

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190697

V2G 模式下微网电动汽车有序充电策略研究

陈明强¹, 高健飞¹, 畅国刚², 白飞²

(1. 许继电气股份有限公司智能供用电系统公司, 河南 许昌 461000; 2. 北京妙微科技有限公司, 北京 100102)

摘要: 为了应对 V2G(Vehicle-to-Grid)模式下大规模电动汽车接入给电网带来的诸多挑战, 针对现有电动汽车调度策略对大规模电动汽车充放电需求考虑不足的问题, 提出一种微电网电动汽车有序充电策略。调度策略可根据当前微电网负荷状态、电动汽车充电需求等实时数据, 采用模糊控制算法优化安排电动汽车充电计划, 满足电动汽车充电需求同时实现对电网的削峰填谷。利用该调度策略对某配电区域 600 辆电动汽车进行充电, 并与传统即时充电策略进行比较分析。仿真结果表明, 基于模糊控制算法的电动汽车有序充电策略能够有效避免大量电动汽车接入电网引起负荷尖峰的问题, 为电网提供削峰填谷的服务, 实现用户和电网的双赢。

关键词: 模糊控制; 电动汽车; 有序充电; 调度策略

Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model

CHEN Mingqiang¹, GAO Jianfei¹, CHANG Guogang², BAI Fei²

(1. Xuji Electric Co., Ltd. Intelligent Power Supply System Company, Xuchang 461000, China;

2. Beijing Miaowei Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: In order to cope with the challenges brought by the large-scale electric vehicle access to the grid under the Vehicle-to-Grid (V2G) mode, and aiming at the consideration of the charging and discharging requirements of large-scale electric vehicles using the existing electric vehicle dispatching strategy is insufficient, an orderly charging strategy for micro-grid electric vehicles is introduced. The scheduling strategy uses the fuzzy control algorithm to optimize the charging plan according to the current micro-grid load status, electric vehicle charging demand and other real-time data, to meet the electric vehicle charging demand and achieve peak-load shifting of the power grid. 600 electric vehicles in a power distribution area are charged using the proposed dispatch strategy. After that, the strategy is compared and analyzed with the traditional instant charging strategy. The simulation results show that this strategy can effectively avoid the problem of load spike caused by a large number of electric vehicles connected to the power grid and provide services for the power grid peak-load shifting to achieve a win-win situation for users and the power grid.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China “Smart Grid Technology and Equipment” “Key Technologies of Distributed PV Multi-terminal Connected to DC Distribution System and Equipment” (No. 2018YFB0904100).

Key words: fuzzy control; electric vehicle; orderly charging; dispatch strategy

0 引言

21 世纪以来, 能源危机和环境问题愈发严峻, 传统化石能源濒临枯竭。电动汽车作为新兴的绿色清洁的交通工具, 随着技术进步与发展, 在现代生

活中扮演着越来越重要的角色^[1-2]。由于电动汽车接入的随机性和不确定性, 大规模电动汽车接入威胁着电网安全稳定运行。

V2G(Vehicle-to-Grid)模式为电动汽车与电网开展良好互动提供行之有效的思路, 即在电网负荷需求较高时, 在满足用户需求的前提下将充电需求延后; 在电网负荷低谷时, 尽可能充分利用电能以较高充电功率进行充电。目前有关对 V2G 模式下电动汽车有序充电的研究中, 文献[3-4]提出一种采用分

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”专项(2018YFB0904100)“分布式光伏多端口接入直流配电系统关系技术和装备”

时动态电价来引导电动汽车有序充电的方法，能够实现电网的削峰填谷功能，但是其动态引导作用有限，而且容易在电价低谷时段引起充电高峰，不利于电网高效稳定运行；文献[5-6]提出一种以符合峰谷差最小为目标的充电概率分布模型，通过实时电价的引导实现对电网削峰填谷的功能，但是实时电价模型运行效率低，响应速度较慢。

