电动公交汽车电池集群参与海岛微网能量调度的 V2G 策略

翁国庆,黄飞腾,张有兵,谢路耀,戚 军 (浙江工业大学信息工程学院,浙江杭州 310023)

摘要:结合海岛环保公共交通需求并基于车网互联(V2G)技术,提出一种将电动公交汽车电池集群(EBBG) 作为储能元件参与海岛微网能量调控的运行方案。根据 EBBG 的配置参数和管理模式,构建精确的数学模型实时评估其 V2G 可用容量,表征其参与微网运行调控时的动态双向能量平衡能力。以实现各优化时段内 海岛微网中供需两侧能量动态平衡的整体成本最小化为目标,建立 EBBG 参与海岛微网运行调控的优化 模型,并基于改进粒子群优化算法求得系统中各能量动态平衡要素在各时段的功率输出最优值。以舟山东 福山岛风-光-柴-储微网系统为例,验证了所提 V2G 能量调度方案和运行优化策略的可行性和有效性。

关键词:海岛微网;电动公交汽车电池集群;车网互联;可用容量;能量调度

中图分类号: TM 727; U 469.72 文献标识

文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.005

0 引言

海岛拥有丰富的可再生能源资源,大力发展新 能源微网供电系统已成为共识^[1]。目前,我国已开展 多个重要的海岛微网示范工程项目(如舟山东福山 岛和温州南麂岛、鹿西岛等)。但由于远离大陆其并 网困难,发电成本高昂、供需侧能量动态平衡困难是 其两大突出难点。研究和实践表明,如何在保障电 能质量的前提下进一步提高可再生能源发电渗透率 是实现海岛微网经济运行的基本策略,而提供足够 容量的储能元件参与系统能量动态平衡是关键。

近年来,电动汽车 EV(Electric Vehicles)和车网 互联 V2G(Vehicle to Grid)技术得到快速发展。从 海岛交通、环境保护、电力供应、经济成本等多方需 求考虑,引入电动公交汽车(充电站模式)作为岛上 环保公共交通工具,并基于 V2G 技术将电动公交汽车 电池集群 EBBG(Electric Buses Battery Groups)作为 储能元件参与海岛微网运行的方案具有可行性[2-3]。 在保证正常行车需求的前提下,接入 V2G 站中的 EBBG 作为储能装置接受微网能量管理中心的充放 电控制,不仅可大幅降低系统专用储能设备的投资 和维护成本,还可充分发挥其快速可控特性,利于系 统能量动态平衡[4-5]。目前,北欧岛国丹麦在该领域 的研究走在前列⁶⁰,我国部分海岛(如南麂岛)微网 中也已开展 V2G 相关的研究和应用实践。如何有 效地将 V2G 技术应用于海岛微网运行调控已成为 具有重大意义的前沿研究课题。

收稿日期:2015-09-30;修回日期:2016-08-14

但是,该运行方案面临多个关键技术难题和挑 战。一方面,实现 V2G 接入微网的所有 EBBG 的实 时双向能量调控能力的准确评估至关重要。文献 [7-8]分别采用多模型自适应卡尔曼滤波器法、径向 基函数神经网络对 EV 电池荷电状态 SOC (State Of Charge)进行合理预测,但其均是针对单体 EV 电 池进行分析。文献[9]研究了影响大规模 EV 电池 集群的充放电行为特性,对其充电需求、对原电网负荷 特性的影响进行分析预测,但未考虑 EV 电池集群 V2G 接入后的双向能量调控。文献[10]从电网接 纳能力角度考虑,对 EV 充换电服务网设施配置方案 进行分析与评估。另一方面,海岛微网新能源发电 渗透率高,能量平衡控制任务重、要求高、实时性强, 除满足系统频率、电压等调控目标外,还需兼顾系统 运行的经济成本和电池集群自身的 V2G 控制需求, 这是一个多变量、多约束的高维复杂优化问题[11-12]。

本文提出一种将 EBBG 作为储能元件参与海岛 微网运行的方案,并在有效表征 EBBG 的实时 V2G 能量动态双向平衡能力的基础上,以实现系统能量 动态平衡的整体成本最小化为目标,建立 V2G 参与 系统运行调控的优化模型。根据岛上 EBBG 的管理 模式和关键参数,实现参与 V2G 服务的可用容量实 时评估,并基于改进粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)算法求解系统中参与能量动态平衡的 各要素、各优化时段的功率输出最优值。最后,通过 浙江舟山东福山岛风-光-柴-储微网系统算例,分析 验证了所提 V2G 运行机制和调控策略的可行性和 有效性。

