



考虑 V2G 背景下微电网的一致性能量管理策略

任丽娜*, 武瀚, 焦晓红

燕山大学河北省工业计算机控制工程重点实验室, 秦皇岛 066004

* 通信作者. E-mail: renlina@ysu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-10-15; 接受日期: 2021-11-14; 网络出版日期: 2022-06-13

国家自然科学基金 (批准号: 61973265) 资助项目

摘要 电动汽车具有移动储能器的特性, 对其充放电行为进行合理调度可以对电网负荷起到削峰填谷作用, 并提高电网对风光能源的吸纳能力, 为此本文研究了含有电动汽车与电网交互 (vehicle-to-grid, V2G) 的孤岛微电网分布式能量管理策略. 首先通过充放电电价诱导机制, 提出一种包含电动汽车聚合商的多智能体微电网效益模型, 进而考虑实际能源系统在发电损耗及功率平衡约束下的社会效益最大化问题. 其次利用微电网内分布式能源之间信息交互, 设计基于多智能体一致性理论的优化求解算法, 并进一步考虑系统中存在通信随机时延的情况, 最终实现社会效益最大化且系统电价达到一致, 并对此研究背景下算法的收敛性进行分析, 给出了收敛条件. 最后采用标准 IEEE-11 总线结构对系统进行仿真验证, 证明了所提控制策略的有效性.

关键词 V2G, 多智能体系统, 发电损耗, 通信时延, 分布式一致性

1 引言

随着环境污染和能源短缺问题日益严重, 推进绿色能源生产和消费革命, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系势在必行^[1~3]. 随着风光新能源以及具有 V2G 特性的电动汽车入网, 电网结构日趋复杂, 电网调峰形势更加严峻, 如何利用先进的能源信息管理技术, 实现多种能源系统之间的协同优化, 提高能源综合利用率, 缓解电网调峰压力, 并保持配电网系统运行的经济性和可靠性, 是未来电网系统亟需解决的问题. 因此基于分布式方法的信息能源管理系统受到广泛关注^[4].

文献 [5] 提出了一种基于动态分组的分布式风电机的功率分配策略, 解决了一类含有风电场的电力系统的功率分配问题; 文献 [6] 提出了一种基于离散一致性算法的分层控制功率分配方案, 解决了储能单元之间功能、参数和信息存在不对称性的问题; 文献 [7] 提出了一种基于两层结构的含有事件触发的优化策略, 解决了一类混合能源系统的最优经济调度问题. 但是上述研究均以风光发电、可变负

引用格式: 任丽娜, 武瀚, 焦晓红. 考虑 V2G 背景下微电网的一致性能量管理策略. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1098–1113, doi: 10.1360/SSI-2021-0218
Ren L N, Wu H, Jiao X H. Consistency-based energy management strategy for microgrids with V2G (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1098–1113, doi: 10.1360/SSI-2021-0218

载等进行电网功率调节, 没有发挥电动汽车对电网优化调节的重要作用. 文献 [8] 提出了一种混合整数二阶锥的优化方法, 最终得到电动汽车 24 小时最优的充放电过程, 为配电网络运营规划者提供了新的规划方案; 文献 [9] 提出了一种基于神经网络的自适应等效消耗最小化策略, 解决了电动汽车电池老化问题, 实现了经济最优化; 文献 [10] 考虑了 V2G 技术中汽车用户关心的电池老化及更换成本, 运用启发式算法解决了电动汽车充电不协调影响电网稳定性的问题. 但是上述研究均以成本最低为目标, 忽略了实际微网中的电力损耗等因素, 对电动汽车的削峰填谷作用也未能应用于功率分配. 文献 [11] 提出了一种有向网络一致性协议, 解决了一类具有时滞和脉冲拓扑交换的复杂多智能体网络的一致性; 文献 [12] 提出了一种基于梯度下降和一致性协议的分布式优化算法来解决电网中的经济调度问题; 文献 [13] 对一阶多智能体系统提出了一种含有时滞的分布式系统优化算法, 解决了各智能体过于依赖自身状态和依赖邻居节点状态进行优化的问题. 但是上述文章对多智能体通信时延的研究多考虑固定时延, 并且都为理论上的分布式算法分析, 没有应用于实际微电网.

综上, 本文研究了多能源分布式微电网中随机调峰需求下的能源优化调度问题. 首先充分利用电动汽车 V2G 特性, 引入电动汽车聚合商概念下的电池损耗成本, 建立一种电价诱导的电动汽车削峰填谷模型和效益局部目标函数, 实现社会效益最大化的同时调节微电网的用电峰谷, 增强电网对风光能源的吸纳能力. 随后基于含电动汽车模式下的微网系统的多智能体框架, 构建实际电网存在发电损耗情况下的目标函数, 考虑到信息传递时延对微电网能量分配的影响, 设计了系统存在随机时延及发电损耗情况下的分布式加速优化迭代算法, 并对算法的收敛性进行了分析. 最后以 11 节点的微网结构为例, 对提出的模型及算法进行仿真分析, 验证了模型算法的可行性.

2 多智能体系统模型建立

2.1 多智能体网络模型

多智能体系统是由多个能够感知周围环境、相互通信并且具有执行指令能力的单个个体通过相互间的信息共享与合作组成的网络化系统. 将这一思想应用于电网系统, 本文采用在网络总线节点上设置相应代理, 通过代理进行节点间的信息交换, 从而形成了图 1 所示的微电网多智能体系统. 微电网系统的通信网络代理可以用图论来表示. 用 G 表示图 1 所示的多智能体系统的网络拓扑, $G = (V, E, A)$ 代表通信结构, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$ 代表智能体代理的集合, v_i 代表第 i 个代理元素, n 为节点数; E 为节点之间边的集合, 用 $N_i = \{j | (i, j) \in E\}$ 表示节点 i 的邻居节点的集合, 其中 j 的个数记为 $|N_i|$, 且 $E \in V \times V$, 所以系统是强连通的; A 为 $n \times n$ 的邻接矩阵, 表示图 1 中代理之间的连接关系, 用于第 3 节中的算法设计, 其元素 a_{ij} 表达式如下^[14]:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max_{i \in V} |N_i| + 1}, & j \in N_i, \\ 1 - \sum_{j \in N_i} \frac{1}{\max_{i \in V} |N_i| + 1}, & i = j, \\ 0, & \text{others.} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 系统经济模型

本文考虑的是一天中单个时间段的能量分配问题. 例如将一天的 24 小时分为 96 个 15 分钟的时间段. 后文中提到的电网电价、电动汽车电价、功率、成本等均为单个时间段内的参数.