V2G 模式下调度策略应当满足在线实时控制的需求，其调度模型应运行效率高，响应速度快，而目前部分研究采用的算法如粒子群算法等一般通过整体寻优方式求得最优充电计划，耗费时间较长^[7-8]；其次，调度模型需要符合实际 V2G 模式的需求，调度计划应充分考虑已确定的电动汽车充电计划对未来电动汽车充电计划的影响，如当前状态下已接入电动汽车已开始以较高功率充电，未来电动汽车的充电计划制定时应考虑接入电动汽车充电的影响^[9-10]，避免在负荷低谷时段大量电动汽车充电引起的充电尖峰问题^[11]。因此，考虑到上述问题，本文提出一种针对电动汽车大规模接入的实时在线有序充电策略。首先，介绍电动汽车出行负荷模拟的具体方法，其次，给出基于模糊控制的有序充电策略，实现对电网削峰填谷的功能；最后通过仿真算例验证策略的有效性。本文提出的策略不仅能够充分满足电动汽车用户的充电需求，而且能够实现对电网的削峰填谷，是一种双向有益的策略。

1 电动汽车充电负荷模拟方法

本文将某一配电区域的电动汽车充电区按照不同的充电类型分为居民区、办公区和商业区，进而模拟电动汽车负荷数据。考虑到电动汽车时空维度接入的随机性和不确定性^[12-14]，本文采用基于蒙特卡洛的出行链模型来模拟电动汽车的出行数据^[15]。其示意图如图 1 所示。从图中可以看出，电动汽车每次出行前需要模拟其出行时刻，抽取相应出行类型，模拟行驶时长和行驶距离，在出行终点处计算得到相应的到达时刻、停车时长以及相应电池状态。

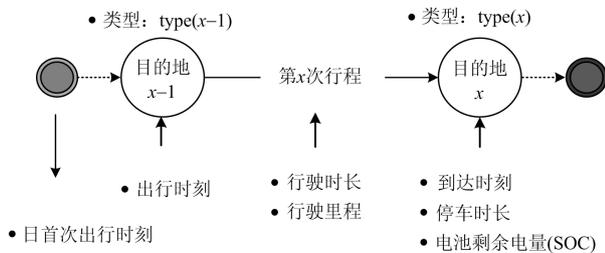


图 1 出行链示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the travel chain

根据上述模型，本文可以得到位于办公区、商业区和居民区的区域电动汽车充电负荷数据，出行链的模拟流程如下：

(1) 按照正态分布抽取首次出行时刻 t_0 。概率密度函数如式(1)所示。

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

式中： $\mu = 1.85$ ； $\sigma = 0.25$ 。

(2) 根据出行时刻的出行目的转移矩阵中抽取出行目的 D_x 。本文定义七类出行目的，分别为回家休息、商业中心、工作地、休闲地、公交站、结束出行及其他。转移矩阵如式(2)和式(3)所示，分别表示一天中晚上 6 点之前和晚上 6 点之后的目的转移矩阵。

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 0.1 & 0.65 & 0.02 & 0.2 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.05 & 0.1 & 0.5 & 0.05 & 0.15 & 0.05 \\ 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.6 & 0.05 & 0.03 & 0.01 \\ 0.07 & 0.05 & 0.05 & 0.4 & 0.15 & 0.25 & 0.03 \\ 0.05 & 0.04 & 0.2 & 0.5 & 0.15 & 0.01 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.15 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.35 & 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.2 & 0.05 \\ 0.15 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.5 & 0.2 & 0.05 & 0.15 & 0.01 & 0.04 \\ 0.05 & 0.5 & 0.2 & 0.05 & 0.1 & 0.05 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 按照对数正态分布抽取行驶时间，概率密度函数如式(4)所示，其参数与行驶的目的地有关，如式(5)和式(6)所示。

