DOI: 10.7667/PSPC171523

基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略

王闪闪[1]，赵晋斌[1]，毛 玲[1]，刘 琛[1]，王晓晶[2]

(1.上海电力学院电气工程学院，上海 200090；2.武汉纺织大学，湖北 武汉 430200)

摘要：直流微电网中的分布式电源和负荷的功率双波动特性会导致直流母线电压变化，影响微电网的稳定运行。而电动汽车具有灵活的移动储能特性，可作为常规储能设备的补充，有效改善电压质量。为此，首先结合车和电池的运行特性，对电动汽车进行建模。其次，基于此模型，提出一种兼顾用户侧和微电网侧的电动汽车充放电控制策略。通过设定电池荷电状态滞环区间和直流微电网母线电压波动阈值范围，在满足用户用车需求的前提下，最大限度发挥电动汽车的储能特性，稳定直流母线电压。最后，通过仿真验证了所提出的电动汽车模型和充放电控制策略的有效性与可行性。

关键词：直流微电网；移动储能；电动汽车；运行特性；充放电控制；母线电压

A control strategy based on mobile energy storage characteristic of electric vehicles in DC micro-grid

WANG Shanshan[1], ZHAO Jinbin[1], MAO Ling[1], LIU Chen[1], WANG Xiaojing[2]

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: Both power fluctuations of distributed power supply and load in DC micro-grid will cause the deviation of DC bus voltage and influence the stability of micro-grid. Electric Vehicles (EVs), with the flexible mobile energy storage characteristic, can be utilized as the supplement of the conventional energy storage device to improve voltage quality effectively. Firstly, a model of EVs combined with operating status of EVs and battery is proposed. Secondly, based on this model and considering the need of the users as well as micro-grid, a control strategy of charge and discharge is put forward. By setting the battery charged state hysteresis interval and DC micro-grid bus voltage fluctuation threshold range, EVs' energy storage property is played furthest in stabilizing the DC bus voltage on the premise of users' requirements. Finally, the validity and feasibility of proposed model and control strategy of charge and discharge of EVs are validated through the simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777120).

Key words: DC micro-grid; mobile energy storage; electric vehicles (EVs); operating status; charge and discharge control; bus voltage

0 引言

微电网是未来智能配用电系统的重要组成部分，对推进节能减排和实现能源可持续发展具有重要意义。相对于交流微电网，直流微电网以其简单、经济、高效等优点成为未来家庭和楼宇的主要供电架构[1-2]。由于分布式可再生能源发电和负荷固有的波动性和随机性，通常需要配置常规储能装置(包括飞轮、超级电容、蓄电池组等)，但配置足够大容量的储能装置会存在购置价格昂贵、维护成本高等问题[3-4]。此外，当微网内负荷对电压质量要求高时，由于常规储能装置的固定性和容量的有限性，需要辅助的移动储能设备给予补充。电动汽车(Electric Vehicles, EVs)作为一种常见的移动储能装置，相对于常规储能，具有更大的灵活性。据统计电动汽车一天中有超过90%的时间是被闲置的[5]，将高闲置率的电动汽车接入含可再生能源发电的直流微电网，可实现电动汽车与微电网的互动(Vehicle-to-micro-grid, V2M)[6-7]，从而提高微电网整体的经济和环境效益。

基金项目：国家自然科学基金项目资助(51777120)

文献[8]基于电动汽车的移动负荷和储能特性，提出含电动汽车的微电网储能容量工程化配置方法和运行管理模式，降低微电网综合成本。文献[9]在满足电池约束、电网约束和车主约束的基础上提出了电动汽车分布式储能的控制策略，提高可再生能源可调度性的同时，降低电动汽车充放电切换次数，从而减缓电动汽车动力电池寿命的衰减。文献[10]考虑每辆电动汽车的出行规律、电池状态、用户意愿等因素，提出大规模电动汽车有序充电策略，但未体现出电动汽车的移动储能特性。文献[11]在风光储的交流微电网系统中，提出一种动态电价调整策略，充分调度电动汽车参与微电网的调度，并将电动汽车无序充电和有序充放电情况下微电网的等效负荷以及储能运行情况进行了对比。