1 V2G运行机制与可用容量评估

1.1 系统组成与 V2G 调控思路

海岛微网的典型系统组成如图1所示。微网正

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207139,51407160);浙 江省自然科学基金资助项目(Y17E070018);国家留学基金 资助项目(201408330220)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51207139, 51407160), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y17E070018) and China Scholarship Council Program (201408330220)



图 1 EBBG 参与储能的海岛微网系统组成 Fig.1 System configuration of island microgrid with EBBG as energy storage

常运行时,系统可再生电源和负荷两侧间功率差额 可由各能量平衡要素实时有效平衡。任意 nΔt 时 刻,必须实时满足能量供需侧间的功率平衡:

$$P_{\rm LD}(n\Delta t) - \sum_{i=1}^{K} P_{\rm DGi}(n\Delta t) = P_{\rm EV}(n\Delta t) +$$

 $P_{\rm DS}(n\Delta t) + P_{\rm CH}(n\Delta t) \qquad (1)$

其中, Δt 为系统调控时所取前后最小时间间隔;K 为 系统中包含的分布式电源(DG)总个数; $P_{DGi}(n\Delta t)$ 为 各可再生能源在 $n\Delta t$ 时刻的发电功率总和,可通过 构建各 DG 发电预测模型,并结合微网实际配置和 参数获得; $P_{ID}(n\Delta t)$ 为微网区域内 $n\Delta t$ 时刻的负荷预 测值; $P_{EV}(n\Delta t)$ 、 $P_{DS}(n\Delta t)$ 和 $P_{CH}(n\Delta t)$ 分别为 $n\Delta t$ 时刻 参与 V2G 服务的 EBBG、柴油发电机组和外电网的 输出功率值。

1.2 V2G运行机制与可用容量评估

为了更好地提高 EBBG 参与 V2G 的储能利用 率,对应于电动公交汽车的出站、进站规律,可采用 "依次递进"的 EBBG 管理模式,由公交运行时刻表 中的不同车辆始发、更换电池、停运时间确定电池 装卸时刻。系统中电池总数量按电动公交车辆数进 行一定比例 g 的超额配备。

根据海岛交通需求状况,规划每辆汽车在运行 中间时段,需要进充电站更换电池一次。各时段的 工作状态描述如图 2 所示^[13],设将其一天工作时间 分为 6 个不同状态时段 $\Delta T_i(i \in \{1, 2, \dots, 6\})$,对应的 N_i 为各时段 ΔT_i 内的 Δt 个数, $N_{\rm BI}$ 和 $N_{\rm B2}$ 分别为岛上 电动公交汽车的数量和系统配备的汽车电池总量 ($g = N_{\rm B2}/N_{\rm BI}$)。



为有效表征 EBBG 作为储能元件进行动态能量

平衡的能力,定义 EBBG "V2G 可用容量"概念。根据相关理论,可列式表征其电池充放电过程中前后时间间隔的荷电状态关系^[14]:

SOC($t + \Delta t$) = SOC(t)($1 - \sigma \Delta t$) + $I_{\text{bat}}(t) \Delta t \eta(t) / C_{\text{bat}}(2)$ 其中, $I_{\text{bat}}(t)$ 为t时刻充放电电流(大于零表示充电, 小于零表示放电); σ 为自放电率,取值 0.01 %/h; C_{bat} 为电池的额定容量,A·h; $\eta(t)$ 为充放电效率,当 功率输出稳定且在有效充放电范围[SOC_{min},SOC_{max}] 内时,其可视为定值。

根据式(2),电池从 $(n-1)\Delta t$ 时刻充放电至 $n\Delta t$ 时刻, $n\Delta t$ 时刻的电池剩余容量可递归描述为:

$$C_{\rm r}(n\Delta t) = C_{\rm bat} \text{SOC}(n\Delta t) =$$

$$C_{\rm r}[(n-1)\Delta t] + I_{\rm bat}\Delta t \,\eta(t) \tag{3}$$

因此,EV 电池的 V2G 可用放电容量 $C_{\rm D}(n\Delta t)$ 和 V2G 可用充电容量 $C_{\rm C}(n\Delta t)$ 可分别表示为:

$$C_{\rm D}(n\Delta t) = C_{\rm r}(n\Delta t) - C_{\rm bat} \text{SOC}_{\rm min}$$
(4)

$$C_{\rm C}(n\Delta t) = C_{\rm bat} \text{SOC}_{\rm max} - C_{\rm r}(n\Delta t)$$
(5)

