

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.012

孤岛运行下含储能系统的微电网多代理博弈模型

刘延博, 邱晓燕, 邱 高, 唐 可, 闫天泽, 万成江

(四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 成都 610065)

摘要: 储能系统(ESS)在微电网中的应用可以提高网络的供电可靠性和经济效益。在孤岛运行方式下, 多个储能单元在微电网内的合理使用, 能够优化微电网内的功率流动, 从而实现微电网的经济性运行。文中基于多代理系统控制模型, 研究了在孤岛运行方式下的含多储能单元的微电网内各分布式能源(DER)及负荷的动态博弈模型, 考虑电量电价弹性产生的负荷需求响应, 建立了基于风险成本的Agent电量投标模型和基于VRE强化学习算法的电价投标决策, 最后在多代理仿真平台上加入以上模型和方法, 通过对比分析验证了模型的有效性, 同时实现了微电网和DER的经济性优化。

关键词: 多储能单元; 动态博弈; 多代理系统; 需求响应

Multi-agent Game Model of Micro-grid Containing Energy Storage System in Islanding Operation

LIU Yanbo, QIU Xiaoyan, QIU Gao, TANG Ke, YAN Tianze, WAN Chengjiang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610065, China)

Abstract: Energy storage system (ESS) in the micro-grid can improve the reliability and economic in power grid. However, in the planned or unplanned islanding operation mode, due to the randomness and intermittent characteristics of the output of various types of distributed generators(DG), reasonable use of multiple storage units within the micro-grid can optimize the power flow and economic cost. This paper is based on the multi-agent system controlling model, and studies the dynamic game model in the island within the micro-grid operation mode considering various distributed energy resources(DER) and load, while the micro-grid includes several ESSs. Including energy-price elasticity of the demand response, Agent electric quantity bidding model based on risk cost, and price bidding decision based on VRE reinforcement learning algorithm are established. In the end, the author combines the mentioned models and methods with the multi-agent simulation platform, to analysis of the validity of the proposed model.

Key words: several energy storage units; dynamic game; multi-agent system; demand response

0 引言

微电网是计及可再生能源、微型燃气轮机以及燃料蓄电池等分布式电源的微型发配电系统。微电网技术的发展带动了多种分布式能源接入电网, 提高了微电网供配电的自主性和可靠性^[1-2]。微电网与大电网并网运行将带动智能配电网向多微网并网的智能配电网系统发展^[3]。而当外部电网故障时, 微

网必须切换到孤岛运行模式, 由分布式电源和储能系统进行供配电^[4-5]。微电网内各类分布式能源(DER)具有随机性、波动性和可控性较弱等特点, 越来越多的 DER 接入微网, 使网络经济性运行和 DER 能量信息交互行为有待于优化, 针对计划孤岛和非计划孤岛运行方式的微电网内部经济研究将是重要的研究方向之一。

文[4]中为实现微电网的运行优化, 对网络内部的负荷和 DER 容量配置做了研究, 采用 Homer 实现了对分布式单元的出力控制建模仿真; 文[6]中以

收稿日期: 2016-02-19; 修回日期: 2016-03-25

基金项目: 四川省科技支撑项目(2014JY0191)。

Project Supported by Science and Technology Project of Sichuan Province(2014JY0191).

微电网孤岛运行方式为前提,基于多代理系统建立了微网内各 DER 的能量交互模型,使各 DER 在环境变化时能够按照负荷需求进行功率输出,是典型微电网能量动态调度优化模型。

以上文献在微电网内部能量交互方面做出了研究,但对微电网内的经济性和 DER 运行成本没有进行分析^[7-8]。在此基础上,文[9]中重点考虑了钠硫电池的储能特性,采用不同的调度模型对不同优化目标进行了优化对比;文[10]中在考虑热电联供的微电网特性的基础上,重点研究了蓄电池的运行特性对微电网优化的影响,建立了 CCHP 优化模型,对微电网的运行成本进行了分析;文[11]中同样采用多代理技术,对包含多微网的系统进行了报价信息的优化,以实现各微网的经济最优性。

上述文献通过对微电网运行成本的分析以及对多微网报价系统的优化建模,很好地解决了微电网运行的成本优化和竞价优化,但上述文献没有以微电网内部各 DER 为目标分别进行经济性研究,没有考虑当较多储能单元并入微电网时,微电网内所有 DER 的运行成本和经济效益。