以上文献主要从电动汽车接入电网时的成本及优化调度方面展开，未虑及较具体的电动汽车运行状态或未体现电动汽车的移动储能特性。本文基于电动汽车灵活的移动储能特性，考虑车和储能电池的运行状态，讨论电动汽车参与微电网调节的过程。首先对电动汽车的运行状态建模，其次兼顾微电网和用户两方面需求，根据母线电压波动情况，结合电动汽车荷电状态，提出电动汽车充放电控制策略，不仅平抑直流母线电压波动、减小常规储能配置，而且满足用户正常用车需求。最后，通过仿真验证了所提出的电动汽车模型和充放电控制策略的有效性与可行性。

1　基于风光储和电动汽车的直流微电网系统

微电网是一种将分布式发电、储能装置及负载集成在一起的新型能源系统，既可与大电网并网运行，也可独立运行[12-13]。图1为含有风光储和电动汽车的直流微电网系统。

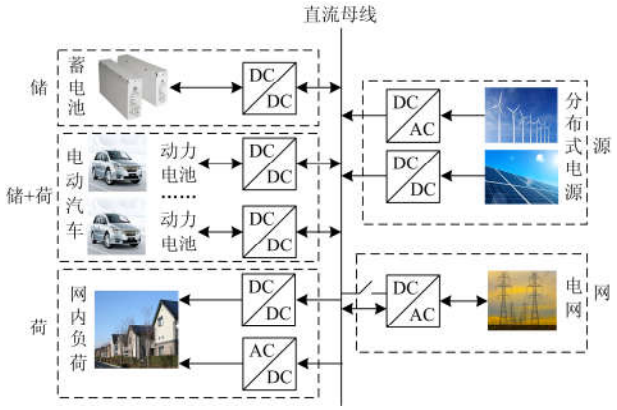


图 1　直流微电网系统

Fig. 1 System of DC micro-grid

直流微电网中分布式电源和负荷的功率波动，会致使网内功率不平衡，导致母线电压变化，通常接入储能设备维持系统功率平衡。图2为直流微电网中分布式电源和负荷波动的不平衡功率。

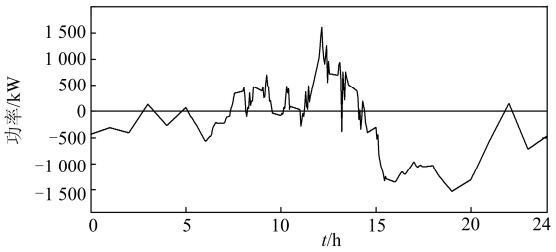


图 2　直流微电网中的不平衡功率

Fig. 2 Unbalanced power in DC micro-grid

电动汽车具有负荷和储能的双重特性[14]，在接入微电网时进行适当的充放电控制，可作为常规储能的补充，平复由可再生能源和负荷波动引起的功率不平衡[15]。电动汽车参与维持电网电压的稳定，不仅能使车主收益，还能减小常规储能设备的出力，降低储能配置，从而使直流微电网的整体成本降低。

2　电动汽车与微电网互动的控制策略

2.1　电动汽车运行状态建模

本文以纯电动汽车为对象建立模型，下文提到的电动汽车均为纯电动汽车。荷电状态(State of Charge, SOC)是反映纯电动汽车电池特性的重要参数[16-17]。但电动汽车本身具有灵活的移动性，在搭建电动汽车模型时，不能忽略车的状态。电动汽车的运行状态分为三种，如表 1 所示。对应位置上的变化表现为离网和入网，对应时间上的变化表现为荷电状态的变化。本文以插入微网状态和荷电状态为变量描述电动汽车的运行状态，用 0-1 表示电动汽车插入微网状态，0 表示离开微网，1 表示接入微网。用 SOC 表示电动汽车荷电状态。

表 1　电动汽车的三种运行状态

Table 1 Three operating status of the electric vehicles

电动汽车运行状态	插入状态	SOC	是否参与微网调节
行驶状态	0	减少	否(离网)
静止不接入电网	0	不变	否(离网)
静止接入电网	1	增加或减少	是(入网)