由图 2 所示的电动公交汽车"依次递进"管理模式及 V2G 可用容量概念定义,可得 $\Delta T_1 - \Delta T_6$ 不同时段内该 EBBG 在任意 $n\Delta t$ 时刻的 V2G 可用放电容量的递归表达式:

$$C_{D(\Delta T_{i})}(n\Delta t) = C_{D}(n_{0}\Delta t) - K_{n}\lambda_{n}C_{bat}(SOC_{max} - SOC_{min}) + \sum_{k_{i}=1}^{n}\Delta C_{T}(k_{1}\Delta t)$$
(6)

$$C_{D(\Delta T_{2})}(n\Delta t) = C_{D(\Delta T_{1})}(N_{1}\Delta t) + \sum_{k_{2}=1}^{n} \Delta C_{T}(k_{2}\Delta t)$$
(7)

$$C_{D(\Delta T_3)}(n\Delta t) = C_{D(\Delta T_2)}(N_2\Delta t) + \sum_{k_3=1}^n \Delta C_T(k_3\Delta t) - K_n\lambda_n C_{hel}(SOC_{max} - SOC_{min} - SOC_{res})$$
(8)

$$C_{\mathrm{D}(\Delta T_4)}(n\Delta t) = C_{\mathrm{D}(\Delta T_3)}(N_3\Delta t) + \sum_{k_4=1}^n \Delta C_T(k_4\Delta t)$$
(9)

 $C_{\mathrm{D}(\Delta T_{\mathrm{s}})}(n\Delta t) = C_{\mathrm{D}(\Delta T_{\mathrm{s}})}(N_{4}\Delta t) +$

$$K_n \lambda_n C_{\text{bat}} \text{SOC}_{\text{res}} + \sum_{k_s=1}^n \Delta C_T(k_5 \Delta t)$$
 (10)

$$C_{\mathrm{D}(\Delta T_{\mathrm{o}})}(n\Delta t) = C_{\mathrm{D}(\Delta T_{\mathrm{o}})}(N_{5}\Delta t) + \sum_{k_{\mathrm{o}}=1}^{n} \Delta C_{T}(k_{6}\Delta t)$$
(11)

其中, $C_D(n_0\Delta t)$ 为 ΔT_1 起始时刻的 V2G 可用放电容 量; K_n 为 ΔT_1 、 ΔT_3 、 ΔT_5 时段内 $n\Delta t$ 时刻对应的"依次 递进"安装电池发车、进站更换电池及停运卸载电池 的公交汽车班次; λ_n 为每班次发车、进站或停车的汽 车数量; $\Delta C_T(k_i\Delta t)(i \in \{1, 2, \dots, 6\})$ 为 $k_i\Delta t$ 时刻系统 中所有参与 V2G 服务的 EBBG 容量变化总量;SOC_{res} 为 ΔT_3 时段内各电动公交车进站更换电池和 ΔT_5 时 段内各电动公交车停运后车载动力电池卸载时的平 均剩余荷电状态值。可见,EBBG 在各时段的 V2G 可用容量由"可确定部分"和"不可确定部分"组成。

根据定义易知, $\Delta T_i(i \in \{1, 2, \dots, 6\})$ 时段内该

EBBG 在任意 $n\Delta t$ 时刻的 V2G 可用充电容量可表 达为:

 $C_{C(\Delta T_{i})}(n\Delta t) = N_{v2g}(n\Delta t) C_{hat}(SOC_{max} - SOC_{min}) - C_{D(\Delta T_{i})}(n\Delta t)$ (12)

其中, $N_{v_{2s}}(n\Delta t)$ 为 ΔT_i 时段内 $n\Delta t$ 时刻接入 V2G 服务的电池总数量。

2 基于改进 PSO 算法的 V2G 优化调控

2.1 各能量平衡要素的经济成本模型

(1) EBBG 参与 V2G 服务成本模型。

EBBG 参与 V2G 服务的运行调控总成本应考虑 储能成本、V2G 项目补助费用、调峰收益 3 个方 面^[15],其调控成本模型可表述为(单位为元/d):

$$C_{\rm EV} = C_{\rm STC} + C_{\rm SU} + C_{\rm RE} = \frac{M_2 C_{\rm BRC} E_{\rm bat}}{N_{\rm Y} D_{\rm OD} N_{\rm C}} + \frac{C_{\rm EV} M_1}{N_{\rm Y}} \varepsilon + \sum_{k=1}^{N} f_{\rm RE} (k\Delta t) W_{\rm EV} (k\Delta t)$$
(13)