$$f(t_{x-1,x}) = \frac{1}{t_{x-1,x} \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t_{x-1,x} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$\mu_{TD} = \begin{bmatrix} 2.79 & 2.79 & 2.9 & 2.32 & 2.57 & 2.34 & 2.4 \\ 2.79 & 2.79 & 2.9 & 2.32 & 2.57 & 2.34 & 2.4 \\ 2.96 & 2.96 & 2.73 & 2.4 & 2.7 & 2.72 & 2.17 \\ 2.24 & 2.4 & 2.38 & 2.06 & 2.5 & 2.39 & 2.11 \\ 2.55 & 2.55 & 2.46 & 2.3 & 2.71 & 2.54 & 2.38 \\ 2.38 & 2.38 & 2.7 & 2.27 & 2.58 & 2.37 & 2.28 \\ 2.49 & 2.49 & 2.17 & 2.19 & 2.6 & 2.41 & 2.22 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\sigma_{TD} = \begin{bmatrix} 0.81 & 0.81 & 0.76 & 0.75 & 0.88 & 0.78 & 0.77 \\ 0.81 & 0.81 & 0.76 & 0.75 & 0.88 & 0.78 & 0.77 \\ 0.79 & 0.79 & 0.92 & 0.84 & 0.87 & 0.79 & 0.75 \\ 0.75 & 0.75 & 0.88 & 0.87 & 0.96 & 0.83 & 0.94 \\ 0.82 & 0.82 & 0.81 & 0.79 & 1.05 & 0.81 & 0.8 \\ 0.81 & 0.81 & 0.82 & 0.81 & 0.95 & 0.82 & 0.8 \\ 0.78 & 0.78 & 0.79 & 0.92 & 0.96 & 0.79 & 0.99 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(4) 分别按照行驶时长和目的地类型抽取行驶里程和停车时长。行驶里程和行驶时长服从正态分布 $N[0.4348 t_{x,x-1}^{1-199}, (0.2431 t_{x,x-1}^{1-132})^2]$, 而居民区、办公区和商业区的停车时长分别满足 $N(10, 0.25^2)$ 、 $N(5.5, 1^2)$ 和 $N(3.5, 1^2)$ 。

(5) 计算到达充电站电动汽车电池 SOC, 初始 SOC 满足 $N(0.5, 0.1^2)$ 。

(6) 根据行驶时间计算相应的到达时刻, 并根据停车时长计算下次出行时刻, 循环往复直至一天的出行结束。

2 电动汽车有序充电策略

考虑到无法准确预测电动汽车的接入时间和荷电状态, 一天中任何时段均有可能新接入电动汽车^[16-18]。因此, 本文以 15 min 为一个时段, 在每个时段的初始时刻更新电动汽车的接入信息以及当前时段配电网的电源出力、负荷需求等。如图 2 所示。

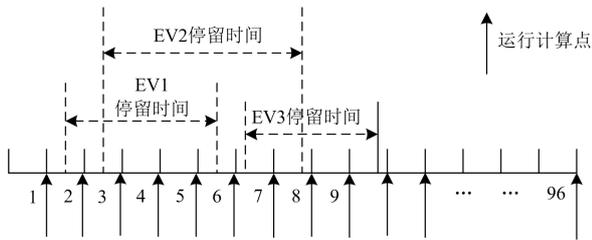


图 2 控制时段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the control period

2.1 电动汽车荷电状态计算

电动汽车到达充电站后根据用户意愿分为以下两类情况: 若用户在到达充电站时选择不排队, 则按照即时充电进行处理, 设置最晚充电时刻即为用户到达时刻, 记录初始充电 SOC; 若用户在到达充电站时选择排队, 则需要设定电动汽车的预计离开时刻。根据初始充电 SOC 可以计算出电池需要充电的电量 Q_c 。

$$\begin{cases} Q_c = Q(SOC_{\max} - SOC) & SOC < SOC_{\max} \\ 0 & SOC = SOC_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Q 为电池容量; SOC_{\max} 为电池充电上限, 一般为 1。

2.2 充电电量边界约束

对于选择不排队的电动汽车, 初始到达时刻即为最晚充电时刻; 而对于选择排队的电动汽车, 为了保证电动汽车能够在预设的时间内充满电, 需要统计电动汽车充电电量的上下界, 充电电量上下界之间的区域即为电动汽车充电计划的调度空间。电动汽车充电电量上界为电动汽车接入的下一控制时段立即开始以最大充电功率进行充电直至充电完成的累积电量; 电动汽车充电电量下界为电动汽车从最晚充电时段开始以最大充电功率进行充电直至预设的离开时刻刚好充满电量的累计电量。充电上下界的计算公式如式(8)、式(9)所示。

$$E_i^{\min}(k) = \begin{cases} (SOC_{\max} - SOC) \times Q & k = T_i + 1, \dots, J_i \\ \max(E_i^{\min}(k+1) - P\Delta t, 0) & k = 1, 2, \dots, T_i \end{cases} \quad (8)$$

$$E_i^{\max}(k) = \begin{cases} 0 & k = 0 \\ \min(E_i^{\max}(k-1) + P\Delta t, (SOC_{\max} - SOC) \times Q) & k = 1, 2, \dots, J_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: J_i 为电动汽车充满电时所在的控制时段; T_i 为电动汽车接入时的控制时段; P 为电动汽车最大充电功率。