电动汽车在离网状态时不参与微网调节，电动汽车入网时充电到所需状态后，根据网内波动情况协调参与微网调节。电动汽车接入微网充电时的荷电状态变化与电池充电方式有关。一般电池采用三段式充电方法进行充电，充电特性曲线可近似为恒

功率，本文假设电动汽车以恒定功率 P_k 充电[18]，给定电动汽车起始荷电状态 SOC_0，电动汽车接入微网时的 SOC 变化可表示为

$$SOC = \frac{Q_0 \pm \int_0^t P_k \mathrm{d}t}{Q_N} \tag{1}$$

$$Q_0 = SOC_0 \times Q_N \tag{2}$$

式中：P_k 为充电或调节的功率，单位为 kW，k=0 表示充电，k=1 表示调节；Q_N 为电动汽车的额定容量，单位为 kWh。

由式(1)、式(2)可得所需的充电时长为

$$t = \frac{Q_N \times (SOC_r - SOC_0)}{P_k} \tag{3}$$

式中：SOC_r 为用户需求的荷电状态。

未来电动汽车大规模发展，假设电动汽车充放电设施健全，电动汽车用户到达某场所后即可插入充电桩，离开时拔出。本文以私家车为例，对电动汽车建模。休息日，有电动汽车一直接入微电网。工作日，根据私家车上下班时间的出行规律[19]，到达工商业区充电及离开的时间分别近似服从正态分布 $N(9, 0.5^2)$和 $N(18, 0.5^2)$，到达居住区充电及离开的时间分别近似服从正态分布 $N(19, 1.5^2)$和 $N(7, 0.5^2)$，则电动汽车的模型如图 3、图 4 所示。

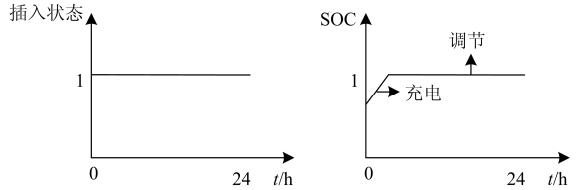


图 3 休息日电动汽车的运行状态模型

Fig. 3 Operating status model of the EVs on the weekend

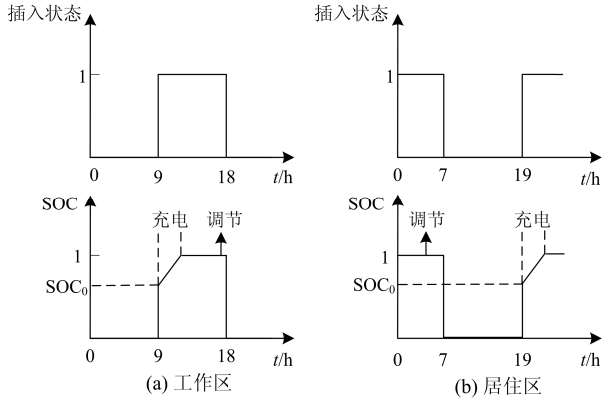


图 4 工作日电动汽车的运行状态模型

Fig. 4 Operating status model of the EVs on the workday

2.2 电动汽车充放电控制策略

本文在电动汽车运行状态的基础上搭建模型，制定充放电控制策略。电动汽车分布式控制框图如图5所示。电动汽车插入状态与SOC_0即可表示电动汽车当前的运行状态。电动汽车接入充电桩后，实时检测电动汽车SOC，根据SOC的大小以及设置充电或调节的上下限范围，选择相应的工作模式。当电动汽车处于调节模式时，若检测到直流母线电压的波动超出设置的阈值范围，则电动汽车与储能电池一起抑制直流母线电压的波动。其中接有电动汽车的充电桩之间无信息传递，仅利用本地信息即可实现自主调节。提出的电动汽车充放电控制策略兼顾用户侧和微网侧两方面的需求。