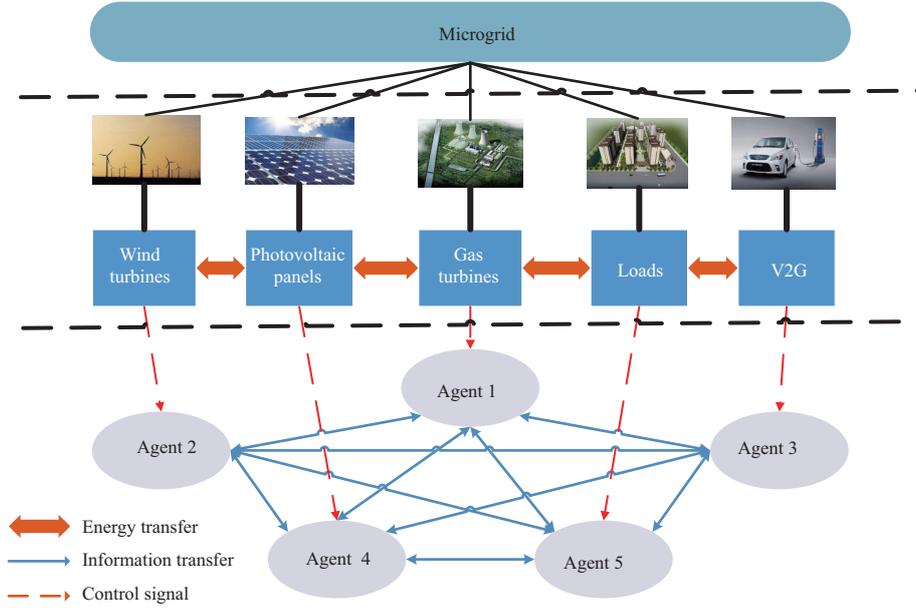


图 1 (网络版彩图) 多智能体系统的结构

Figure 1 (Color online) Multi-agent system structure

(1) 发电装置. 本文使用 P_g 表示发电节点 g 产生的功率. 定义发电成本 $C_g(P_g)$ 为 P_g 的二次函数形式^[15], 即

$$C_g(P_g) = \alpha_g P_g^2 + \beta_g P_g + \gamma_g, \quad (2)$$

其中, $\alpha_g > 0, \beta_g, \gamma_g$ 为第 g 个发电节点的成本参数, 且发电功率约束为 $P_g \in (0, P_{gM})$, P_{gM} 为第 g 个发电节点的最大发电功率.

本文考虑传输功率损耗由发电侧承担, 并定义如下:

$$P_g^l = R_g I_g^2 = R_g (P_g / U_g)^2 = B_g \cdot P_g^2, \quad (3)$$

其中, P_g^l 为第 g 个发电节点的损耗功率, R_g 为第 g 个发电节点传到其他总线线路的等效电阻, I_g 为第 g 个发电节点传到其他总线线路的等效电流, U_g 为第 g 个发电节点传到其他总线线路的等效电压, B_g 为第 g 个发电节点的功率损耗系数.

定义 p 为电价. 发电节点的效益为卖出的功率收入减去其发电成本, 即

$$\pi_g(P_g) = p \cdot (P_g - B_g P_g^2) - C_g(P_g). \quad (4)$$

(2) 用户负载. 对于负载单元, 构造效用函数 $U_d(P_d)$, 表示第 d 个负载单元对当前功率 P_d 的满意程度, 通常满足如下 3 个性质:

性质1 效用函数为一个非递减的函数.

性质2 效用函数的导数随用电量的增加而减小.

性质3 无用电时满意度为 0, 当用电大于一定程度时满意度为定值.

进而设计负载的效用函数如下:

$$U_d(P_d) = \begin{cases} -\beta_d P_d - \alpha_d P_d^2, & -P_d \leq \frac{\beta_d}{2\alpha_d}, \\ \frac{\beta_d^2}{4\alpha_d}, & -P_d > \frac{\beta_d}{2\alpha_d}, \end{cases} \quad (5)$$

其中 α_d, β_d 分别为第 d 个负载节点效用函数的参数, 且负载功率约束为 $P_d \in (-P_{dM}, 0)$, P_{dM} 为第 d 个负载节点的最大消耗功率值. 定义第 d 个负载单元的效益 $\pi_d(P_d)$ 为其效用减去购电成本, 即

$$\pi_d(P_d) = U_d(P_d) - p \cdot |P_d|. \quad (6)$$

(3) 电动汽车. 电动汽车通过聚合商形式交易. 聚合商以电价 p 向电网购买电能或者输送电能, 聚合商以电价 \tilde{p} 与电动汽车进行充放电交易. 其中电动汽车聚合商的经济效益包含如下 3 部分.

购电成本. 聚合商的购电成本为当前电网提供的电价与购买功率的乘积.

电池成本. 定义电动汽车聚合商的充放电成本如下^[16]:

$$C_h = \frac{C_{\text{cap}} \cdot |P_h|}{E_{\text{cap}} \cdot l_c(\text{dod}_h) \cdot \eta^2}, \quad (7)$$

$$l_c(\text{dod}_h) = 649 \cdot (\text{dod}_h)^{-0.795}, \quad (8)$$

$$\text{dod}_h = 1 - \frac{E_h}{E_{\text{cap}}}, \quad (9)$$

其中, C_{cap} 为聚合商电池总资本, E_{cap} 为电池容量, dod_h 为电池的放电深度, l_c 为电池储存的循环次数, η 为电池的充放电效率. E_h 为电池当前容量. P_h 大于 0 时放电, 小于 0 时充电, P_h 约束为 $P_h \in (-P_{hM}, P_{hM})$, 其中 P_{hM} 为最大充放电功率.

用户侧效益. 为了使聚合商具有调节负荷峰谷的作用, 设计用户侧电价由当前时间段开始时的负载总功率的值决定, 且此电价持续当前整个时间段不变. 建立用户侧电价 \tilde{p} 和初始负载用电总功率之间的关系如式 (10), 且满足性质 4 和 5.

性质 4 聚合商与用户之间电价和初始负载总功率的关系为一个非递减的函数.

性质 5 当负载总功率趋于用电高峰或者低谷程度越大, 聚合商与用户之间电价变化速率越快.

$$\tilde{p} = p + 2.4 \left(\frac{P^d - (P_{\text{max}}^d + P_{\text{min}}^d) / 2}{P_{\text{max}}^d - P_{\text{min}}^d} \right)^3, \quad (10)$$

其中, P^d 为当前时段初始负载总功率值, P_{max}^d 为用电最高峰时的负载总功率值, P_{min}^d 为用电最低谷时的负载总功率值, p 为当前时段的电网电价.

定义削峰填谷系数 κ , 表示电价 \tilde{p} 诱导削峰填谷时对效用函数的影响. 其表达式如下:

$$\kappa = 0.5 \cdot \frac{\tilde{p} - p_{\text{min}}}{p_{\text{max}} - p_{\text{min}}} + 0.5, \quad (11)$$

其中, p_{min} 为负载在用电低谷时对应的聚合商与用户之间的最小电价, p_{max} 为负载在用电高峰时对应的聚合商与用户之间的最大电价.

依据性质 1~3 和削峰填谷系数, 本文提出一种电动汽车聚合商的效益函数如下:

$$U_h = \begin{cases} \beta_h |P_h| - \kappa \alpha_h P_h^2, & |P_h| \leq \frac{\beta_h}{2\kappa\alpha_h}, \\ \frac{\beta_h^2}{4\kappa\alpha_h}, & |P_h| > \frac{\beta_h}{2\kappa\alpha_h}, \end{cases} \quad (12)$$

其中 a_h, β_h 为第 h 个电动汽车效用函数的参数.

由于充电和放电模型中功率的正负代表电动汽车的充电和放电模式, 但是效用函数式 (12) 根据定义为一个非负的分段函数, 即式 (12) 无法随功率改变正负. 所以本文分两种情况, 即电动汽车总体向电网获取电能和总体向电网回馈电能, 定义其效益函数, 即

$$\pi_h = \begin{cases} U_h - |P_h| \cdot p - C_h, & \text{Recharge,} \\ P_h \cdot p - C_h - U_h, & \text{Discharge.} \end{cases} \quad (13)$$

注1 当负载处于用电高峰时, \bar{p} 较大, 即对应存在一个较大的 κ , 作用于 U_h 会使其在同功率下变小, 即效益变大; 同理可分析当负载处于用电低谷时, 较小的电价 \bar{p} 产生一个较小的 κ , 作用于效用函数会使得同功率下 U_h 变大, 效益同样变大. 综上, 引入削峰填谷系数 κ 之后, 增加了聚合商获得的效益, 调节了用电峰谷, 扩大了总体社会效益.