因此, 累计电量上下界的表达式为

$$E_i^{\min}(k) = \sum E_{i,j}^{\min}(k) \quad k = 1, 2, \dots, J_{i,t} \quad (10)$$

$$E_i^{\max}(k) = \sum E_{i,j}^{\max}(k) \quad k = 1, 2, \dots, J_{i,t} \quad (11)$$

2.3 有序充电策略

本文制定的有序充电策略既考虑当前接入配电网供需情况, 同时分配的功率指令也与电池的荷电状态相关。考虑到实际中电网对电动汽车反向馈电的要求高, 反向馈电若控制不当对电网的不利影响很有可能远高于馈电带来的经济效益, 且对电网反向馈电涉及电池的充放电过程, 频繁放电对电池会产生较大的不利影响, 而实际应用通过合理的充电调度完全能够实现对电网辅助服务功能。因此在策略设计中暂不考虑放电情形。电网处于负荷高峰时段, 若停留时间较长, 则尽可能延后充电需求或者以较低的充电功率充电; 若电网处于负荷低谷时段, 则调度电动汽车以较高水平进行充电, 但是要考虑已接入电动汽车的功率限制, 防止较多电动汽车在此时段进行充电从而产生新的负荷尖峰。此外, 电动汽车充电功率指令也与当前电池的荷电状态 SOC 相关。若 SOC 较高, 则应以较低功率进行充电, 防止过充; 若电池 SOC 较低, 则允许充电的功率较高, 但是具体功率指令分配应和当前电网供需情况相适应。

根据以上分析, 本文有序充电的调度策略核心在于综合考虑当前电网供需情况、电池荷电情况以及电池的停留时长等方面的因素, 进而确定电动汽车的充电功率指令。本文采取模糊控制的算法来解决这一问题, 保证满足电动汽车车主充电需求的同时, 也实现对电网的削峰填谷。

设定 ΔP 为当前时段配电网电源出力与负荷需求之间的功率差值, 基本论域为 $[-200, 200]$, 模糊论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$, 量化因子 $K_1=3/200$, 对应的模糊子集为 $[NB_g, NM_g, NS_g, ZE_g, PS_g, PM_g, PB_g]$, 模糊子集中各元素依次表示电源出力非常不足、不足、稍不足、平衡、稍充裕、充裕、非常充裕的情况。

设定 Q_c 为电动汽车需要充电的电量, 基本论域为 $[0, Q]$, 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 $[Z_c, VS_c, S_c, M_c, B_c, VB_c]$ 。模糊子集中各元素依次表示电量需求无、很低、低、高、稍高、非常高的情况。

考虑到本文的应用场景, 所涉及的充电桩为直流连续可调的; 开断式交流充电桩仅为本文研究的特例, 在此不作讨论。设定电动汽车充电功率的基本论域为 $[0, P_{nc}]$, 其中, P_{nc} 为电动汽车最大充电功率, 模糊论域为 $[0, 1, 2, 3, 4]$, 量化因子为 $K_3=5/P_{nc}$, 对应的模糊子集为 $[ZE, L, M, H, RP]$ 。模糊子集各元素分别代表电动汽车充电功率零、低、高、较高和最大的情况。

