):2-10,29.
- [5] 张颖达,刘念,张建华,等. 电动汽车换电站 V2G 运行对中压配电网故障特征的影响[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):55-61. ZHANG Yingda, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Impact of battery swap station using V2G technology on fault characteristics of medium voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):55-61.

- [6] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [7] 刘晓飞,张千帆. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电动技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan. Review of electric vehicle V2G technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [8] 翁国庆,黄飞腾,张有兵,等. 电动公交车电池集群参与海岛微网能量调度的 V2G 策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(10): 31-37.
WENG Guoqing, HUANG Feiteng, ZHANG Youbing, et al. V2G strategy for energy dispatch of island microgrid with EBBG [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 31-37.
- [9] THIRUGNANAM K, JOY T P E R, SINGH M, et al. Modeling and control of contactless based smart charging station in V2G scenario [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 337-348.
- [10] SINGH M, KUMAR P, KAR I. Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 565-577.
- [11] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(10):19-26.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicles with cost and capacity benefit analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 19-26.
- [12] 刘东奇,钟庆昌,王耀南,等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2): 544-557.
LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. A synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 544-557.
- [13] 李伟生. 基于 V2G 的电动汽车充放电优化调度策略研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
LI Weisheng. Research on optimal scheduling strategy of electric vehicle charging and discharging based on V2G [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [14] TORRES L M A, LOPES L A C, MORAN T L A, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [15] 高桂革. 模糊控制理论及其应用的发展[J]. 上海电机学院学报,2005,8(5):62-64,69.
GAO Guige. The theoretical and applicable development of fuzzy control [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2005, 8(5): 62-64, 69.
- [16] 郑浩鑫,郑宾,殷云华,等. 模糊 PID 数字控制器系统的仿真与设计[J]. 机械工程与自动化,2009(2):121-123.
ZHENG Haoxin, ZHENG Bin, YIN Yunhua, et al. Simulation and design of numeral fuzzy PID controller system [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(2): 121-123.
- [17] 温剑锋,陶顺,肖湘宁,等. 基于出行链随机模拟的电动汽车充电需求分析[J]. 电网技术,2015,39(6):1477-1484.
WEN Jianfeng, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.

作者简介:



张怡冰

张怡冰(1993—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与并网技术、电动汽车能量管理(**E-mail**: 2274705443@qq.com);

刘其辉(1974—),男,山东济南人,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电与并网技术及电动汽车与电网融合(**E-mail**: liuqihui@163.com);

洪晨威(1996—),男,江西景德镇人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与并网技术及电动汽车能量管理(**E-mail**: hong_chenwei@163.com);

唐光钰(1995—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制(**E-mail**: 1091698073@qq.com)

Charging and discharging dispatch strategy of regional V2G based on fuzzy control

ZHANG Yibing, LIU Qihui, HONG Chenwei, TANG Guangyu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A charging and discharging dispatch strategy of V2G (Vehicle-to-Grid) based on fuzzy control is proposed. Firstly, the overall structure of V2G management system is proposed, which is mainly composed of the ordered charging dispatch system and the control system of V2G converter. The former arranges the charging and discharging power of each charging pile reasonably to realize the auxiliary function of peak-load shifting. The latter responds to the power command issued by the upper dispatch system, controls the actual charging and discharging behavior, and provides a stable interface for power conversion and energy exchange. Then, in the ordered charging dispatch system, considering the load characteristics of the current distribution network, all electric vehicles connected to the charging station are dispatched and allocated, and the charging and discharging power is calculated by fuzzy control algorithm and then is distributed to each charging pile, so as to improve the load characteristics of the regional power grid and realize the auxiliary function of peak-load shifting. Finally, the simulation experiment indicates that, the proposed ordered charging dispatch system can fully utilize the flexibility of electric vehicle load while meeting the charging requirements of electric vehicles, and can not only realize the peak-load shifting for power grid, but also effectively avoid the problem of new load peak caused by the charging of a large number of electric vehicles in the load valley period of power grid.