其中, C_{STC} 为 EBBG 总储能成本,根据系统超配电池 的购置成本按其最短使用年限折算; C_{SU} 为根据合约 系统给予参与 V2G 服务用户的经费补贴; C_{RE} 为利 用系统峰谷电价合理充放电的收益; C_{RRC} 为单体电 池购置成本,元/(kW·h); M_2 为超配电池数量; E_{bat} 为 电池容量,kW·h; D_{0D} 为允许放电深度,%; N_C 为电池 最短使用年限; N_Y 为一年的天数; C_{EV} 为单辆电动公 交车的价格; M_1 为公交车数量; ε 为参与 V2G 服务 的用户年补贴利率; $W_{EV}(k\Delta t)$ 为 $k\Delta t$ 优化时段 EBBG 与微网间的 V2G 交换电量; $f_{RE}(k\Delta t)$ 为海岛微网峰 谷电价函数,仅与时段有关;N为一天 24 h 中的时段 总数。

(2) 柴油发电机组发电成本模型。

柴油发电机组参与系统能量平衡时的发电运行 调控总成本应包括燃油消耗费、环境成本和设备折 旧费3个方面^[16],其调控成本模型可表述为:

$$C_{\rm DS} = C_{\rm FU} + C_{\rm EN} + C_{\rm DE} \tag{14}$$

其中,*C*_{FU}为燃油消耗费,是其发电运行过程中产生的主要费用(包含运输附加费用);*C*_{EN}为环境成本,根据其产生的对环境污染气体(SO₂、NO_x)的治理费用折算;*C*_{DE}为设备折旧费,将一次性设备购置费用按规定使用年限等值折旧。

(3) 外网交换功率成本模型。

若海岛与大陆主网或附近其他海岛微网间通过 海底电缆存在关联,则可充分利用电缆联络线功率 交换参与系统能量平衡。不考虑海底电缆铺设成 本,在其所能承受最大功率限额内,其调控总成本 可表述为:

$$C_{\rm CH} = b \sum_{k=1}^{N} P_{\rm CH}(k\Delta t)$$
(15)

其中,b为海岛微网与岛外电网的交换电价(当向外 网输电时设为卖电价格 $-b_1$;反之,设为买电价格 b_2); $P_{CH}(k\Delta t)$ 为 $k\Delta t$ 时刻参与 V2G 服务的外电网输出功 率值。

2.2 系统运行优化调控模型构建

EBBG 参与海岛微网运行的优化调控,是在满 足系统能量动态平衡及保证公交电动汽车的行车动 力需求前提下,优化调控系统中各能量平衡要素在 各优化时段内的输出功率分布,以实现系统运行成 本最小化的目的。综合考虑孤网和存在岛外弱关联 2 种可能的海岛微网运行状态,构建基于 V2G 技术 的 EBBG 参与海岛微网运行的经济优化调控统一化 模型:

$$\min f(P_{\rm EV}, P_{\rm DS}, P_{\rm CH}) = \min \{f_1(P_{\rm EV}) + f_2(P_{\rm DS}) + cf_3(P_{\rm CH}) + C_{\rm ST}\}$$
(16)
$$\begin{cases} f_1(P_{\rm EV}) = \sum_{k=1}^N f_{\rm RE}(k\Delta t) P_{\rm EV}(k\Delta t) \Delta t \\ f_2(P_{\rm DS}) = a \sum_{k=1}^N P_{\rm EV}(k\Delta t) \Delta t \\ f_3(P_{\rm CH}) = b \sum_{k=1}^N P_{\rm CH}(k\Delta t) \Delta t \end{cases}$$

其中, $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 分别为海岛微网中 EBBG 参与 V2G 服务、柴油发电机组发电、可能存在岛外电网的运行调控成本的可变部分; C_{ST} 为计及式(13)、(14)的 C_{DS} 与 C_{EV} 调控成本模型中的所有固定成本项之和;c为海岛微网运行模式选择系数(孤网c=0, 联网c=1);a为柴油发电机组调控可变成本系数,即式(14)中前 2 个分项的系数之和。

式(16)的优化约束条件需综合考虑 EBBG 的充 放电约束、可用容量约束、功率约束、各电池装卸时 段容量约束,以及柴油发电机组的功率约束和可能 存在岛外电网的交换功率约束等,具体如下。

(1) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{K} P_{\text{DG}i}(n\Delta t) + P_{\text{EV}}(n\Delta t) + P_{\text{EV}}(n\Delta t) + P_{\text{DG}i}(n\Delta t) + P_{\text{CH}}(n\Delta t) = P_{\text{ID}}(n\Delta t)$$
(17)