3 控制问题描述

3.1 通信时延问题

电网为一个大范围物理系统, 实际通信层的每个节点之间具有一定的距离. 那么节点 i 在获取其相连的其他节点 j 的信息时, 会产生一定的时延. 电网系统中不同的通信通道因为距离不同有不同的时延; 同一通信通道也会因为通信设施的波动、信号传输环境改变而产生差异, 所以时延是具有一定波动范围的随机时延. 定义第 i 个节点接收到第 j 个节点信息的通信时延参数如下:

$$\begin{cases} \tau_{ij} = 0, & i = j, i \in V, j \in V, \\ \tau_{ij} \in (\tau_{ij,\min}, \tau_{ij,\max}), & i \neq j, i \in V, j \in V, \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\tau_{ij,\min}, \tau_{ij,\max}$ 分别为第 i 个节点接收到第 j 个节点信息的时延波动的下限和上限, 且 τ_{ij} 每次取值为满足这个上下限的随机整数.

3.2 目标函数和约束条件

定义系统的总目标函数为发电装置、负载装置和电动汽车 3 部分效益的总和. 其中各个节点的效益为其对应节点功率的相关函数, 即最终各节点的功率分配达到最优时, 社会效益实现最大化.

当电动汽车处于充电状态时总目标函数为

$$\max \left(\sum_{g \in V_g} \pi_g + \sum_{d \in V_d} \pi_d + \sum_{h \in V_h} \pi_h \right) = \min \left(\sum_{g \in V_g} C_g - \sum_{d \in V_d} U_d - \sum_{h \in V_h} (U_h - C_h) \right). \quad (15)$$

当电动汽车处于放电状态时总目标函数为

$$\min \left(\sum_{g \in V_g} C_g - \sum_{d \in V_d} U_d + \sum_{h \in V_h} C_h + U_h \right), \quad (16)$$

其中, V_g, V_d, V_h 分别代表发电节点、负载节点和电动汽车节点的集合.

同时, 电网运行还要满足功率平衡约束, 即

$$\text{s.t. } \sum_{g \in V_g} (P_g - B_g P_g^2) + \sum_{d \in V_d} P_d + \sum_{h \in V_h} P_h = 0. \quad (17)$$

在上述问题中, 约束公式 (17) 含有二次项, 使得问题的可行域非凸. 依据参考文献 [17] 中的结论, 当满足分布式发电的可调发电总量的最小值之和小于等于可调响应负载总量的最大值之和时, 功率平衡约束 (17) 可保优松弛变化如下:

$$\text{s.t. } \sum_{g \in V_g} (P_g - B_g P_g^2) + \sum_{d \in V_d} P_d + \sum_{h \in V_h} P_h \geq 0. \quad (18)$$

此时, 式 (15) 和 (16) 在约束 (18) 下为凸优化问题, 且和原问题具有相同解.

注2 本文考虑上述风力发电和太阳能发电的约束下限均为 0, 以社会效益最大为最终目标. 若考虑绿色能源的利用率, 或使电网实现最大吸纳绿色能源, 只要改变其下限约束或增加对应等式约束即可, 依然可以使用分布式算法进行优化. 模型具有可扩展性且可以根据国家政策和实际情况进行调整和个性化设计.

4 基于一致性的微电网分布式能量管理

4.1 一致性算法设计

设计微电网中电动汽车处于充电状态下的一致性优化调度策略. 定义 p_i 为电网中节点 i 的功率输出, $i \in V$, V 为 V_g, V_d, V_h 集合的并集. 首先将上述模型 (15) 和约束 (18) 写成拉格朗日 (Lagrange) 函数如下:

$$\begin{aligned} L(P, \lambda, \gamma, \vartheta) = & \sum_{g \in V_g} C_g + \sum_{d \in V_d} -U_d + \sum_{h \in V_h} (C_h - U_h) + \lambda \left(\sum_{g \in V_g} (P_g - B_g P_g^2) \right. \\ & \left. + \sum_{d \in V_d} P_d + \sum_{h \in V_h} P_h \right) + \sum_{i \in V} \gamma_i (P_{i,\min} - P_i) + \sum_{i \in V} \vartheta_i (P_i - P_{i,\max}), \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\lambda, \gamma_i, \vartheta_i$ 为拉格朗日系数, $P_{i,\min}, P_{i,\max}$ 为第 i 个节点功率输出的下限和上限. 而本文考虑的是离散时间, 决策变量约束范围内连续的优化问题, 可以利用卡罗什 - 库恩 - 塔克 (Karush-Kuhn-Tucker, KKT) 条件^[18] 得

$$\frac{\partial L}{\partial P_g^*} = \frac{dC_g}{dP_g^*} + \lambda(2B_g P_g^* - 1) - \gamma_g + \vartheta_g = 0, \quad \forall g \in V_g, \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_d^*} = \lambda - \gamma_d + \vartheta_d - \frac{dU_d}{dP_d^*} = 0, \quad \forall d \in V_d, \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_h^*} = \lambda - \gamma_h + \vartheta_h + \frac{dC_h}{dP_h^*} - \frac{dU_h}{dP_h^*} = 0, \quad \forall h \in V_h, \quad (22)$$

$$\lambda \left(\sum_{d \in V_d} P_d^* + \sum_{g \in V_g} (P_g^* - B_g P_g^{*2}) + \sum_{h \in V_h} P_h^* \right) = 0, \quad (23)$$

$$\gamma_i (P_{i,\min} - P_i^*) = 0, \quad \gamma_i \geq 0, \quad \forall i \in V, \quad (24)$$

$$\vartheta_i (P_i^* - P_{i,\max}) = 0, \quad \vartheta_i \geq 0, \quad \forall i \in V. \quad (25)$$

依据式 (20)~(22) 定义一致性变量 d_i . 当各节点一致性变量达到一致时, 系统满足功率平衡条件, 各个节点之间达成统一的交易电价, 并且社会效益最大. 一致性变量定义如下:

$$d_i = \begin{cases} U_i', & i \in V_d, \\ \frac{C_i'}{(1-2B_i P_i^*)}, & i \in V_g, \\ U_i' - C_i', & i \in V_h, \end{cases} \quad (26)$$

其中, U_i' 为第 i 个节点的效用 U_i 的一阶导数, C_i' 为第 i 个节点的成本 C_i 的一阶导数.

注3 本文选择的一致性变量与对应节点的增量成本和增量效用相关, 其物理含义为系统节点之间的电价, 最终收敛于最优的拉格朗日系数 λ , 代表所有节点的电价达成一致.

进而设计一致性变量迭代如下:

$$d_i(k+1) = \sum_{j \in V} a_{ij} d_j(k - \tau_{ij}) + \eta \xi_i(k), \quad i \in V, \quad (27)$$

其中, a_{ij} 由式 (1) 确定, 迭代步长 η 为一个常数.