文中基于多代理系统(MAS)控制模式下,建立了处于孤岛运行方式下含多储能系统的微网内博弈模型。微网内各负荷和分布式电源由不同的理性 Agent 实现交互控制,考虑各分布式能源特性和储能系统(ESS)充放电特性,建立了各子 Agent 向微电网管理侧的电量和电价协议投标模型。将上述模型应用于多代理仿真平台,在孤岛运行方式下模拟了微网内非合作环境下各分布式能源和负荷的动态博弈过程,并验证了模型的有效性。

1 基于 MAS 的含储能系统的微电网结构

含储能系统的微电网多代理信息交互和结构见图1,文中将微电网管理侧和各分布式电源和负荷视作具有自主协调能力的智能“Agent”,每个代理注册为“Agent”,微电网管理侧代理注册为“Agent MG”。其典型 MAS 结构包括:微网代理(Agent MG)、投标代理(Agent BID)、风机代理(Agent WT)、光伏代理(Agent PV)、燃气轮机代理(Agent MT)、蓄电池1代理(Agent ESS1)、蓄电池2代理(Agent ESS2)、蓄电池3代理(Agent ESS3)、负荷代理(Agent Load)。

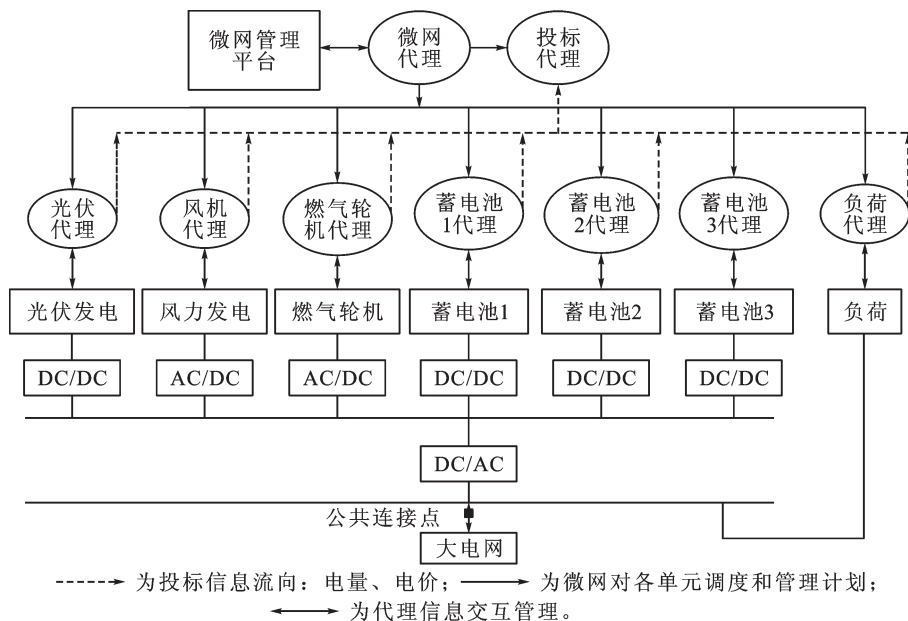


图1 微电网多代理信息交互和结构图

Fig. 1 The interaction of information and structure of micro-grid multi-agent

1.1 微网内交易行为约束

为了保证各代理(Agent)博弈行为的持续性和公平性,必须对各 Agent 博弈行为进行约束,建立合理的调度策略:

1) Agent MG 在管理各子 Agent 时实行公平的市场原则,每轮博弈结束后,对各子 Agent 下达命令进行能量调度,并公开上一轮博弈信息。

2) 将各子 Agent 分为售电方 N_s 和购电方 N_b , N_s

包括 Agent MT、Agent PV、Agent WT, N_b 包括 Agent Load, 此外为保证网络的功率平衡,令 Agent ESS3 吸纳网络中的剩余能源和填补网络的能源空缺, Agent ESS3 不参与投标。在奇数时段内, Agent ESS1 为 N_b 方, Agent ESS2 为 N_s 方, 偶数时段内 Agent ESS2 为 N_b 方, Agent ESS1 为 N_s 方。在同一交易时段中,只具有购电或售电中的一种权限。

3) 各子 Agent 视为理性个体,以自身的经济性

最优为目标, 博弈行为必须在各自约束条件以内。

4) 在 Agent MG 调度计划内, 售电单元在当下时段投标电量必须在该时段售罄。可再生能源实际出力与计划出力的偏差电能由 Agent ESS3 提供能量补偿, 交易电价为电网电价; 交易产生的剩余电量由 ESS3 进行收购, 交易电价为固定收购电价。