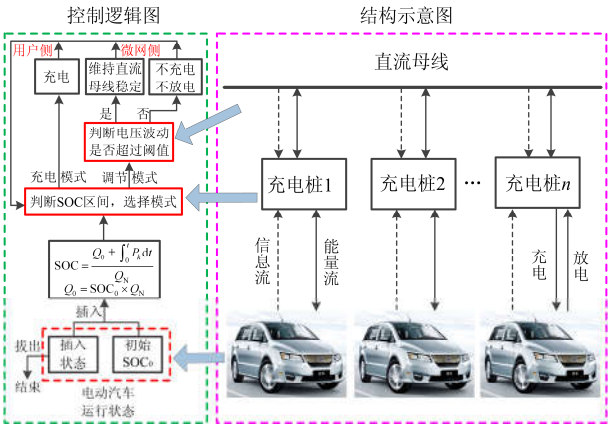


图 5 电动汽车分布式控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of the distributed control strategy of the EVs

从用户侧的角度出发，若要保证电动汽车用户正常需求下参与微网调节，电动汽车电池的荷电状态需要设置充电和调节界限，使其按照滞环控制策略参与电网互动，如图6所示。

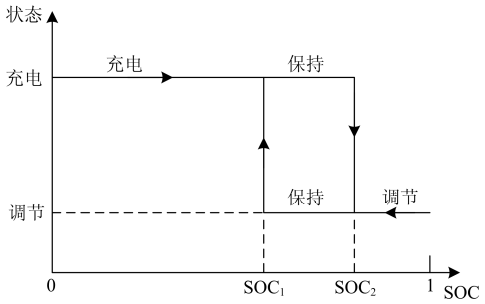


图 6 考虑用户需求的滞环控制策略

Fig. 6 Hysteresis control strategy considering the user

电动汽车的荷电状态在低于下限SOC_1时充电，在高于上限SOC_2时参与电网调节，荷电状态介于SOC_1~SOC_2时，保持上一时刻状态，充电或调节。其中若电动汽车接入微网的初始时刻，荷电状态介于SOC_1~SOC_2，优先考虑微网稳定性，电动汽车处于调节状态，即按照滞环特性，避免充电和调节之

间的频繁切换，提高系统稳定性。

临界点SOC_1与SOC_2的选择需要兼顾电动汽车电池状态和用户行为习惯。由于电动汽车过充过放对电池寿命产生不良影响，所以电池组SOC在使用过程中一般被限定在某一范围内(如30%~90%)[20]，本文设置充电上限SOC_2为90%。

将美国交通部对全美家用车辆的调查结果进行分析，服从对数正态分布，电动汽车最大续驶里程为 300 km，一般电动汽车用户的日行驶里程与起始充电荷电状态成线性反相关[21]。本文将电动汽车起始充电荷电状态的概率密度表示在图 7 中，从图中计算得出，经过一天的行驶，荷电状态高于 0.7 的用户占 87.9%，荷电状态高于 0.8 的用户占 76.1%。考虑电池寿命和用户需求，将电动汽车达到充电时的下限 SOC_1 设置为 80%，用户根据自身情况可以设定参与调节的区间宽度，若 SOC_1 与 SOC_2 区间设置过大，则电动汽车参与调节时充放电次数多，对电池寿命不利。

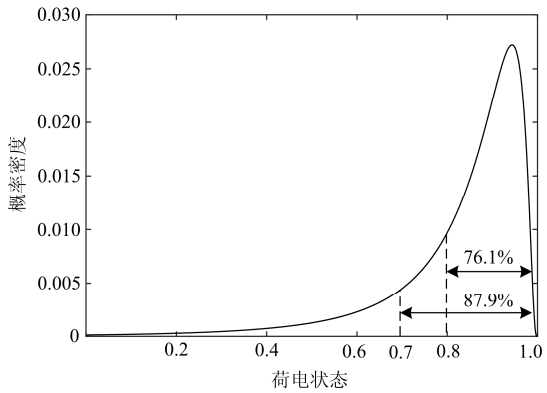


图 7 电动汽车起始充电荷电状态概率密度

Fig. 7 Probability density of initial charging state of EVs

从微网侧的角度出发，当电动汽车的荷电状态满足调节条件时，根据母线电压 U_{dc} 与参考电压 U_{ref} 比较结果，若差值超出设置的波动阈值 U_r，电动汽车需作为常规储能的补充参与调节，否则电动汽车等待，既不充电又不放电，如图 8 所示。