由式 (26) 推导功率更新迭代公式:

$$P_i(k+1) = \frac{d_i(k+1) - \beta_i}{2\alpha_i - 2d_i(k+1)B_i}, \quad i \in V_g, \quad (28)$$

$$P_i(k+1) = \frac{\beta_i - d_i(k+1)}{2\alpha_i}, \quad i \in V_d, \quad (29)$$

$$P_i(k+1) = \frac{\beta_i - C_i' - d_i(k+1)}{2\kappa\alpha_i}, \quad i \in V_h. \quad (30)$$

这里定义 ξ_i 为功率不平衡程度, 其迭代公式:

$$\xi_i(k+1) = \sum_{j \in V} a_{ij} \xi_j(k - \tau_{ij}) + (P_i(k) - B_i P_i^2(k)) - (P_i(k+1) - B_i P_i^2(k+1)), \quad i \in V_g, \quad (31)$$

$$\xi_i(k+1) = \sum_{j \in V} a_{ij} \xi_j(k - \tau_{ij}) + P_i(k+1) - P_i(k), \quad i \in V_d \cup V_h. \quad (32)$$

同理, 当电动汽车向电网放电时, 可依据上述过程设计一致性算法, 此时, 功率平衡约束不变, 目标函数公式为式 (16).

KKT 条件中式 (22) 变化如下:

$$\frac{\partial L}{\partial P_h^*} = \frac{dC_h}{dP_h^*} + \frac{dU_h}{dP_h^*} - \lambda - \gamma_h + \vartheta_h = 0, \quad \forall h \in V_h. \quad (33)$$

式 (26) 中一致性变量变为

$$d_i = C_i' + U_i', \quad i \in V_h. \quad (34)$$

电动汽车的功率更新公式 (30) 变为

$$P_i(k+1) = \frac{d_i(k+1) - \beta_i - C_i'}{-2\kappa\alpha_i}, \quad i \in V_h. \quad (35)$$

4.2 算法收敛性分析

为了分析所提出算法的收敛性, 引入如下两个引理.

引理1 ([19]) 若矩阵 \tilde{A} 可以写成分块的下三角形矩阵, 即有 $\tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_1 & 0 \\ \tilde{A}_2 & \tilde{A}_3 \end{pmatrix}$, 其中 \tilde{A} 的特征值集合为 $X(\tilde{A})$, \tilde{A}_1 和 \tilde{A}_3 的特征值集合分别为 $X(\tilde{A}_1)$ 和 $X(\tilde{A}_3)$, 那么存在 $X(\tilde{A})=X(\tilde{A}_1) \cup X(\tilde{A}_3)$.

引理2 (Perron-Frobenius 定理 [20]) 如果一个矩阵为一个不可约矩阵, 那么它一定存在一个非负实数特征值 \tilde{X}_{pf} ; 而这个矩阵所有的特征值均小于等于这个非负实数特征值 \tilde{X}_{pf} ; 如果这个不可约矩阵是原始的, 那么 \tilde{X}_{pf} 是一个单根特征值; 当且仅当这个不可约矩阵的特征值 \tilde{X}_s 的关联特征向量 $\tilde{V}=[\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_r]^T, \tilde{v}_n \in \mathbb{R}, \forall n \in [1, r]$ 使得 \tilde{V} 的所有的元素都大于 0 时, 有 $\tilde{X}_s = \tilde{X}_{\text{pf}}$.

下面将给出定理, 保证式 (15) 收敛.

定理1 (电动汽车总体充电时的算法收敛定理) 若图 G 是强连通的且每一条通信链路上的时延 $\tau_{ij}, \forall (i, j) \in E$ 是随机的, 那么存在 $0 < \varepsilon < 1$, 使得步长满足 $0 < \eta < \varepsilon$ 时, 在一致性算法 (27)~(32) 下, 下式成立:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left[\sum_{g \in V_g} (P_g - B_g P_g^2) + \sum_{d \in V_d} P_d + \sum_{h \in V_h} P_h \right] = 0,$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d_i(k) = d_c, \forall i \in V,$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_i(k) = P_i^*, \forall i \in V,$$

其中, k 为迭代次数, d_c 为一个常量, P_i^* 为第 i 个节点的最终收敛功率值.

证明 令 $\tau_M = \max \{\tau_{ij}\}, (i, j) \in E$ 表示所有通信道路上的最大延时. 当迭代过程中迭代次数大于 τ_M 时, 依据 3.1 小节中每一个节点的一致性变量模型和功率不匹配程度函数写出如下扩展系统 [21]:

$$\begin{aligned} d(k+1) &= W_0 d(k) + W_1 d(k-1) + \dots + W_{\tau_M} d(k-\tau_M) + \eta \xi(k), \\ d(k) &= d(k), \\ \dots & \\ d(k-\tau_M+1) &= d(k-\tau_M+1), \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= Q_0 \xi(k) + Q_1 \xi(k-1) + \dots + Q_{\tau_M} \xi(k-\tau_M) - (P(k+1) - P(k)), \\ \xi(k) &= \xi(k), \\ \dots & \\ \xi(k-\tau_M+1) &= \xi(k-\tau_M+1), \end{aligned} \quad (37)$$

其中 $W_0, W_1, \dots, W_{\tau_M}, Q_0, Q_1, \dots, Q_{\tau_M}$ 分别为对应节点一致性变量和功率不匹配程度的扩展系统的系数, 且 $W_0, W_1, \dots, W_{\tau_M}$ 的和为 1.

设 $d(k) = [d_g(k), d_d(k), d_h(k)]'$, $\xi(k) = [\xi_g(k), \xi_d(k), \xi_h(k)]'$, 则整个多智能体系统可以表示如下:

$$\begin{bmatrix} d(k+1) \\ \xi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ B_1 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix}, \quad (38)$$

其中系统系数矩阵中有 $A_1 = \text{diag}[A_{g1}, A_{d1}, A_{h1}]'$, $A_2 = \text{diag}[A_{g2}, A_{d2}, A_{h2}]'$, $B_1 = \text{diag}[B_{g1}, B_{d1}, B_{h1}]'$, $B_2 = \text{diag}[B_{g2}, B_{d2}, B_{h2}]'$, 并有如下格式:

$$A_{*1} = \begin{bmatrix} W_{*0} & W_{*1} & \cdots & W_{*\tau M} \\ I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}, A_{*2} = \begin{bmatrix} \eta I_* & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

系统 (38) 中, $d_g(k)$, $d_d(k)$, $d_h(k)$ 分别为发电节点、负载节点和电动汽车节点在 k 时刻的一致性变量; 矩阵 A_{*1} 为系统 (38) 中 A_{g1} , A_{d1} , A_{h1} 这 3 个矩阵的格式; $W_{*0}, W_{*1}, \dots, W_{*\tau M}$ 分别为 A_{g1}, A_{d1}, A_{h1} 对应拓展系统 (36) 的系数矩阵, 维度分别与发电节点、负载节点、电动汽车节点个数相同; 矩阵 A_{*2} 为系统 (38) 中 A_{g2}, A_{d2}, A_{h2} 这 3 个矩阵的格式; I_* 为单位矩阵, 维度与 A_{g1}, A_{d1}, A_{h1} 对应.