1.2 MAS 协议投标方案

文中采用 FIPA97 规范下的合同网协议达成各个代理间的交互。Agent MG 下的各个子 Agent 可以实时监控各自代理单元的功率水平, 并可以根据自身的功率水平或负荷状态直接向 Agent MG 管理下的投标管理侧 Agent BID 发起投标请求, 参与者收到招标后以自身经济性为目标做出回应, 即参与者对标书选择接受或者拒绝, 根据中标情况 Agent MG 执行全局电能调度任务。

1.3 Agent 模型描述

1.3.1 Agent WT 和 Agent PV 模型

Agent PV 和 Agent WT 具有最大功率点追踪功能(MPPT), 可实时监控 PV 和 WT 的功率水平状态。

网络中风力发电和光伏发电的出力约束为

$$P_{WT}^t < P_{WT, bid}^t; \quad (1)$$

$$P_{PV}^t < P_{PV, bid}^t. \quad (2)$$

式(1)、(2)中: P_{WT}^t 、 P_{PV}^t 分别是第 t 时段微电网中风力发电和光伏发电单元的调度发电量; $P_{WT, bid}^t$ 、 $P_{PV, bid}^t$ 分别为该时段风机系统和光伏系统投标电量。

1.3.2 Agent MT 模型

在 t 时段时, Agent MT 以自身经济效益最佳为目标, 因此 MT 工作在较高的功率水平上, 其投标电量为计算发电效率之后的燃气轮机输出功率。

微型燃气轮机的出力约束为

$$P_{MT, min}^t \leq P_{MT}^t \leq P_{MT, max}^t. \quad (3)$$

式(3)中: $P_{MT, min}^t$ 、 $P_{MT, max}^t$ 分别为 t 时段微型燃气轮机输出的最小功率和最大功率。

1.3.3 Agent ESS1 和 Agent ESS2 模型

Agent ESS1 和 Agent ESS2 以自身的经济性最优为目标, 自主确定充放电时段和速率。ESS1 初始为购电方(N_s 方), ESS2 初始为售电方(N_b 方)。单位时间内充放电最大功率为蓄电池组额定容量的 20%。Agent ESS3 不参与微网内的投标, 其主要任务为填补可再生能源不确定性引起的功率差额和购买网络交易剩余能源^[9-10]。储能系统每进行一次充电或放电, 功率损耗为 10%。

储能系统的充放电功率需满足上下限、变化率以及储能容量的约束, 其约束条件为

$$-P_{dis_rate} < P_{ESS}(i) < P_{ch_rate}; \quad (4)$$

$$E_{min} < E_{ESS}(i) < E_{max}; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^T |u_{dis}[t_0 + (k+1)\Delta t] - u_{dis}(t_0 + k\Delta t)| \leq \alpha_1; \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^T |u_{ch}[t_0 + (k+1)\Delta t] - u_{ch}(t_0 + k\Delta t)| \leq \alpha_2; \quad (7)$$

$$u_{dis}(i) + u_{wait}(i) + u_{ch}(i) = 1. \quad (8)$$

式(4)–(8)中: $P_{ESS}(i)$ 为 ESS 充放电功率; P_{ch_rate} 、 P_{dis_rate} 分别为 ESS 最大充电功率、最大放电功率; $E_{ESS}(i)$ 为 ESS 的荷电状态; E_{max} 和 E_{min} 为 ESS 容量上下限值; $u_{dis}(i)$ 、 $u_{wait}(i)$ 、 $u_{ch}(i)$ 分别为储能系统处于放电、浮充和充电状态的 0、1 变量; α_1 、 α_2 分别为放电和充电的次数限制; t_0 为起始时刻。

可再生能源出力不足时, 由 ESS3 进行电量补偿, 产生电量缺额的发电单元对 ESS3 的支付函数及 ESS3 收购网络剩余能源的函数分别为

$$f_{ESS3}^{t, dis} = \Delta P^t \lambda_2; \quad (9)$$

$$f_{ESS3}^{t, cha} = \Delta P_{tra}^t \lambda_1. \quad (10)$$

式(9)中: ΔP^t 为 t 时段某发电单元因出力不足产生的差额功率; λ_2 为电网电价; ΔP_{tra}^t 为交易产生的剩余能源; λ_1 为收购电价。