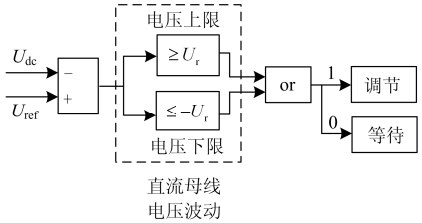


图 8 考虑微网的控制策略

Fig. 8 Control strategy considering the micro-grid

图 8 输出为 1 表示电压波动超过上下限，输出为 0 表示电压波动未超过设置的上下限。U_r 设置太大，电动汽车的储能特性发挥不充分；U_r 设置太小，电动汽车充放电次数多，对电池寿命不利。根据直流电网电压偏差限值建议[22]，低压 400 V 允许电压偏差为标称电压的 +10%、−20%，但是，为提高直流母线电压的质量，保证系统内负荷稳定运行，将控制范围缩小，将母线电压波动的阈值 U_r 设置为标称电压的1.25%，即 5 V 。

电动汽车充放电控制策略流程如图 9 所示。

电动汽车在荷电状态低于下限SOC_1时充电；在荷电状态高于上限SOC_2且电网电压波动超过阈值时参与电网调节；若荷电状态高于上限SOC_2但电网电压波动不超过阈值，则电动汽车等待，既不充电也不放电；在荷电状态介于SOC_1~SOC_2时，保持上一时刻状态，充电或调节。

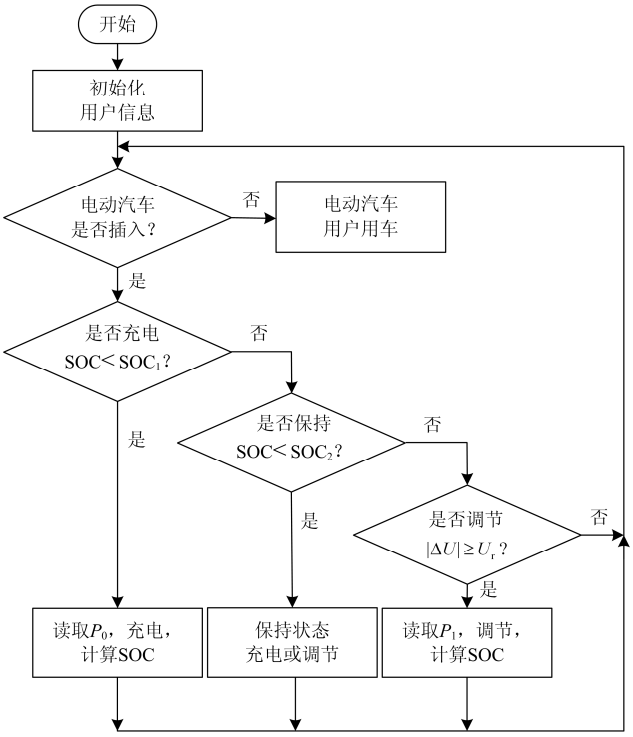


图 9 电动汽车充放电控制流程

Fig. 9 Diagram of the EVs charge and discharge control

3 仿真分析

根据第 1 节的电动汽车模型，在仿真软件 Matlab/Simulink 中搭建图 1 所示的直流微电网系统，以比亚迪 E6 为例，对文中所提的电动汽车模型和策略进行仿真验证。直流微电网中的仿真参数设置如表 2。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameters setting

参数	取值
直流母线参考电压 U_{ref}	400 V
电池容量 C	800 kWh
EV 额定充电功率 P_k	3 kW
EV 额定容量 Q_N	57 kWh

仿真部分分为三个情景，如下所述。

情景一：无电动汽车接入微网，由分布式电源和负荷引起的功率波动，会造成直流微电网的母线电压波动较大。仅靠传统储能电池来调节时，母线电压会超过 15 V，电压波动在 5%，即 20 V 以内，如图 10 所示，图中放大位置为母线电压波动最大的部分。