(2) 柴油发电机组输出功率约束。

$$0 \le P_{\rm DS}(n\Delta t) \le P_{\rm DS,N} \tag{18}$$

其中, P_{DS,N} 为柴油发电机组额定功率。

(3) 各 ΔT_i 时段 EBBG 的 V2G 充放电可用容量 约束。

$$-C_{\mathcal{C}(\Delta T_i)}(n\Delta t) \leq P_{\text{EV}}(n\Delta t)\Delta t \leq C_{\mathcal{D}(\Delta T_i)}(n\Delta t)$$
(19)

(4) 在系数为 s_m的电池充放电(m=1 时放电,m=
 2 时充电)速率下,EBBG 的 V2G 充放电功率约束。

$$|P_{\rm EV}(n\Delta t)| \leq s_m \operatorname{SOC}_{\rm max} E_{\rm bal} N_{\rm v2g}(n\Delta t) \tag{20}$$

(5) 与岛外电网互联模式卜交换功率约束。

$$|P_{CH}(n\Delta t)| \leq P_{CHmax}$$
 (21)
其中, P_{CHmax} 为微网与岛外电网交换功率限值。

(6)为保证新装载电池必须保持最大荷电状态的基本要求,系统中电池装载、更换时刻的容量约束。

[SOC($n_k \Delta t$) – SOC_{min}] $E_{\text{bat}} N_{v2g}(n\Delta t) \ge \lambda_n E_{\text{bat}} \text{SOC}_{max}(22)$ 其中, $n_k \Delta t$ 为充电站装载电池时刻; SOC($n_k \Delta t$)为 $n_k \Delta t$ 时刻充电站内参与 V2G 服务的 EBBG 平均荷 电状态。

2.3 基于时变权重 PSO 算法的优化求解

考虑到上述各约束条件在各优化时段的关联 性,采用基于时变权重的改进 PSO 算法并引入惩罚 函数处理各约束条件对优化模型进行全时段的整体 优化,求取系统运行成本最小化前提下的参与系统 能量动态平衡的各要素、各最小优化时段的功率输 出最优值。

时变惯性权重提高了海岛微网经济优化调控模型的全时段整体搜索空间,避免过早陷入局部最优。 惩罚函数可以根据约束条件被违反的严重程度动态 修正权重系数,只有在避免其所得值过大时才能够 保证优化模型目标函数最小,进而保证约束条件式 (17)—(21)得到满足。算法关键的速度、位置和权 重更新机制如下:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^{k} + c_1 \xi (p_{id}^{k} - x_{id}^{k}) + c_2 \gamma (p_{gd}^{k} - x_{id}^{k})$$
(23)

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \tag{24}$$

$$\omega = (\omega_1 - \omega_2) (I_{\text{max}} - I_{\text{pre}}) / I_{\text{max}} + \omega_2$$
(25)

其中, x_{id}^{k}, x_{id}^{k+1} 分别为k, k+1时刻的位置; v_{id}^{k}, v_{id}^{k+1} 分别 为k, k+1时刻的速度; $\omega, \omega_1, \omega_2$ 为时变权重因子及 其初始值与终值; c_1, c_2 分别为个体与群体最优学习 因子; ξ, γ 为[0,1]区间内均匀分布的伪随机数; p_{id}^{k}, p_{gd}^{k} 分别为k时刻个体最优位置和群体最佳位置; I_{max}, I_{mx} 分别为最大迭代次数和当前迭代次数。

算法主要包括四大核心步骤:优化模型的初始 化设置;约束条件的检测和处理;调度成本的计算; 各能量平衡要素在各优化时段输出值的确定。基于 时变权重 PSO 算法的系统全时段整体优化求解过 程如图 3 所示。

3 算例分析

3.1 系统配置及运行机制规划

算例以 2011 年设计并投建的浙江舟山东福山 岛风-光-柴-储微网系统为工程背景。东福山岛年 平均日太阳辐照度为 120~160 W/m²(北纬约 30°,东 经约 120°),18 m 高度年平均风速约 6.05 m/s,新能 源资源具有较好的开发价值。常住人口约 300 人, 雷达站驻扎部队约 50 人,旅游业发达。为解决当地 居民、部队及旅游业水电短缺问题,建立了一套生产 淡水 50 t/d 的海水淡化系统。东福山岛微网为一孤 岛微网系统(c=0),现假设引入电动公共汽车和充



图 3 基于时变权重 PSO 算法的优化求解过程 Fig.3 Flowchart of PSO-based optimization with time-varying weights