1.3.4 Agent Load 模型

Agent Load 以代理常规负荷电力用户 24 h 平均用电成本最低为目标, 且用户用电成本需满足 24 h 用户购电费用限值约束。用户购电费用约束为

$$\Delta t \sum_{t=1}^{24} P_{load}^t \lambda_{m, load}^t \leq C_{max}. \quad (11)$$

式(11)中: P_{load}^t 为居民用电量; $\lambda_{m, load}^t$ 为 Agent load 与某售电方 Agent m 的交易电价; C_{max} 为用户购电费用限值。

1.4 含多储能单元的微电网运行约束

微电网在孤岛运行下, 系统功率可能不足或者过剩^[10, 12], 文中令 ESS3 可完全消纳出力的过剩能源, 并担当整个系统的备用容量。

由于主要探讨微电网环境下各 Agent 的博弈行为, 则 t 时段下不考虑可中断负荷损失的功率平衡约束为

$$\sum_{k=1}^K P_k^t = P_{load}^t + P_{loss}^t. \quad (12)$$

式(12)中: k 为参加博弈的子 Agent 的数目; P_k^t 为微网内风力发电、光伏发电以及储能系统的出力之和; P_{loss}^t 为网络损耗, 取为 t 时段负荷的 5%。

保留系统负荷 $R\%$ 的 ESS3 作为备用容量的约束条件为

$$P_{ESS3}^t \geq R\% P_{load}^t. \quad (13)$$

2 微电网内部动态博弈模型

2.1 基于价格优先和轮询权重的调度决策

在交易发起的第 t 时段内, N_s 方和 N_b 方向 Agent BID(图 1)上报投标电量投标电价, 交易步骤如下:

- 1)对 N_b 方和 N_s 方投标价格排列, N_s 方投标电价越高, 优先权越高; N_b 方投标电价越低, 优先权越高;
- 2) N_b 方中 Agent 优先匹配 N_s 方出价低的一方, 并按双方出价较高的一方的投标电价进行交易;
- 3)将交易结果和交易后的剩余电能和需求情况记录并传递至 Agent MG, 并由 Agent MG 进行统一调度。

考虑由上一时段投标电量及调度结果确定的轮询权重, 文中设计式(14)的目标函数, 该目标函数能使微网内各分布式单元代理按照价格高低选择与其他竞标者先后交易, 以满足自身的经济最优性。

$$\max F = \Delta t \sum_{t=1}^{24} \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^2 \left\{ w_1^t (\lambda_{m,n}^t P_{m,n}^t - \lambda_1 P_{m,ESS3}^t) - \lambda_m^t P_m^t + w_2^t (\lambda_n^t P_n^t - \lambda_2 P_{ESS3,n}^t) + w_3^t [\lambda_2 P_{ESS3,n}^t + (\lambda_2 - \lambda_1) P_{m,ESS3}^t] \right\} \quad (14)$$

式(14)中: t 为某个时间段; m 为售电方个数; n 为购电方个数; 在第 t 时段内, P_m^t 、 P_n^t 分别为某售电方 m 的投标电量、某购电方 n 的投标电量; λ_m^t 、 λ_n^t 、 $\lambda_{m,n}^t$ 分别为某售电方 m 的投标电价、某购电方 n 的投标电价以及 m 与 n 的交易电价; $P_{m,n}^t$ 、 $P_{m,ESS3}^t$ 、 $P_{ESS3,n}^t$ 分别为某售电方 m 与某购电方 n 的实际交易电量、某售电方出售给 ESS3 的电量、ESS3 出售给某购电方 n 的电量; w_1^t 、 w_2^t 、 w_3^t 分别为 N_s 方、 N_b 方和 ESS3 的调度轮询权重。

2.2 交易行为约束

在同一轮博弈中, ESS1 和 ESS2 的功率流向具有单向性, 令 P_{ESS1}^{2k-1} 、 P_{ESS1}^{2k} 分别为 ESS1 在奇数时段和偶数时段向外的传输功率, P_{ESS2}^{2k-1} 、 P_{ESS2}^{2k} 分别为奇数时段和偶数时段 ESS2 向外的传输功率, 则其约束条件为

$$\begin{cases} P_{ESS1}^{2k-1} \leq 0 \\ P_{ESS2}^{2k-1} \geq 0 \end{cases} \quad 1 \leq k \leq 12; \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{ESS1}^{2k} \geq 0 \\ P_{ESS2}^{2k} \leq 0 \end{cases} \quad 1 \leq k \leq 12. \quad (16)$$