为了得到系统 (38) 中 B_{g1}, B_{d1}, B_{h1} 和 B_{g2}, B_{d2}, B_{h2} 的统一格式, 对式 (31) 做如下考虑: B_g 通常为 10^{-5} 数量级的常数, 远小于节点成本模型系数 α_g , 则式 (31) 中的发电装置功率之差可变为

$$P_g(k) - B_g P_g^2(k) - P_g(k+1) + B_g P_g^2(k+1) = \left(\frac{d_g(k) - d_g(k+1)}{2\alpha_g} \right) \left(1 - B_g \cdot \frac{d_g(k) + d_g(k+1) - 2\beta_g}{2\alpha_g} \right). \quad (39)$$

将式 (31) 中功率更新变换成如下形式:

$$\tilde{P}_i(k+1) = \beta_i' \tilde{d}_i(k+1) + \alpha_i', \quad i \in V_g. \quad (40)$$

此时功率更新公式 (40) 的系数 β_i', α_i' 如下:

$$\beta_i' = \begin{cases} \left(\frac{1}{2\alpha_i} - B_i \cdot \frac{d_i(k) + d_i(k+1) - 2\beta_i}{4\alpha_i^2} \right), & i \in V_g, \\ \frac{-1}{2\alpha_i}, & i \in V_d, \\ \frac{-1}{2\alpha_i}, & i \in V_h, \end{cases} \quad \alpha_i' = \begin{cases} 0, & i \in V_g, \\ \frac{\beta_i}{2\alpha_i}, & i \in V_d, \\ \frac{\beta_i + C_i'}{2\kappa\alpha_i}, & i \in V_h, \text{ Discharge}, \\ \frac{\beta_i - C_i'}{2\kappa\alpha_i}, & i \in V_h, \text{ Recharge}. \end{cases}$$

定义 β 是以 β' 为对角线元素, 其余元素全为 0 的矩阵. 则有

$$B_{*1} = \begin{bmatrix} \beta(I - W_0) & \beta(-W_1) & \cdots & \beta(-W_{\tau M}) \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{*2} = \begin{bmatrix} Q_0 - \eta\beta & Q_1 & \cdots & Q_{\tau M} \\ I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}.$$

将系统 (38) 的系数矩阵记为 A , 并划分成分块矩阵. 将矩阵 A 看作矩阵 A_0 受到矩阵 H 的干扰, 分别分析 A_0 的特征值以及矩阵 H 对矩阵 A_0 特征值的影响. 即做如下分解:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ B_1 & B_2 \end{bmatrix} = A_0 + \eta H = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ B_1 & B_2^* \end{bmatrix} + \eta \cdot \begin{bmatrix} 0 & \tilde{I} \\ 0 & -\tilde{\beta} \end{bmatrix}, \quad (41)$$

其中, 用 B_{*2}^* 表示 B_2^* 含有的 3 个对角线分块矩阵元素 $B_{g2}^*, B_{d2}^*, B_{h2}^*$. $B_{*2}^*, \tilde{I}, \tilde{\beta}$ 表示如下:

$$B_{*2}^* = \begin{bmatrix} Q_{*0} & Q_{*1} & \cdots & Q_{*\tau M} \\ I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}, \tilde{I} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ & & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{\beta} = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ & & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其中 $Q_{*0}, Q_{*1}, \dots, Q_{*\tau M}$ 分别为 B_{g2}, B_{d2}, B_{h2} 对应拓展系统 (37) 的系数矩阵, 维度分别与发电节点、负载节点、电动汽车节点个数相同.

由于 A_0 为分块下三角矩阵, 根据引理 1 可知特征值为 A_1 和 B_2^* 特征值集合的并集, 又因为 A_1 为行随机矩阵, 且所有元素为正数, 系统的图拓扑为强连通, 所以 A_1 有一个单根特征值 1, 其他特征值的模小于 1. ψ (满足 $1^T\psi=1$) 和 $\phi=[1^{N \times 1}, \dots, 1^{N \times 1}]$, 分别表示矩阵 A_1 对应的左右特征向量, 即 $\psi^T A_1 = \psi^T, A_1 \phi = \phi$, 其中 $1^{N \times 1}$ 表示维度为 N 的列向量.

由矩阵 B_2^* 的形式可知 B_2^* 为不可约矩阵, 由引理 2 可以证明 1 为 B_2^* 唯一的最大特征值. 设有如下关系:

$$B_2^* z = z, \quad z = [z_{g1}, \dots, z_{g\tau M}, z_{d1}, \dots, z_{d\tau M}, z_{h1}, \dots, z_{h\tau M}]. \quad (42)$$

求解式 (42) 得到所有的 z , 对其归一化处理, 即得到矩阵 B_2^* 的右特征向量. 同理设

$$y^T B_2^* = y^T, \quad y^T = [y_{g1}^T, \dots, y_{g\tau M}^T, y_{d1}^T, \dots, y_{d\tau M}^T, y_{h1}^T, \dots, y_{h\tau M}^T]. \quad (43)$$

根据式 (43) 计算所有的 y^T , 可以得到矩阵 B_2^* 的左特征向量.

通过上述分析可知, A_0 具有两个等于 1 的特征值, 设其为 $\hat{X}_1 = \hat{X}_2 = 1$, 构造特征向量 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\beta}_1^T, \tilde{\beta}_2^T$ 为矩阵 A_0 的独立左右特征向量, 表达如下:

$$M = [\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2] = \begin{bmatrix} 0 & \varphi \\ \theta z & -\varsigma z \end{bmatrix}, \quad V^T = \begin{bmatrix} \tilde{\beta}_1^T \\ \tilde{\beta}_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi^T \tilde{\beta} & y^T \\ \psi^T & 0^T \end{bmatrix},$$

且满足 $V^T M = I$, 其中

$$\varsigma = \frac{\sum_{w=1}^N \sum_{r=1}^N \tilde{\beta}_{wr}}{y^T z}, \quad \theta = \frac{1}{y^T z}.$$

根据矩阵特征值扰动理论, 则有

$$V^T H M = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \theta \psi^T z & -\varsigma \psi^T z \end{bmatrix}. \quad (44)$$

由式 (44) 可知, $V^T H M$ 的两个特征值为 0, $-\varsigma \psi^T z$, 所以有 $d\hat{x}_1/d\varepsilon = 0, d\hat{x}_2/d\varepsilon = -\varsigma \psi^T z < 0$, 即矩阵 A_0 的第 1 个特征值 1 不受扰动矩阵 H 的影响, 当步长 η 足够小时第 2 个特征值 1 会在 H 的影响下逐渐变小. 所以可以得到结论, 矩阵 A 有唯一的特征值 1, 其余特征值的模均小于 1. 所以有

$$\begin{bmatrix} d(k+1) \\ \xi(k+1) \end{bmatrix} = A^k \begin{bmatrix} d(0) \\ \xi(0) \end{bmatrix} \rightarrow A^* \begin{bmatrix} d(0) \\ 0 \end{bmatrix},$$

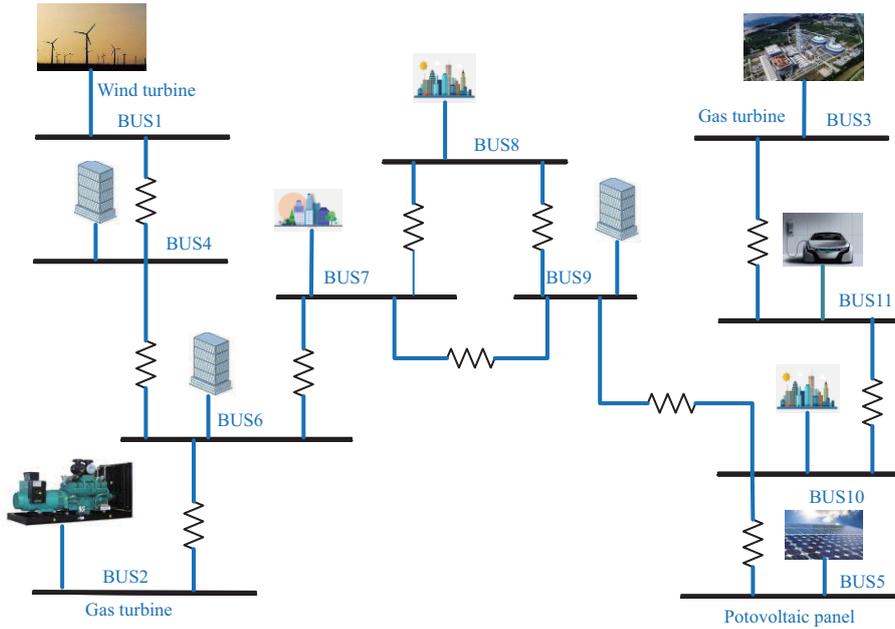


图 2 (网络版彩图) 11 节点微电网拓扑结构
Figure 2 (Color online) 11-node grid topology

其中 A^* 最终为一个定值, $d(0)$ 为各节点一致性变量的初值, 故有 $\lim_{k \rightarrow \infty} d_i(k) = d_c$, $\lim_{k \rightarrow \infty} \xi_i(k) = 0$, $\forall i \in V$, 算法收敛, 定理 1 成立. 同理通过上述过程可证明式 (16) 也收敛.