功率缺额、需求电量和充电功率的特性均采用三角形隶属度函数来描述, 其数学表达式如式(12)所示。各隶属度函数图如图3—图5所示。

$$\mu = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (12)$$

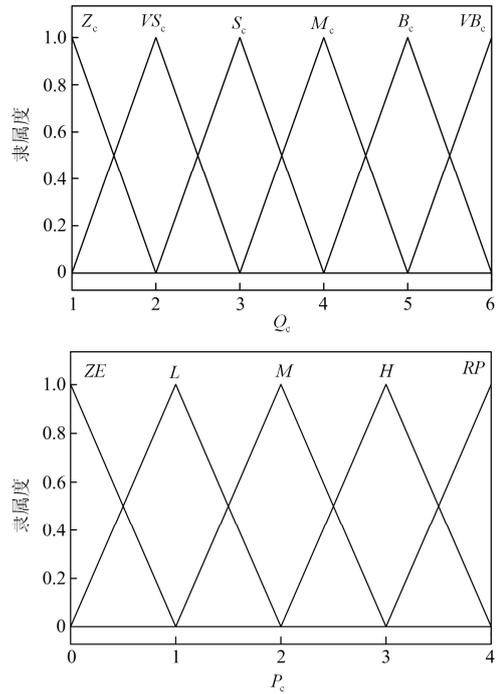
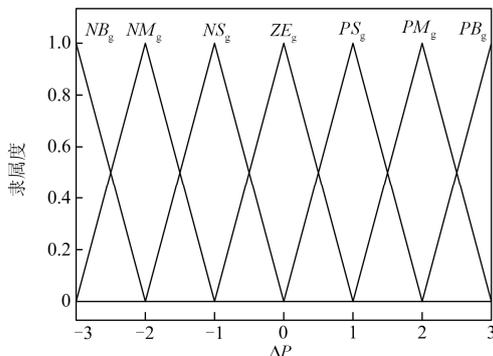


图3 隶属度函数曲线

Fig. 3 Membership function curve

之后, 根据本文有序充电调度策略的核心内容制定相应的模糊控制规则表。由前文分析可知, 电动汽车充电功率与电池电量需求情况和当前电网的供需情况均相关。当电网功率差额较高时, 尽可能将停留时间较长的电动汽车的充电需求延后; 若电网电源出力较充裕, 调度电动汽车吸收多余的电能。此外, 电动汽车在 SOC 较高时, 应以较低的功率进行充电, 防止过充。充电模糊控制规则表如表1所示。

表1 充电模糊控制规则

Table 1 Charging fuzzy control rules

Q_c	直流电动汽车充电功率						
	$\Delta P=$ NB_g	$\Delta P=$ NM_g	$\Delta P=$ NS_g	$\Delta P=$ ZE_g	$\Delta P=$ PS_g	$\Delta P=$ PM_g	$\Delta P=$ PB_g
Z_c	ZE						
VS_c	ZE	ZE	ZE	ZE	L	L	H
S_c	ZE	ZE	ZE	ZE	M	M	H
M_c	ZE	ZE	ZE	ZE	M	H	H
B_c	ZE	ZE	ZE	ZE	RP	RP	RP
VB_c	ZE	ZE	ZE	ZE	RP	RP	RP

根据以上模糊控制规则表, 可以得到输出表示式如式(13)所示。 u_{ic} 、 u_{id} 为充电功率规则表中第 i 条规则的输出结果, v_{ic} 、 v_{id} 分别为充电规则表中第 i 条规则在总输出中所占据的权重。

$$\left\{ \begin{array}{l} p_c = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ic} u_{ic}}{\sum_{i=1}^m v_{ic}} \cdot P_{nc} / 5 \\ p_d = \frac{\sum_{i=1}^n v_{id} u_{id}}{\sum_{i=1}^m v_{id}} \cdot P_{nd} / 5 \end{array} \right. \quad (13)$$

2.4 有序充电策略运行流程

本文提出的有序充电策略的运行流程如下所述:

- ① 判断 t 是否到达终止时刻, 若达到则直接结束; 若未达到进行②;
- ② 判断 t 是否为时段初始时刻;
- ③ 若非时段初始时刻, 则仿真时间继续累加, 返回①;

若为时段初始时刻, 则

1) 获取当前时段电源出力以及负荷信息, 统计截止到当前时段已经接入的 N 辆电动汽车的信息, 计算累计电量上下限和最晚充电时刻。

2) 对已接入的 N 辆电动汽车按照到达时刻进行排序, 依次根据模糊控制算法计算各个电动汽车的充放电功率:

a) 判断是否到达最晚充电时刻。

b) 若到达最晚充电时刻, 则以额定最大充电功率为充电功率, 更新 SOC; 若未达到最晚充电时刻, 则进入模糊控制算法部分, 计算得到充放电功率, 更新 SOC。

c) 判断电动汽车的 SOC 是否充满, 若充满则标记不再充电。

d) 遍历所有已经接入的电动汽车后, 返回①。

3 仿真实验

设置某配电区域内电动汽车共有 600 辆, 电动汽车最大充电功率为 7 kW, 电池的最大容量为 30 kWh。根据 2.1 所述的电动汽车负荷模拟方法仿真得到电动汽车的出行数据^[19], 表 2 给出部分电动汽车的出行数据, 图 4 给出各个电动汽车充电区一天内的即时充电曲线, 从图中可以看出模拟的电动汽车负荷数据符合实际运行情况, 居民区白天充电需求较低, 夜间充电需求较高, 办公区和商业区白天充电需求高于夜间充电需求, 与实际情况相符。