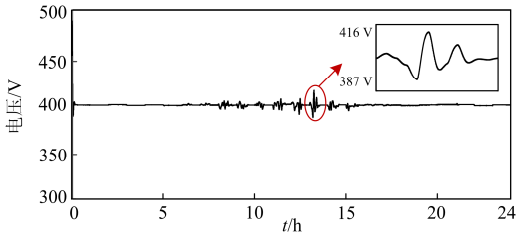


图10 情景一的直流母线电压

Fig. 10 DC bus voltage in first scenario

情景二：考虑目前电动汽车的普及度，休息日，有 10 辆电动汽车一直接入微网，其作为常规储能设备的补充，协调参与直流微电网的调节。休息日电动汽车的荷电量保持在较高水平，满足参与电网调节的条件，文中假设初始 SOC 为 93%。

电动汽车能在母线电压波动时辅助调节，电压波动在 1.25%，即 5 V 以内，如图 11 所示，图中放大位置母线电压波动最大。加入电动汽车之后母线电压的波动有所减小。电动汽车参与调节时的 SOC 变化如图 12 所示，其中，斜率为正表示电动汽车充电，斜率为负表示电动汽车放电。

情景三：工作日，根据私家电动汽车用户的行驶习惯，到达居住区(A 类/4 辆)和工商区(B 类/4 辆)

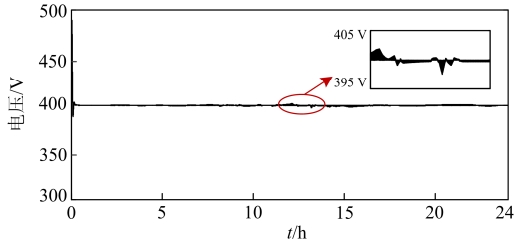


图11 情景二的直流母线电压

Fig. 11 DC bus voltage in second scenario

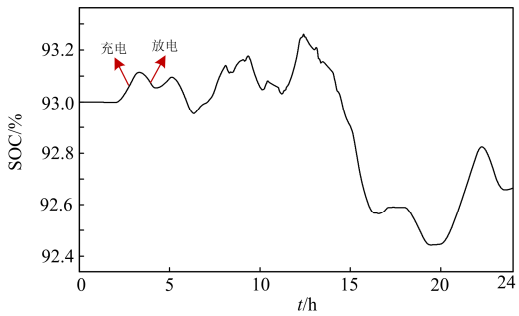


图 12 情景二的电动汽车 SOC

Fig. 12 SOC of the EVs in second scenario

后接入微网参与调节。工作日考虑电动汽车的行驶习惯，电动汽车在荷电状态低于下限 SOC_1(80%)时充电，为体现电动汽车用户的充电过程，以验证所提模型的可行性，文中假设 EV 初始荷电量 SOC 为 79%，接入充电桩后即可充电。考虑到有电动汽车全天处于闲置状态(C类/2辆)，初始SOC设置为 88%，这三类电动汽车，作为常规储能设备的补充，一起协调直流微电网调节，直流母线电压如图 13 所示。

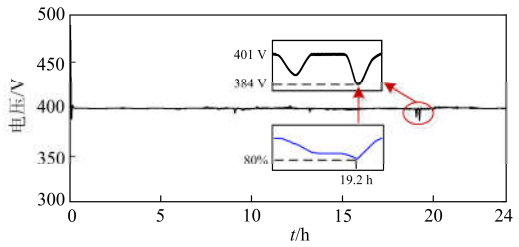


图13 情景三的直流母线电压

Fig. 13 DC bus voltage in third scenario

在 19~19.3 h 时段，根据图 6 所示的滞环控制，C 类车放电到 80% (下限 SOC_1)后开始充电，保证用户正常用车，此时电动汽车由放电到充电状态的转换，导致直流母线电压大的波动，但在 15 V 以内。此时段外母线电压波动在 1.25%，即 5 V 以内，相对于无电动汽车场景，电压质量有所改善。

电动汽车的 SOC 变化如图 14 所示。若电动汽车初始荷电状态为 79%，则充电到设置的 90%需要 1.32 h，与理论计算式(3)相同，充电到 90%后根据电网功率波动情况参与调节。

电动汽车根据风光和负荷的波动情况进行调节，为详细描述系统内电动汽车的工作状态，将图 14 中的调节过程分 a~j10 个阶段，分别说明电动汽车在每个阶段参与直流微电网调节结果。电动汽车参与直流微电网控制结果如表 3 所示。