收敛条件分析: 系统的收敛性受到式 (44) 的特征值 $-\varsigma\psi^T z$ 的影响, 而 $-\varsigma\psi^T z$ 又和系统的通信时延的最大值 τ_M 相关, 且 τ_M 增大, $-\varsigma\psi^T z$ 越大, 特征值 $\hat{X}_2 = 1$ 变小的速度越慢. 即需要一个足够小的 η 来保证系统的收敛性. 因为通信系统的时延具有随机性, 且时延越大收敛速度越慢, 收敛性越难保证. 考虑极端情况, 即所有的通信延时均出现其允许范围内的最大值时, 系统的第二大特征值变小速度最慢, 收敛时间达到最大, 有 $\tau_{ij} = \tau_{ij, \max}, i \in V, j \in V, \tau_M = \max\{\tau_{ij, \max}\}, i \in V, j \in V$, 此时系统处于最不稳定状态, 设存在一个足够小的 v , 使得当 $0 < \eta < v$ 时, 系统收敛, 那么系统在所有情况下均收敛. 步长选择将在第 5 节仿真中给出.

5 模型仿真及分析

本节对上文所建立的模型和设计的分布式算法在标准的 IEEE-11 总线系统下进行仿真.

考虑 11 节点的微电网拓扑结构如图 2 所示, 其中总线 1 为风电节点, 总线 2 和 3 为燃气发电节点, 总线 5 为光电节点, 总线 11 为电动汽车节点, 其余为负载节点. 4 机 11 节点电网系统的参数如表 1 所示 [22], 其中功率单位为 kW, 其成本以美分为单位, 即电价单位为 $\text{¢}/\text{kWh}$. 有时延电动汽车总体放电时, 仿真结果如图 3(a)~(c) 所示. 有时延电动汽车总体充电时, 仿真结果如图 4(a)~(c) 所示.

由图 3(a) 和 4(a) 可以验证本文选择的一致性变量, 即式 (26) 和 (34) 均收敛, 并且有时延电动汽车充电时收敛到 $5.1824 \text{ ¢}/\text{kWh}$, 有时延放电时收敛到 $5.2985 \text{ ¢}/\text{kWh}$, 即一致性变量也就是电网节点交易电价达到一致, 实现了在满足微电网功率平衡时的社会效益最大; 图 3(b) 和 4(b) 验证了在电动汽车充电和放电两种情况下, 其功率输出均收敛, 并且输出满足上下限约束和功率平衡条件; 图 3(c) 和 4(c) 验证了功率不匹配程度收敛于 0, 即电网运行稳定, 算法可行.

表 1 微电网参数

Table 1 Parameters of microgrid nodes

Node	Initial power (kW)		α_i	β_i	Power constraint (kW)
	Discharging	Charging			
1	36	29	0.062	4.20	(0, 50)
2	30	32	0.020	1.14	(0, 120)
3	34	25	0.350	0.00	(0, 70)
4	-21	-20	0.069	7.05	(-40, 0)
5	29	36	0.075	3.25	(0, 50)
6	-30	-19	0.085	9.00	(-50, 0)
7	-33	-18	0.080	8.75	(-50, 0)
8	-23	-18	0.078	9.20	(-40, 0)
9	-23	-14	0.072	8.25	(-40, 0)
10	-19	-17	0.082	8.36	(-40, 0)
11	20	-16	0.090	8.00	(-30, 30)

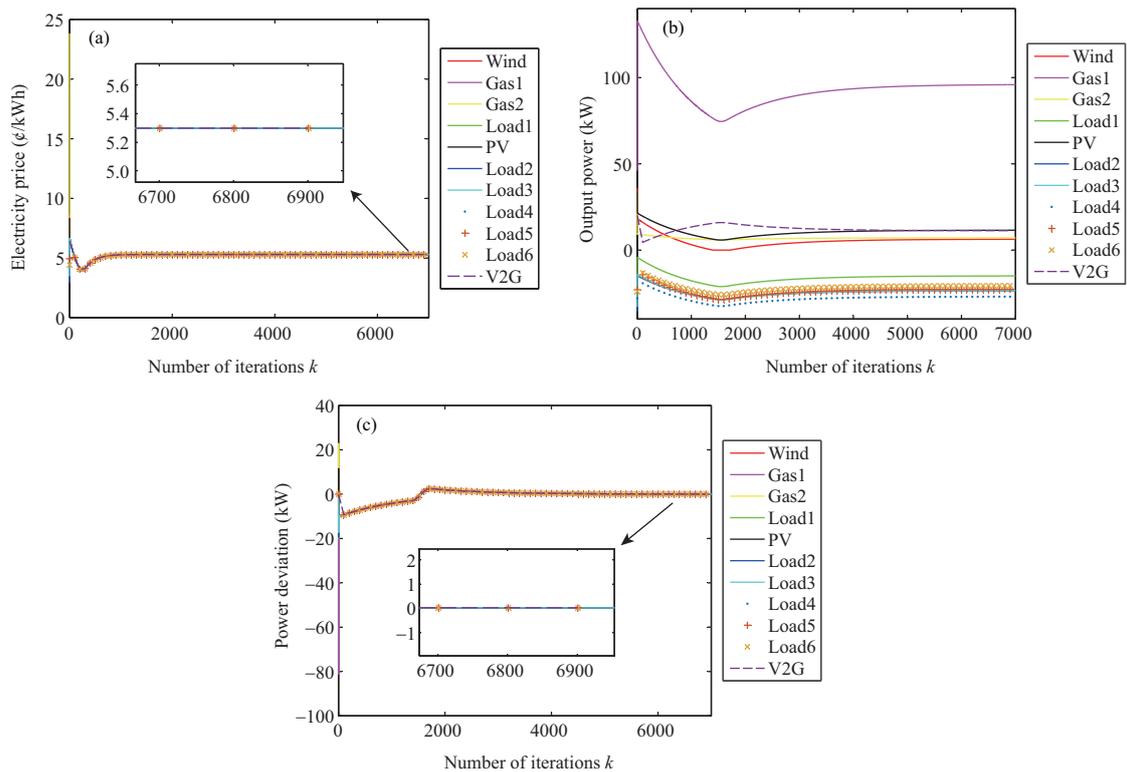


图 3 (网络版彩图) 电动汽车放电时, (a) 一致性变量的变化, (b) 功率输出的变化和 (c) 功率供需偏差的变化

Figure 3 (Color online) Variation of (a) the consistency variable, (b) power output, and (c) supply and demand deviation with the number of iterations when the electric vehicle is discharging

电动汽车充电和放电时, 仿真选用的步长分别为 0.0026 和 0.0035. 为了探究随机时延对系统的影响, 将系统的时延 τ_{ij} 均变为 0, 步长不变, 在不考虑随机时延的情况下, 使用相同的参数进行仿真, 并