图 5 给出分别采用即时充电和本文提出的有序充电的负荷曲线对比图, 由即时充电曲线可以看出,

电动汽车规模化接入电网充电, 可能会加剧负荷供需不平衡, 给电网经济稳定运行带来不利影响^[20-21]。本文提出的有序充电策略能够实现对电网的削峰填谷, 在满足用户需求的前提下, 尽可能在负荷低谷时段(如中午时段和晚上时段)充电, 有利于电网经济稳定运行。

表 2 部分电动汽车的出行数据表

Table 2 Travel data sheets for some electric vehicles

到达时刻/min	离开时刻/min	初始 SOC
77	391	0.394
82	288	0.445 8
119	549	0.678 6
122	578	0.358 4
320	556	0.491 4
321	433	0.318 7
322	413	0.432 9
623	863	0.681
636	914	0.554
639	699	0.359 3
949	1 573	0.557 2
950	1 709	0.446 6

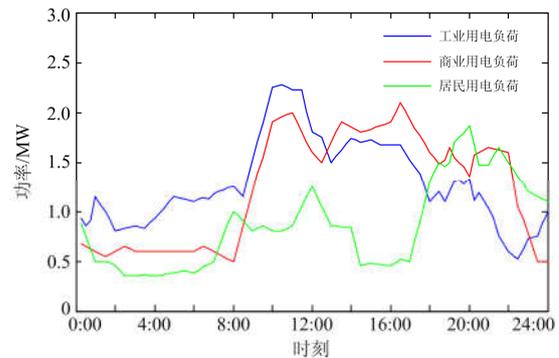


图 4 各充电区的充电曲线

Fig. 4 Charging curve of each charging zone

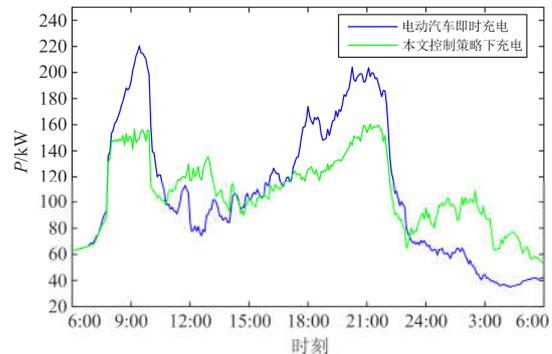
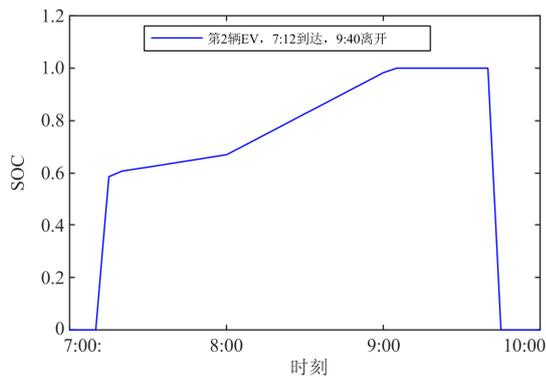