Key words: electric vehicles; V2G; fuzzy control; ordered dispatch strategy; charging and discharging control

附录 A

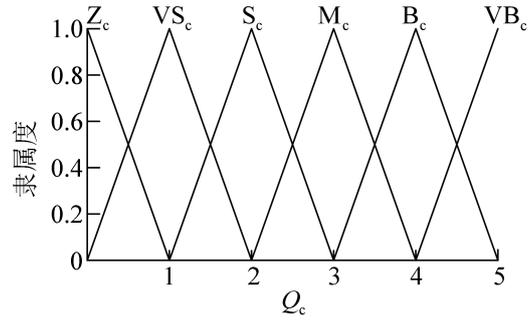


图 A1 Q_c 的隶属度函数
Fig.A1 Membership function of Q_c

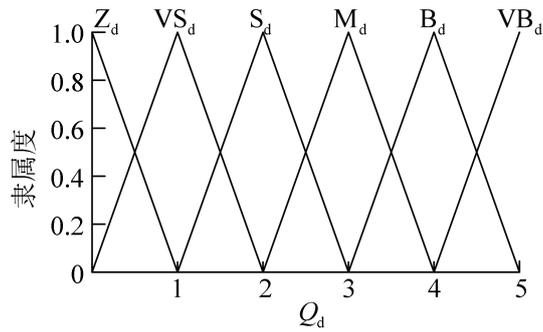


图 A2 Q_d 的隶属度函数
Fig.A2 Membership function of Q_d

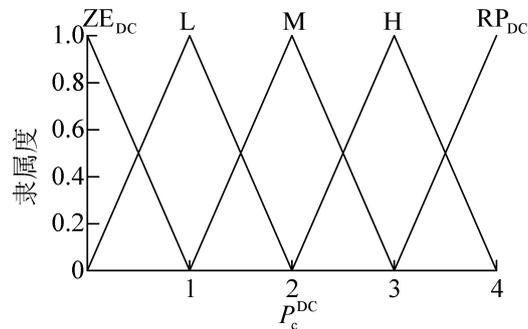


图 A3 P_c^{DC} 的隶属度函数
Fig.A3 Membership function of P_c^{DC}

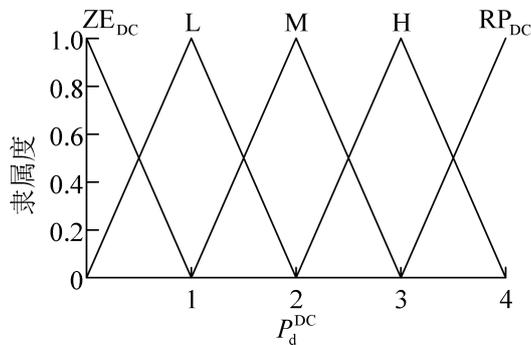


图 A4 P_d^{DC} 的隶属度函数
Fig.A4 Membership function of P_d^{DC}

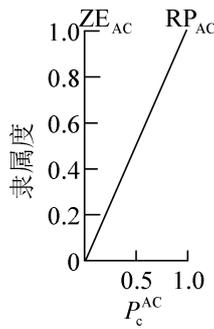


图 A5 P_c^{AC} 的隶属度函数

Fig.A5 Membership function of P_c^{AC}

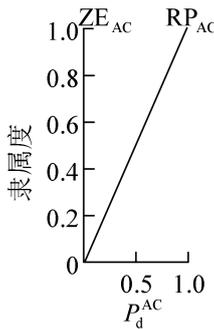


图 A6 P_d^{AC} 的隶属度函数

Fig.A6 Membership function of P_d^{AC}

附录 B

设计接入交流充电桩的电动汽车的充、放电模糊控制规则分别如表 B1、表 B2 所示。

表 B1 交流充电桩的充电模糊控制规则

Table B1 Charging fuzzy control rules of AC charging pile

Q_c	ΔP						
	NB _g	NM _g	NS _g	ZE _g	PS _g	PM _g	PB _g
Z _c	ZE _{AC}						
VS _c	ZE _{AC}	RP _{AC}					
S _c	ZE _{AC}	RP _{AC}					
M _c	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}
B _c	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}
VB _c	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}

表 B2 交流充电桩的放电模糊控制规则

Table B2 Discharging fuzzy control rules of DC charging pile

Q_d	ΔP						
	NB _g	NM _g	NS _g	ZE _g	PS _g	PM _g	PB _g
Z _d	ZE _{AC}						
VS _d	ZE _{AC}						
S _d	ZE _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}
M _d	RP _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}
B _d	RP _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}
VB _d	RP _{AC}	RP _{AC}	RP _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}	ZE _{AC}

设定 p_c 和 p_d 分别为接入交流充电桩的电动汽车的充电功率与放电功率，控制器可用上述 $N=42$ 条模糊规则进行描述，第 i 条模糊规则输出为 u_i ，则输出表达式如式 (B1) 所示。

$$\begin{cases} p_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^m v_{ic} u_{ic}}{\sum_{i=1}^m v_{ic}} P_{nc}^{AC} + 0.5 \right] \\ p_d = \left[\frac{\sum_{i=1}^m v_{id} u_{id}}{\sum_{i=1}^m v_{id}} P_{nd}^{AC} + 0.5 \right] \end{cases} \quad (B1)$$