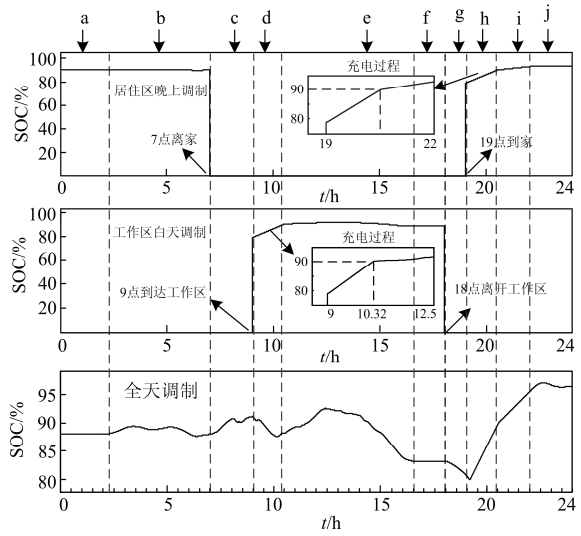


图 14 情景三的电动汽车 SOC

Fig. 14 SOC of the EVs in third scenario

表 3 电动汽车参与直流微电网控制结果

Table 3 Results of EVs modulation in DC micro-grid

阶段	状态				
	I	II	III	IV	V
a	波动 1	能	无调节	离网	无调节
b	波动 2	否	调节	离网	调节
c	波动 2	否	离网	离网	调节
d	波动 2	否	离网	充电	调节
e	波动 3	否	离网	调节	调节
f	波动 1	能	离网	无调节	无调节
g	波动 2	否	离网	离网	调节
h	波动 2	否	充电	离网	充电
i	波动 3	否	调节	离网	调节
j	波动 3	否	调节	离网	调节

表 3 中，I 表示不平衡功率波动情况，分为三种，波动 1 表示平稳变化，波动 2 表示波动较大，波动 3 表示波动很大；II 表示蓄电池能否维持母线电压，III、IV 和 V 分别表示 A 类车、B 类车和 C 类车。

为了更好地说明电动汽车的移动储能特性，本文将无电动汽车、休息日和工作日电动汽车接入微网三种情景下的储能电池 SOC 出力曲线表示在图 15 中。

结合表 3、图 14 和图 15 可以得出以下结论。

区间 a、f：由于不平衡功率平稳变化，仅靠储能电池可以维持母线电压稳定，三种情景下电池 SOC 变化趋势一致，这一区间减小了电动汽车电池的充放电次数，从而延长电动汽车蓄电池的寿命。

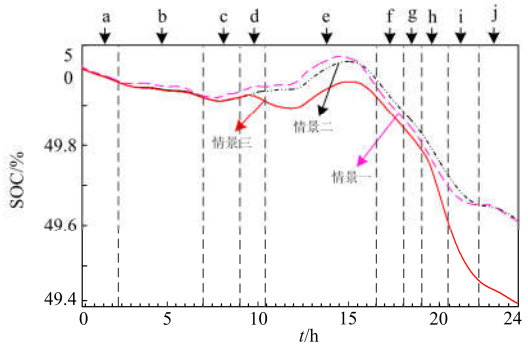


图 15 三种情景下电池的 SOC

Fig. 15 SOC of the battery in three scenario

区间 e、i、j：不平衡功率波动很大，情景三每个区间均有两类车参与调节，虽然两类车参与调节已达上限，但在不影响电动汽车用户需求的前提下已作为传统储能电池的补充，电池 SOC 较情景一二变化大。

区间 d：不平衡功率波动较大，情景三 B 类车到达工作区域开始充电，C 类车参与调节，由于 C 类车占的比例少，电池 SOC 出力较情景一二稍大。

区间 h：不平衡功率波动较大，但此时情景三 A 类车到达居住地开始充电，C 类车由于调节时放电到下限也开始充电，此时没有电动汽车参与调节，电池的 SOC 较情景一二变化大。

区间 b、c、g：不平衡功率波动较大，情景二与情景三没有电动汽车充电，有一类或两类电动汽车参与调节，电池 SOC 比情景一变化缓慢，电动汽车作为常规储能电池的补充效果更明显。