电站构建岛上公共交通体系,并将其 EBBG 作为储 能元件参与 V2G 微网系统的运行调控。系统能量供 需两侧的主要配置数据如下:居民负荷功率为 160 kW, 部队负荷功率为 40 kW,海水淡化负荷功率为 24 kW; 可再生分布式风力发电配置最大功率为 210 kW,分 布式太阳能发电配置最大功率为 100 kW;柴油发电 机组额定功率 P_{DS,N} 为 200 kW,与外网交换功率限值 P_{CHnax} 为 0 kW,单组电池的额定容量 E_{bat} 为 30 kW·h, 10 辆 EV 按 1:2 配置电池。

构建的海岛公交交通体系中,电动公交汽车总量为10辆,在车站起(终)点配置1个充电站。设计民用、军用2条环形公交线路,每条线路各5个班次车辆(每班次同时发车2辆,单程预计耗时1h)。 采用"依次递进"管理模式对参与V2G服务的电动 公交车进行调度,公交车运行规则如表1所示。其

表 1 海岛电动公交汽车运行规划 Table 1 Operating schedule of island electric buses

班次/数量	发车 时刻 1	发车 时刻 2	发车 时刻 3	发车 时刻 4	发车 时刻 5	停运 时刻
1 班/2 辆	06:00	08:30	11:00	13:30	16:00	18:00
2 班/2 辆	06:30	09:00	11:30	14:00	16:30	18:30
3 班/2 辆	07:00	09:30	12:00	14:30	17:00	19:00
4 班/2 辆	07:30	10:00	12:30	15:00	17:30	19:30
5 班/2 辆	08:00	10:30	13:00	15:30	18:00	20:00

中,各电动公交车在12:00—14:00时段区域按班次 依序进站更换电池1次。

算例中的汽车电池关键参数如表 2 所示。充电 站电池总数量按比例系数 g=2 配置 ($N_{BI}=10, N_{B2}=$ 20)。为防止过度充放电,设定电池的平均有效充 放电范围为额定容量的 0.2~0.9。

表 2 电动公交汽车动力电池主要参数

Table 2 Key parameters of power battery for electric bus

参数	数值	参数数数	值
单体额定容量/(kW・h)	30	能效比/[km·(kW·h) ⁻¹] 6.2	25
工作电压/V	48	放电效率/% 96.	16
允许放电深度/%	70	日平均行驶里程/km 20	0

3.2 V2G 可用容量评估及优化调控

在评估微网中 EBBG 的 V2G 可用容量时,考虑 初始评估日和正常评估日 2 种不同情景。两者之间 的最显著区别在于,在时段 ΔT_1 初始时刻 EBBG 的 荷电状态初始值设置不同:(1)对于初始评估日,设 定 EBBG 中所有电池均已充电至 SOC_{nax},则式(6)中 的 $C_{\rm D}(n_0\Delta t)$ 值可确定为 420 kW·h;(2)对于正常评 估日,仅 ΔT_1 时段内将依次脱离 V2G 服务的一半数 量的电池(与汽车数量对应)需充电至 SOC_{nax},因此 $C_{\rm D}(n_0\Delta t)$ 值设定为 210 kW·h。

根据表 1 数据,图 2 所示的 EBBG 运行规划中 的关键时间节点 $t_i(i \in \{1, 2, \dots, 6\})$ 依次为 06:00、 08:00、12:00、14:00、18:00 和 20:00。根据表 2 参数 计算 ΔT_3 和 ΔT_5 时段中车载动力电池卸载时的平均 剩余容量 SOC_{res} 为 0.14。然后,根据式(6)—(11)所 示递归表达式,可获得系统中 EBBG 在 $\Delta T_1 - \Delta T_6$ 不同时段任意 $n \Delta t$ 时刻的 V2G 可用放电容量。以 初始评估日为例,图 4 展示了系统 V2G 可用放电容 量中的可确定部分。图中,1 d 时间单位被分割为 48 个 V2G 评估时间间隔,水平轴时间起点对应于 ΔT_1 时段的初始时刻(即 06:00)。



设定式(20)中允许最大放电速率 s₁=0.1,充电 速率 s₂=0.2。式(13)中的峰谷电价分时段函数,参 照"浙江居民生活峰谷用电阶梯累加电价政策",并 根据算例海岛用电各时段用电负荷的新能源发电预 测情况,由表3所示的峰谷用电阶梯电价表体现,其 中峰电时段为时段1-7、23-35,谷电时段为时段 8-22、36-48。