式中, $[X+0.5]$ 表示对 X 进行四舍五入取整; u_{ic} 、 u_{id} 分别为充、放电控制器中第 i 条规则的输出结果; v_{ic} 、 v_{id} 分别为充、放电控制器中第 i 条规则在总输出中所占据的权重, 计算式如式 (B2) 所示; α 为电动汽车放电参与度因子; P_{nc}^{AC} 和 P_{nd}^{AC} 分别为接入交流充电桩的电动汽车的额定充、放电功率。

$$\begin{cases} v_{ic} = \prod_{l=1}^2 A_{ic}^l(x_c) \\ v_{id} = \prod_{l=1}^2 A_{id}^l(x_d) \end{cases} \quad (B2)$$

其中, x_c 、 x_d 分别为充、放电控制器的输入量; A_{ic}^l 和 A_{id}^l 分别为充、放电控制器中输入量属于模糊集合 l 的第 i 条规则所对应模糊子集的隶属度, $l=1$ 表示模糊集合 Q_c/Q_d , $l=2$ 表示模糊集合 p_c/p_d 。

将充、放电模糊控制器输出的结果 p_c 和 p_d 进行耦合可以得到交流功率指令 P_{ref}^{AC} , 如式 (B3) 所示。

$$P_{ref}^{AC} = \sum(p_c - p_d) \quad (B3)$$

附录 C

图 C1 为典型的以任意区域为始末点的出行链示意图, 模拟该过程即可得到时间和空间的特征量: 在出行前, 需模拟出行时刻; 在行程中, 需模拟行驶时长和行驶里程; 在每次行程的终点, 需确定电动车的到达时刻、停车时长、电池剩余电量。

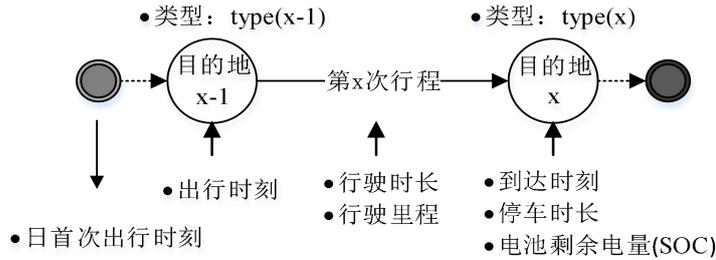


图 C1 出行链示意图

Fig.C1 Schematic diagram of trip chain

按照文献[18]提出的基于蒙特卡洛方法的出行链模拟用户一天出行的时间和空间特征量, 得出分别位于办公区、商业区、居民区 3 个充电站一天的电动汽车充电负荷数据。蒙特卡洛方法可简要分为 2 个步骤: 构造待模拟随机变量的概率分布以及生成服从该分布的样本值。

单个电动汽车用户一天的出行链模拟流程如下。

a. 抽取日首次出行时刻 t_0 (以家为起点)。首次出行时刻服从对数正态分布, 其概率密度函数为:

$$f(t_0) = \frac{1}{t_0 \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t_0 - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (C1)$$

其中, $\mu=2.23$, $\sigma=0.30$ 。

b. 抽取第 x 次行程的出行目的 D_x 。根据当前地点类型 D_{x-1} (首次出行出发点类型为住宅区) 及出行时刻, 在对应时刻的出行目的转移概率矩阵中抽取出行目的 D_x 。出行比重最大的 6 类目的为回家、购物、工作、休闲、接送及其他, 进一步将回家细化为回家逗留和结束出行, 则 D_x 的取值范围为 1~7。

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 0.1 & 0.65 & 0.02 & 0.2 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.05 & 0.1 & 0.5 & 0.05 & 0.15 & 0.05 \\ 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.6 & 0.05 & 0.03 & 0.01 \\ 0.07 & 0.05 & 0.05 & 0.4 & 0.15 & 0.25 & 0.03 \\ 0.05 & 0.04 & 0.2 & 0.5 & 0.15 & 0.01 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (C2)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.15 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.35 & 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.2 & 0.05 \\ 0.15 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.5 & 0.2 & 0.05 & 0.15 & 0.01 & 0.04 \\ 0.05 & 0.5 & 0.2 & 0.05 & 0.1 & 0.05 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (C3)$$