图 5 负荷曲线对比图

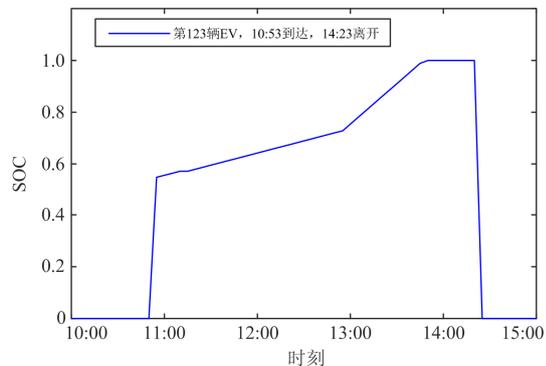
Fig. 5 Comparison of load curves

为了调研电动汽车车主的充电需求是否得到满足,图6给出本文策略下部分不同接入时刻、不同荷电状态的电动汽车的SOC变化曲线。从图6中可以看出:一方面,不同时段接入的电动汽车均能在预设的充电时间内充满,表明本文提出的充电策略能够满足电动汽车用户的充电需求,验证了策略的有效性和实用性;另一方面,不同时段接入的电动汽车由于初始接入的时段不同、初始电量不同以及不同时段配电网用电负荷不同,各电动汽车的充电曲线也有所不同。如图6(a)中电动汽车于7:12接入,由于此时有较多电动汽车接入,如果大量集中充电会出现图5所示的充电尖峰,因此,电动汽车的充电功率较低(充电负荷曲线的斜率体现充电功率高低,斜率越低,充电功率越低);图6(c)中电动汽车于22:45到达,此时电网处于夜间用电低谷时段,因此电动汽车以较高功率充电(图6(c)斜率很高),充分利用电能,提高电网运行效率。因此,电动汽车均能够在停留时间段内满足充电需求,充分利用电动汽车“移动储能特性”,提高电网运行效率。

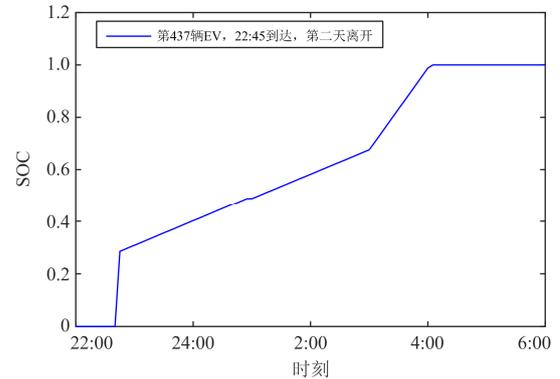
此外,本文采用峰谷电价来计算电动汽车的充电成本问题,通过表4可以看出,本策略下电动汽车在高峰时段电动汽车的充电行为减少,降低了用电成本,有益于电动汽车车主减少成本,更加积极参与V2G电网互动。



(a) 第2辆到达汽车SOC曲线



(b) 第123辆到达汽车SOC曲线



(c) 第275辆到达汽车SOC曲线

图6 部分电动汽车SOC曲线

Fig. 6 SOC curve of partial electric vehicles

表4 峰谷差与充电成本对比

Table 4 Comparison of peak-to-valley difference and charging cost

	基础负荷	即时充电	本文策略
最大峰谷差/MW	1.35	2.24	1.68
充电成本/元	—	5 879.4	5 138.2

4 结论

本文针对现有V2G模式下有序充电调度策略的不足,提出一种针对规模化电动汽车在线有序充电策略,该方法克服以往算法存在的耗时长^[22]、找不到寻优结果等缺点^[23-26],鲁棒性和适应性优越,计算效率高,运行速度快,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功能。通过仿真算例分析表明,该方法能够有效避免大量电动汽车接入电网引起的负荷尖峰问题,为电网提供削峰填谷的服务,降低充电成本,实现用户和电网的双赢。本文所述的方法和传统电动汽车充电策略相比,具有以下优势:

(1) 策略以当前的电网实际情况和EV充电需求为依据,不依赖预测数据,运算速度快,适宜对电动汽车进行在线实时控制。

(2) 策略采取模糊控制算法,对某配电区域所有电动汽车进行有序控制,突破充电站的地理位置的限制,实现不同地点信息互连的充电站之间能量流动协调优化。

(3) 策略研究的电动汽车充电负荷涵盖更广泛,包括居民区、工作区、商业区等具有可调度空间充电负荷,能够适应不同类型充电负荷的充电需求。

(4) 本文采取的充电策略符合实际V2G模式的需求,调度计划应充分考虑已确定的电动汽车充电计划对未来电动汽车充电计划的影响,将当前确定

的充电计划纳入负荷并在下一时段及时更新, 有效避免在负荷低谷时段大量电动汽车充电引起的充电尖峰问题。

参考文献

- [1] ZHENG J, WANG X, MEN K, et al. Aggregation model-based optimization for electric vehicle charging strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1058-1066.
- [2] MA Z, CALLAWAY D S, HISKENS L A. Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 67-78.
- [3] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3638-3646.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [4] YANG H, YANG S, XU Y, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 657-666.
- [5] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于集群响应的规模化电动汽车充电优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 43-48.
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. Optimal charging scheduling for massive electric vehicles based on cluster response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 43-48.
- [6] YANG H, YANG S, XU Y, et al. Electric vehicle route optimization considering time-of-use electricity price by learnable partheno-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 657-666.
- [7] YAO W F, ZHAO J H, WEN F S, et al. A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2768-2778.
- [8] FRANCO J F, RIDER M J, ROMERO R. A mixed-integer linear programming model for the electric vehicle charging coordination problem in unbalanced electrical distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2200-2210.
- [9] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Planning of electric vehicle charging station considering voltage stability and charging service quality[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [10] 李秋硕. 电动汽车接入电网的电能有序利用模型与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LI Qiushuo. Research on models and strategies of electric energy coordinated consumption with electric vehicles integrated in power system[D]. Beijing: North China Electrical Power University, 2014.
- [11] 温剑锋, 陶顺, 肖湘宁. 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. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.
- [13] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [14] LIU Hong, GE Shaoyun. Optimization of TOU price of electricity based on electric vehicle orderly charge[C] // 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 1-5.
- [15] ZHAN K, HU Z, SONG Y, et al. A probability transition matrix based decentralized electric vehicle charging method for load valley filling[J]. Electric Power Systems Research, 2015(125): 1-7.
- [16] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2316-2321.
GE Shaoyun, WANG Long, LIU Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-interval considering vehicle-to-grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2316-2321.
- [17] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134.
YAN Jun, YAN Feng. The ordered charge and discharge strategy of resident electric vehicles under the background of time-of-frequency electricity price[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 127-134.
- [18] 钱甜甜, 李亚平, 郭晓蕊, 等. 基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估[J]. 电力系

- 统保护与控制, 2018, 46(23): 127-134.
- QIAN Tiantian, LI Yaping, GUO Xiaorui, et al. Charging power calculation and demand response potential evaluation of electric vehicles based on spatiotemporal activity model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 127-134.
- [19] 陈蓉璐, 何永秀, 陈奋开, 等. 基于系统动力学和蒙特卡洛模拟的电动汽车日负荷远期预测[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 126-134.
- CHEN Rongju, HE Yongxiu, CHEN Fenkai, et al. Long-term daily load forecast of electric vehicle based on system dynamics and Monte Carlo simulation[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 126-134.
- [20] 张旻, 彭梦妮, 夏向阳, 等. 新能源电动汽车参与电网频率控制研究[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 173-178.
- ZHANG Min, PENG Mengni, XIA Xiangyang, et al. Study on the control of new energy electric vehicles participating frequency regulation of the grid[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 173-178.
- [21] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.
- ZHANG Liang, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973.
- [22] HU Z, ZHAN K, ZHANG H, et al. Pricing mechanisms design for guiding electric vehicle charging to fill load valley[J]. Applied Energy, 2016(178): 155-163.
- [23] ZHAN K, HU Z, SONG Y, et al. A probability transition matrix based decentralized electric vehicle charging method for load valley filling[J]. Electric Power Systems Research, 2015(125): 1-7.
- [24] 杨晓东, 张有兵, 蒋杨昌, 等. 微电网下考虑分布式电源消纳的电动汽车互动响应控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 390-400.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, JIANG Yangchang, et al. Renewable energy accommodation-based strategy for electric vehicle considering dynamic interaction in microgrid[J]. Transactions of CHINA Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 390-400.
- [25] 王威, 贺旭, 王晴, 等. 电动汽车充电对电网负荷和电气设备的影响[J]. 供用电, 2018, 35(9): 79-84.
- WANG Wei, HE Xu, WANG Qing, et al. Impacts of electric vehicles charging on grid load and electrical equipment[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9): 79-84.
- [26] 董进军, 熊铜林, 杨洪朝, 等. 兼顾电价机制与物流配送需求的电动汽车充电策略[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 115-119.
- DONG Jinjun, XIONG Tonglin, YANG Hongchao, et al. Research on charging strategy of electric vehicle considering the price mechanism and logistics distribution demand[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 115-119.

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-07-28

作者简介:

陈明强(1965—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统及自动化; E-mail: mingqiangch@139.com

高健飞(1980—), 男, 本科, 研究方向为电力自动化; E-mail: jianfei.gao@picohood.com

畅国刚(1985—), 硕士研究生, 研究方向为控制科学与控制工程。E-mail: guogang.chang@picohood.com

(编辑 张爱琴)