表 3 海岛微网峰谷电价 Table 3 Peak and valley electricity prices

of island microgrid

於 描 由 基 //1 ▼/ 1)	电价/[元・(kW・h)-1]			
凹你电重/(KW・n)	峰电时段	谷电时段		
0~50	0.56	0.28		
51~200	0.59	0.31		
>201	0.66	0.38		

基于所提出的系统调控优化策略和模型,可获 得微网系统中参与能量动态平衡的各要素、各优化 时段的功率输出最优值。图 5、图 6 分别显示了初 始评估日和正常评估日的系统 V2G 运行调控优化 结果(图中 DSG 表示柴油发电机组)。



图 5 初始评估日各能量平衡要素的功率分布 Fig.5 Power distribution of energy balance

elements for initial evaluation day



图 6 正常评估日各能量平衡要素的功率分布 Fig.6 Power distribution of energy balance elements for normal evaluation day

根据上述 2 种情景下输出的各时段 V2G 调度 值的优化值,通过式(6)—(12)的评估模型,可确定 算例微网中 EBBG 的 V2G 可用放电容量和 V2G 可 用充电容量,如图 7 所示。



图 7 2 种情景下 V2G 可用放电容量和充电容量 Fig.7 Available V2G discharge capacity and charge capacity for two scenarios

3.3 算例结果分析

观察图4和图7可见.系统中作为储能元件参 与微网运行的 EBBG 的 V2G 可用容量主要由可确 定部分和不可确定两部分决定,前者与微网中参与 V2G服务的电动公交汽车的运行机制和调度规律密 切相关,后者主要由微网运行过程中的实时能量调 控确定;电池总量配置比例系数g越大,系统 V2G 可用容量的评估初始值也将越大,但过大冗余度将 显著增大投资并降低调控经济性,应根据具体系统 需求合理配置。由图 5 和图 6 可见,系统中的 EBBG 基于 V2G 技术全程参与了微网的能量动态平衡调 控。在微网中可再生能源发电出力总和小于负荷功 率时段,EBBG可与柴油发电机组配合共同向系统 输出功率实现能量平衡;反之,EBBG可进行充电实 现多余电能的有效利用。在整个时间区域(24 h) 内,EBBG 在各最小优化时段的充放电状态以及量 值可基于改进 PSO 算法求解,其目的是保证满足系 统动态能量平衡的前提下,系统运营成本最低。

一个普遍担心的问题是,EBBG 参与 V2G 服务 可能导致电池频繁充放电从而缩短其寿命。在本文 所提运行机制和调控策略下,实际上这种损害程度 是不高且经济性可弥补的。原因主要有:(1)由图 5、 图 6 的输出功率可见,在基于改进 PSO 算法的全局 优化下,EBBG 作为整体充放电状态转换次数很少, 各时段内充放电总功率均较小,尽量保持了平稳 放电;(2)各时段 EBBG 充放电功率调控结果可通 过第二层控制机制在所有 V2G 接入的电池中进行 合理二次调配,最大限度降低各单体电池的充放 电次数;(3)所提方案可大幅减少微网对常规储能 元件的配置投资,且具有很好的环保效益。

4 结论

本文针对新能源微网海岛供电系统,提出一种 基于 V2G 技术将 EBBG 作为储能元件参与海岛微 网运行的方案机制与调控策略,其显著特点在于:

(1)所提方案可实现海岛现代公共交通和微网供电系统能量动态平衡两方面需求的有效结合,并同时兼顾环境保护、投资成本、电能质量、运行经济性等多方面需求;

(2)提出 EBBG 的 V2G 可用容量概念,并基于 规划的管理模式和运行机制构建其评估模型,为实 时评估其 V2G 参与微网能量动态调控能力提供有 效依据;

(3)所提 V2G 参与海岛微网运行的调控策略是 以系统整体时段运行成本最小化为前提,求得各能 量动态平衡要素、各最小优化时段的功率输出最优值。 算例分析表明,所提方案、运行机制和调控策略 具有较好的可行性和有效性,有利于进一步提高海 岛微网的可再生能源发电渗透率,并降低系统的投 资和运行成本。对于多类型(公交车、私家车、梯次 利用) EV 电池集群共同参与 V2G 服务情景下的海 岛微网系统运行机制和调控策略问题,将在后续工 作中进一步研究。

参考文献:

- [1] KAYSER-BRIL C,LIOTARD C,MAIZI N,et al. Power grids on islands:from dependency to sustainability? [C]//Proceedings of 2008 IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta,GA,United States: IEEE,2008:1-7.
- [2] PETERSON S B, WHITACRE J F, APT J. The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for storage [J]. Journal of Power Source, 2010, 195(8):2377-2384.
- [3] LOPES J A P,ALMEIDA P M R,SOARES F J. Using vehicleto-grid to maximize the integration of intermittent renewable energy resources in islanded electric grids [C] // Proceedings of 2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy:IEEE,2009:290-295.
- [4] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle to grid implementation; from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy [J]. Power Source, 2005, 1(144): 280-294.
- [5] 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.
- [6] PILLAI J R, BAK-JENSEN B. Vehicle-to-grid for islanded power system operation in bornholm[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, United States: IEEE, 2010:1-8.
- [7]魏克新,陈峭岩. 基于多模型自适应卡尔曼滤波器的电动汽车电 池荷电状态估计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):19-26.
 WEI Kexin,CHEN Qiaoyan. Electric vehicle battery SOC estimation based on multiple-model adaptive Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):19-26.
- [8] 雷肖,陈清泉,刘开培,等. 电动车电池 SOC 估计的径向基函数 神经网络方法[J]. 电工技术学报,2008,23(5):81-87.
 LEI Xiao,CHEN Qingquan,LIU Kaipei, et al. Radial-basedfunction neural network based SOC estimation for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008, 23(5):81-87.
- [9] ASHTARI A, BIBEAU E, SHAHIDINEJAD S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):341-350.
- [10] 赵胜霞,刘俊勇,向月,等.考虑配电网接纳能力的电动汽车充换电服务网基础设施配置方案分析与评估[J].电力自动化设备,2016,36(6):94-101.
 ZHAO Shengxia,LIU Junyong,XIANG Yue, et al. Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution

assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016, 36(6):94-101.

[11] 曹一家,苗轶群,江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行

36

优化[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):1-6.

CAO Yijia, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations [J]. Electric Power Automation Equioment, 2012, 32(5):1-6.

- [12] 侯建朝,胡群丰,谭忠富. 计及需求响应的风电-电动汽车协同 调度多目标优化模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):22-27.
 HOU Jianchao,HU Qunfeng,TAN Zhongfu. Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(7):22-27.
- [13] 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.

- [14] GERGAUD O,ROBIN G,MULTON B,et al. Energy modeling of a lead-acid battery withinhybrid wind/photovoltaic systems [C]//European Power Electrics Conference. Toulouse, Midi-Pyrénées, France: [s.n.], 2003:1-10.
- [15] JUHA K, PETER M. Methodology for modeling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system

with either smart or dumb electric vehicle[J]. Energy,2011,36 (3):1758-1767.

[16] 罗皎虹,吴军基. 独立风力-柴油联合发电系统运行成本分析 [J]. 南通大学学报,2007,6(2):70-77.

LUO Jiaohong, WU Junji. Cost analysis of the wind-diesel generating system[J]. Journal of Nantong University, 2007, 6(2): 70-77.

作者简介:



翁国庆(1977—),男,浙江龙游人,副教 授,博士,研究方向为 V2G 技术、智能电网、 电能质量监控(**E-mail**:wgq@zjutedu.cn);

黄飞腾(1984—),男,浙江温州人,博士 研究生,主要研究方向为智能微网运行与优 化、电能质量监控;

翁国庆

张有兵(1971—),男,湖北大冶人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电能

质量监控、电力线载波通信、微网与智能电网等; 谢路耀(1984—),男,浙江杭州人,讲师,博士,研究方向

为微网与分布式发电技术;

威 军(1981—),女,浙江宁波人,副教授,博士,研究方 向为光伏发电、微网与分布式发电技术。

V2G strategy for energy dispatch of island microgrid with EBBG

WENG Guoqing, HUANG Feiteng, ZHANG Youbing, XIE Luyao, QI Jun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Combined with the demand of green island public transportation, an energy dispatch scheme based on V2G (Vehicle to Grid) technology is proposed for island microgrid, which takes the EBBG (Electric Bus Battery Groups) as the energy storage devices. A precise mathematical model is established based on the configuration parameters and management mode of EBBG to estimate the available V2G capacity in real time for representing its dynamic ability of bidirectional energy balance. An optimization model with the minimum total operational cost of the dynamic energy balance between supply and demand sides as its objective is built for different optimization periods. The improved particle swarm optimization algorithm is applied to calculate the optimal power outputs of all energy balance elements for different optimization periods. With the wind-PV-diesel-battery hybrid microgrid of Dongfushan Island in Zhoushan as an example, the feasibility and validity of the proposed V2G-based energy dispatch scheme and operational optimization strategy are verified.

Key words: island microgrid; electric bus battery groups; vehicle to grid; available capacity; energy dispatch