其中， \mathbf{H}_1 和 \mathbf{H}_2 分别为17:00之前和17:00之后车主出行目的转移概率矩阵。矩阵中的第 $x-1$ 行第 x 列的元素 $H_{x-1,x}$ 表示结束以 D_{x-1} 类型活动目的的停车行为且去往类型为 D_x 的活动区域的概率。

c. 抽取行驶时间 $t_{x-1,x}$ 。 $t_{x-1,x}$ 与行程的起、终点类型有关，基本服从对数正态分布，概率密度如式(C4)所示，参数以矩阵形式表示为式(C5)、(C6)。

$$f(t_{x-1,x}) = \frac{1}{t_{x-1,x} \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t_{x-1,x} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (C4)$$

$$\boldsymbol{\mu}_{TD} = \begin{bmatrix} 2.79 & 2.79 & 2.9 & 2.32 & 2.57 & 2.34 & 2.4 \\ 2.79 & 2.79 & 2.9 & 2.32 & 2.57 & 2.34 & 2.4 \\ 2.96 & 2.96 & 2.73 & 2.4 & 2.7 & 2.72 & 2.17 \\ 2.24 & 2.4 & 2.38 & 2.06 & 2.5 & 2.39 & 2.11 \\ 2.55 & 2.55 & 2.46 & 2.3 & 2.71 & 2.54 & 2.38 \\ 2.38 & 2.38 & 2.7 & 2.27 & 2.58 & 2.37 & 2.28 \\ 2.49 & 2.49 & 2.17 & 2.19 & 2.6 & 2.41 & 2.22 \end{bmatrix} \quad (C5)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{TD} = \begin{bmatrix} 0.81 & 0.81 & 0.76 & 0.75 & 0.88 & 0.78 & 0.77 \\ 0.81 & 0.81 & 0.76 & 0.75 & 0.88 & 0.78 & 0.77 \\ 0.79 & 0.79 & 0.92 & 0.84 & 0.87 & 0.79 & 0.75 \\ 0.75 & 0.75 & 0.88 & 0.87 & 0.96 & 0.83 & 0.94 \\ 0.82 & 0.82 & 0.81 & 0.79 & 1.05 & 0.81 & 0.8 \\ 0.81 & 0.81 & 0.82 & 0.81 & 0.95 & 0.82 & 0.8 \\ 0.78 & 0.78 & 0.79 & 0.92 & 0.96 & 0.79 & 0.99 \end{bmatrix} \quad (C6)$$

其中， $\boldsymbol{\mu}_{TD}$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_{TD}$ 中的第 $x-1$ 行第 x 列的元素 $\mu_{x-1,x}$ 和 $\sigma_{x-1,x}$ 分别表示结束以 D_{x-1} 类型活动目的的停车行为且去往类型为 D_x 的活动区域时所需的行驶时间概率密度的参数 μ 和 σ 。

d. 抽取行驶里程 $d_{x-1,x}$ ，其服从行驶时长 $t_{x-1,x}$ 条件下的正态分布 $N[0.4348t_{x-1,x}^{1.199}, (0.2431t_{x-1,x}^{1.132})^2]$ 。

e. 抽取停车时长 T_x 。根据目的类型 D_x 抽取在该目的地充电站的停车时长：当目的地类型为 D_1 （回家逗留）时，在居民区充电站停车时长满足 $N(2, 0.25^2)$ ；当目的地类型为 D_4 （办公）时，在办公区充电站停车时长满足 $N(5.5, 1^2)$ ；当目的地类型为 D_3 （购物）和 D_5 （休闲）时，按表C1所示概率抽取在商业区充电站的停车时长。

表 C1 商业区充电站停车时长的概率
Table C1 Probability of parking time in commercial charging station

停车时长/h	概率	停车时长/h	概率
0.5	0.18	2.5	0.10
1.0	0.25	3.0	0.05
1.5	0.22	3.5	0.02
2.0	0.15	4.0	0.03

f. 计算到达充电站时电动汽车的电池剩余SOC。每次停车后，从 $N(0.5, 0.1)$ 中抽取一个随机数，表征该用户

习惯充电的起始 SOC，若剩余 SOC 小于该值，则用户选择充电。充电的期望 SOC 设为 1。

$$\text{SOC}_x = \frac{B_{x-1} - ed_{x-1,x} / 100}{B} \quad (\text{C7})$$

其中， B 为电池的额定容量； B_{x-1} 为开始本次行程时的电池电量； e 为百公里耗电量。

g. 根据行驶时间 $t_{x-1,x}$ 计算到达充电站的时刻，根据停车时长 T_x 计算下次出行时刻。

h. 若 D_x 为 D_2 ，则代表一天出行结束，该车辆的出行链模拟完成；否则，返回步骤 **b**，继续循环。