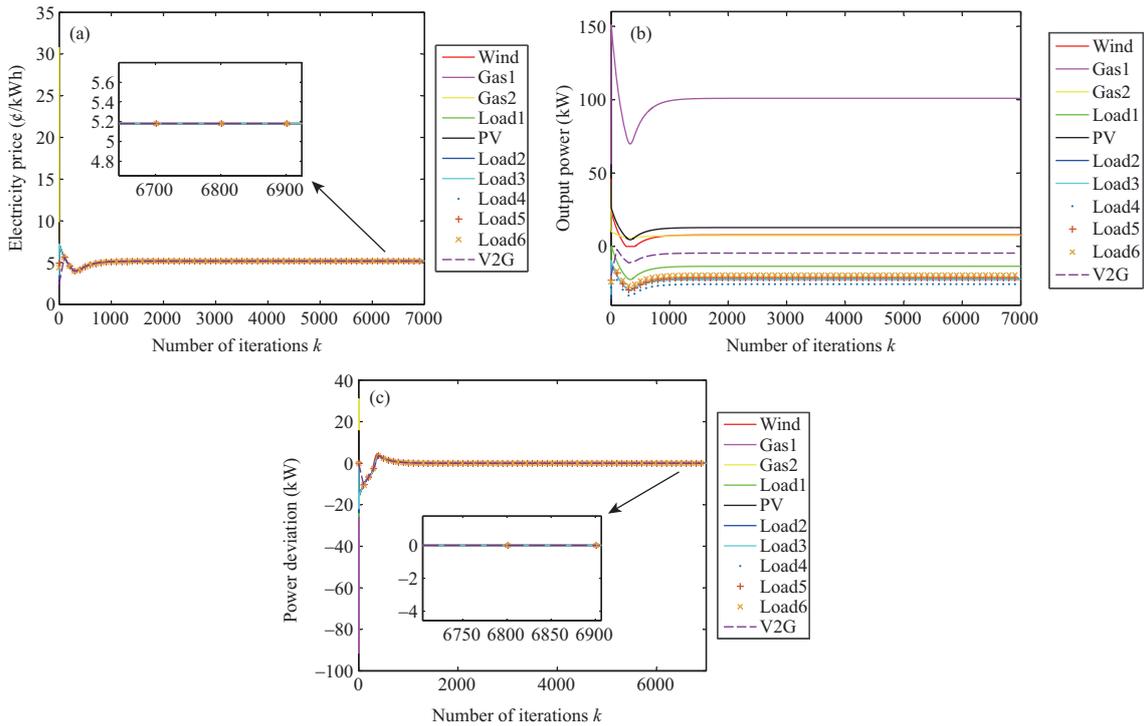


图 4 (网络版彩图) 电动汽车充电时, (a) 一致性变量的变化, (b) 功率输出的变化和 (c) 功率供需偏差的变化
Figure 4 (Color online) Variation of (a) the consistency variable, (b) power output, and (c) supply and demand deviation with the number of iterations when the electric vehicle is charging

对仿真结果进行了分析和对比, 仿真结果如图 5(a) 和 (b) 所示. 对比时延存在和无随机时延的仿真结果, 无时延情况下功率不匹配程度在 7000 次迭代后收敛到 10^{-15} 级别, 存在随机时延情况下收敛到 10^{-10} 级别, 可知随机时延减慢了算法的收敛速度.

无时延电动汽车总体充电情况下电网电价收敛到 5.1778 $\text{¢}/\text{kWh}$, 总体放电情况下电网电价收敛到 5.3012 $\text{¢}/\text{kWh}$, 和前文得到的有时延情况下的数据比较相差在 10^{-3} 级别. 由前文已知存在时延会减慢算法收敛速度, 所以此误差是收敛速度差异导致的结果. 为了验证上述结论本文将存在时延的迭代次数调至 10000 次, 此时的仿真得到的达成一致的电价分别为 5.1801 和 5.2996 $\text{¢}/\text{kWh}$, 误差减小. 随迭代次数增加, 存在随机时延的电价收敛结果无限趋近于无时延的收敛结果, 即随机时延不影响最后的电价.

当 4 次仿真迭代次数为 7000 次时, 其得到的最优功率分配结果如表 2 所示, 功率单位为 kW. 对比无时延和存在随机时延的功率输出结果发现, 随机时延会一定程度影响功率的输出, 给系统得到结果的最优性带来影响, 但是差异在 10^{-2} 级别, 为可以接受范围内的最优结果的近似值, 所以依然认为本文使用的算法具有有效性.

为了验证本文提出的电动汽车模型的削峰填谷作用, 将表 2 中的每列负载节点功率相加, 对比仿真输出的总负载与仿真初始总负载. 其中功率负号表示消耗电能, 可以看到在初始总负载较低时, 电动汽车充电, 总负载由 122 kW 变化为 129.266 kW, 提高了用电低谷时的用电量; 在初始总负载较高时, 电动汽车放电, 总负载由 149 kW 变化为 140.8557 kW 降低了用电高峰的用电量. 所以仿真结果证明了模型的有效性. 本文考虑的是单个时间段的用电, 若要得到一天的用电情况, 只需添加常见的

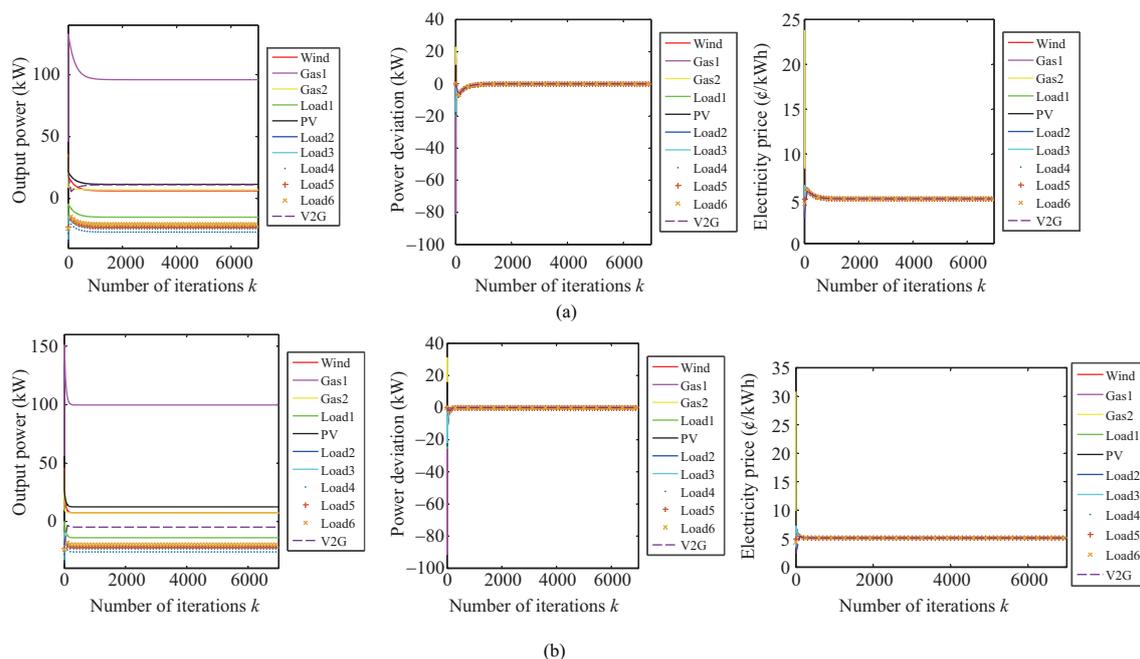


图 5 (网络版彩图) 无时延电动汽车 (a) 放电时和 (b) 充电时仿真复现图

Figure 5 (Color online) Reproduction of the simulation when the electric vehicle is (a) discharging and (b) charging without time delay