4 结论

本文基于电动汽车的移动储能特性，综合考虑了车和储能电池的运行状态，对电动汽车进行建模。提出了一种电动汽车充放电控制策略，根据荷电状态滞环特性和母线电压波动阈值设定，发挥电动汽车的储能特性，最终得出以下结论。

1) 利用电动汽车移动储能特性，作为常规储能装置的补充，可以更灵活地协调微电网调节,维持直流母线电压稳定。

2) 所提的电动汽车运行状态建模方法综合考虑了车和储能电池的状态，仿真结果验证了所搭建的电动汽车模型的可行性。

3) 所提出的的电动汽车充放电控制策略，兼顾了电动汽车用户侧和微网侧两方面的需求，能使电动汽车最大限度的参与微电网调节，有效改善了直流母线的电压质量，为微电网的稳定运行提供了一种有效的技术手段。

参考文献

[1] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 111-117.

[2] JUSTO J J, MWASILU F, JU L, et al. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 24(10): 387-405.

[3] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.

[4] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.

[5] 翁国庆, 张有兵, 戚军, 等. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 36-45.
WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 36-45.

[6] HU K W, LIAW C M. Incorporated operation control of DC microgrid and electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 202-215.

[7] 周建萍, 张纬舟, 王涛, 等. 含V2G的直流微网电压分层控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 19-25.
ZHOU Jianping, ZHANG Weizhou, WANG Tao, et al. Hierarchical control strategy for dc micro-grid voltage with V2G[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 19-25.

[8] 张明锐, 谢青青, 李路遥, 等. 考虑电动汽车能量管理的微网储能容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4663-4673.
ZHANG Mingrui, XIE Qingqing, LI Luyao, et al. Optimal sizing of energy storage for microgrids considering energy management of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4663-4673.

[9] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450.

[10] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.

[11] 赵兴勇, 王帅, 吴新华, 等. 含分布式电源和电动汽车的微电网协调控制策略[J]. 电网技术, 2016, 397(12): 3739-3747.
ZHAO Xingyong, WANG Shuai, WU Xinhua, et al. Coordinated control strategy research of micro-grid including distributed generations and electric vehicles[J]. Power System Technology, 2016, 397(12): 3739-3747.

[12] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[13] 蒋煜, 丁晓群, 郑程拓, 等. 含电动汽车的主动配电网分布式电源规划[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 1-6.
JIANG Yu, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, et al. Distributed generation planning for active distribution network with electric vehicle[j]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 1-6.

[14] ZHANG M, CHEN J. The energy management and optimized operation of electric vehicles based on microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(29): 1427-1435.

[15] 马益平. 考虑电动汽车调度的微电网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 98-107.
MA Yiping. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for micro-grid considering EV scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 98-107.

[16] 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.

[17] 王彪, 尹霞. 实时电价下含V2G功能的电动汽车理性充放电模型及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 90-96.
WANG Biao, YIN Xia. Modeling and analysis on the rational charging and discharging of electric vehicle with V2G function under real-time prices[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 90-96.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 苗轶群, 江全元, 曹一家, 等. 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 1-7.
MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 1-7.

[21] 苗世洪, 徐浩, 钱甜甜, 等. 扩展时间尺度下的电动汽车有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 5959-5967.
MIAO Shihong, XU Hao, QIAN Tiantian, et al. An ordered charging strategy for electric vehicles under an extended time scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 5959-5967.

[22] 韩民晓, 陈宇, 王皓界. 直流配电系统电压偏差限值的研究[J]. 大功率变流技术, 2016(3): 1-5.
HAN Minxiao, CHEN Yu, WANG Haojie. Research on the limitation value of voltage deviation for DC distribution system[J]. High Power Converter Technology, 2016(3): 1-5.

收稿日期：2017-10-13； 修回日期：2018-01-29

作者简介：

王闪闪(1993—)，女，硕士研究生，主要研究方向为规模化电动汽车接入对电网影响的研究；E-mail: wangshan1121@163.com

赵晋斌(1972—)，男，通信作者，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为现代电力电子技术及其在新能源发电与电力系统中的应用。E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 姜新丽)