表 2 功率分配的 4 次仿真结果

Table 2 Four simulation results of power distribution

Node	Power (kW)		Power with delay (kW)	
	Charging	Discharging	Charging	Discharging
1	7.954	4.4822	7.922	4.4848
2	101.158	90.4001	101.059	90.4029
3	7.409	6.7918	7.403	6.7945
4	-13.505	-16.6221	-13.534	-16.6223
5	12.909	10.0402	12.882	10.0408
6	-22.433	-24.957	-22.457	-24.964
7	-22.273	-24.9611	-22.298	-24.9618
8	-25.7286	-28.4857	-25.7541	-28.4864
9	-21.275	-24.2626	-21.303	-24.2631
10	-19.352	-21.9739	-19.376	-21.9745
11	-4.520	29.1335	-4.542	29.1327

电池能量更新模型和聚合商电量约束, 并对每个时段均进行仿真即可, 本文不再详细罗列.

6 结论

本文研究了含有 V2G 电动汽车的综合能源系统分布式能量管理的控制方法, 建立了包含电动汽

车、风光发电、负载、燃气发电的智能电网的分布式效益模型, 提出了一种可以发挥电动汽车削峰填谷作用的效益函数, 使电动汽车的经济效益和用电峰谷形成闭环. 本文还分析了通信随机时延对分布式一致性加速优化算法的影响, 并得到了在满足电网功率平衡及社会效益最大时的最优功率输出, 实现了经济最优的功率分配, 同时得出了以下结论.

(1) 本文通过理论推导证明了基于 V2G 的微电网背景下算法的收敛性, 并通过仿真验证了本文提出的微电网模型和此背景下的分布式算法具有可行性和有效性.

(2) 通过仿真结果可知, 随机时延的存在会影响系统工作效率, 减慢算法收敛速度.

(3) 通过仿真结果可知, 随机时延的存在不影响达成一致的电价结果, 也不影响能量分配的最优性.

(4) 通过仿真对比验证了提出的基于电价诱导的 V2G 聚合商经济模型具有削峰填谷的作用.

参考文献

- 1 Cheng L, Wan Y X, Qi Y, et al. Review and prospect of research on operation reliability of power distribution and consumption system considering various distributed energy resources. *Autom Electric Power Syst*, 2021, 45: 1–17 [程林, 万宇翔, 齐宇, 等. 含多种分布式资源的配用电系统运行可靠性研究评述及展望. *电力系统自动化*, 2021, 45: 1–17]
- 2 Bie C H, Lin C F, Li G F, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition. *Proc CSEE*, 2020, 40: 2735–2745 [别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 2735–2745]
- 3 Hampannavar S, Chavhan S, Mansani S, et al. Electric vehicle traffic pattern analysis and prediction in aggregation regions/parking lot zones to support V2G operation in smart grid: a cyber-physical system entity. *Int J Emerging Electric Power Syst*, 2020, 21: 1–20
- 4 Yang T, Chai T Y. Research status and prospects of distributed collaborative optimization. *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1414–1425 [杨涛, 柴天佑. 分布式协同优化的研究现状与展望. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 1414–1425]
- 5 Yao Q, Hu Y, Chen Z, et al. Active power dispatch strategy of the wind farm based on improved multi-agent consistency algorithm. *IET Renew Power Generation*, 2019, 13: 2693–2704
- 6 Liu Z, Yang C, Jiang W, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid. *Autom Electric Power Syst*, 2020, 44: 61–75
- 7 Zhang H F, Yue D, Dou C X, et al. Event-triggered multiagent optimization for two-layered model of hybrid energy system with price bidding-based demand response. *IEEE Trans Cybern*, 2021, 51: 2068–2079
- 8 Qi H, Gao X J, Gao Y F, et al. Optimization of the active distribution network operation considering the V2G mode of electric vehicles. In: *Proceedings of 2018 International Conference on Power System Technology*, 2018. 6–8
- 9 Han L, Jiao X H, Zhang Z. Recurrent neural network-based adaptive energy management control strategy of plug-in hybrid electric vehicles considering battery aging. *Energies*, 2020, 13: 202
- 10 Sufyan M, Rahim N A, Muhammad M A, et al. Charge coordination and battery lifecycle analysis of electric vehicles with V2G implementation. *Electric Power Syst Res*, 2020, 184: 106307
- 11 Jia Q Q. Impulse consistency of multi-agent delay network systems. In: *Proceedings of IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference*, 2019. 24–26
- 12 Ma K, Yu Y Q, Zhu S Y, et al. Distributed algorithm for economic dispatch based on gradient descent and consensus in power grid. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 1364–1380 [马锴, 于洋庆, 朱善迎, 等. 基于梯度下降和一致性的电网分布式经济调度算法. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 1364–1380]
- 13 Yang Z Q, Pan X F, Zhang Q, et al. Distributed optimization for multi-agent systems with time delay. *IEEE Access*, 2020, 8: 123019–123025
- 14 Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proc IEEE*, 2007, 95: 215–233
- 15 Lyu C, Jia Y W, Xu Z. A novel communication-less approach to economic dispatch for microgrids. *IEEE Trans Smart Grid*, 2021, 12: 901–904

- 16 Zhou C K, Qian K J, Allan M, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems. *IEEE Trans Energy Convers*, 2011, 26: 1041–1050
- 17 Zhao C C. Consensus-based distributed energy management and optimization in smart grids. Dissertation for Ph.D. Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 [赵成成. 智能电网中基于一致性的分布式能量管理和优化研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2018]
- 18 Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 215–273
- 19 Golub G H, van Loan C F. *Matrix Computations*. 3rd ed. Beijing: Posts and Telecom Press, 2009. 359–363
- 20 Meyer C D. *Matrix Analysis and Applied Linear Algebra*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000
- 21 Xiao F, Wang L. Dynamic behavior of discrete-time multiagent systems with general communication structures. *Phys A-Stat Mech Its Appl*, 2006, 370: 364–380
- 22 Hu C B, Li S W, Luo S N, et al. Distributed collaborative control strategy for integrated energy microgrid based on multi-agent system. In: *Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2019. 11–14

Consistency-based energy management strategy for microgrids with V2G

Lina REN*, Han WU & Xiaohong JIAO

Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

* Corresponding author. E-mail: renlina@ysu.edu.cn

Abstract Electric vehicles have the characteristics of mobile energy storage. Properly dispatching the charging and discharging of electric vehicles can regulate the peaks and valleys of power grid consumption. This can also increase the power grid's ability to absorb wind and solar energy. This paper studies the distributed energy management strategy of microgrids with V2G. First, this paper uses the principle of electricity price induction to establish a multi-agent microgrid profit model that includes electric vehicle aggregators. This study considers the optimization problem that the actual energy system can maximize the social benefits under the constraints of power generation loss and power balance. Then the paper uses the information interaction between distributed energy sources in the microgrid to design an optimized solution algorithm based on the multi-agent consensus theory and further considers the scenario that there is a random communication delay in the system. The system has maximized social benefits while maintaining the same system electricity price. This paper analyzes the convergence of the algorithm under the background of this research, and gives the convergence conditions and influencing factors. Finally, an 11-node microgrid is used to simulate and verify the system, and the results show that the proposed control strategy is effective.

Keywords V2G, multi-agent system, power loss, time delay, distributed consistency