2.3 含多储能单元的微电网内博弈模型

文中将各子 Agent 视作完全理性, 各博弈方处于完全信息和非合作环境下进行博弈行为。博弈行为包括电量投标和电价投标决策两部分。

2.3.1 基于风险成本的售电方电量投标策略

文[13]中在多微网的环境下建立基于风险绝对

值的电量投标决策。

文中考虑风机和光伏系统出力具有不确定性, 在 t 时段, Agent MT、Agent PV 上一轮投标电量为 P_{C-1}^{BID} , 获得上一轮中标电量为 $P_{C-1}^{Win,BID}$, 其电量投标风险绝对值为

$$C_{L,m} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^S w_s (\Delta P_m^t \lambda_0). \quad (17)$$

式(17)中, w_s 为不同场景下的概率权重。

2.3.2 基于负荷电量电价弹性的需求响应

在实际生产中, 用户用电量随电价变动而发生变化, 针对用户电量对电价的响应行为建模, 通常引入经济学理论中的电量电价弹性矩阵较为符合实际情况。电力用户会根据电价改变调整自己的用电策略和用电时段, 可针对单个时段或者多个时段的电价进行用电调整, 或者引入多个时段中的平均用电成本进行用电调整[14-16]。

文中在引入电量电价弹性矩阵的基础上, t 时段需求侧的用电量将根据上一轮博弈中相同时段的平均交易电价进行调整, 见式(18)。

$$\Delta P_{load}^{i+1,t} / P_{load}^{i,t} = \varepsilon \Delta \lambda_{m,load}^{i,t} / \lambda_{load}^{i,t} \quad (18)$$

式(18)中: $\Delta \lambda_{m,load}^{i,t}$ 表示在第 i 轮博弈中 t 时段用户购买售电方的平均电价与投标电价的差值; $\lambda_{load}^{i,t}$ 为第 i 轮博弈 t 时段 Agent Load 的投标电价; $P_{load}^{i,t}$ 为第 i 轮博弈 t 时段负荷电量需求; ε 为电量电价弹性系数。

2.3.3 基于改进的 VRE 强化学习算法的自适应定价策略

电价投标博弈分为 2 部分, 按照博弈类型划分, 分别为售电方非合作环境下的多方竞价上网博弈和购电方的双人竞价博弈模型[17]。

在博弈类型划分的基础上, 文中采用改进的 VRE 强化学习算法模拟基于 MAS 的多代理竞价博弈。处于学习模式下的各 Agent, 由历史博弈信息对投标电价进行调整, 投标电价从轮盘赌模式选取概率较大的博弈行为, 以实现利益最大化。

令某代理 Agent m 的电价选择策略集合为 $A(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$, 假设在第 i 轮博弈中策略 a_k 被选中, 相应收益为 P_i , 则在 $i+1$ 轮博弈中策略 a_j 的倾向式为

$$q_m^a(i+1) = R_m^a(i) + (1-r)q_m^a(i). \quad (19)$$

式(19)中: $R_m^a(i)$ 为第 i 轮博弈 Agent m 的响应函数; r 为遗忘因子, 用以增强最新策略的影响效果。

$$R_m^a(i) = \begin{cases} (1-b)P_m^a(i) & j=i \\ P_m^a(i)/(n-1) & j \neq i \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中: $P_m^a(i)$ 为 Agent m 在第 i 轮博弈中选取 a_k 策略产生的收益; b 为经验参数, 为 Agent m 的初

期电价策略激励参数; n 为电价的策略集合数量。

3 算例分析

文中基于 MAS 的系统拓扑结构见图 1。系统包含风力发电机和光伏发电机各 1 台,燃气轮机 1 台,蓄电池储能系统 3 台。设置电网价格为 0.85 元/(kW·h), ESS3 收购剩余能源价格为 0.4 元/(kW·h), 储能系统最小荷电量限为 5 MW·h,最大荷电量比额定容量小 5 kW·h,分布式发电单元投标风险比例为 1%。电费支出不超过初始电费的 120%, 调度轮询权重按照调度优先权取为 0.4、0.3、0.3, 各 Agent 有 10 种电价投标策略。DER 容量配置见表 1,分布式发电单元的预测出力曲线见图 2,ESS1 和 ESS2 的投标电量见图 3,各自投标电量为当时段的充、放电需求,均设为正值。

表 1 微网内分布式能源的功率配置

Table 1 Configuration of the capacity of DERs

DER	容量配置/kW
光伏发电系统	150
风力发电系统	160
微型燃气轮机	140
储能系统 1	120
储能系统 2	80
储能系统 3	3 000

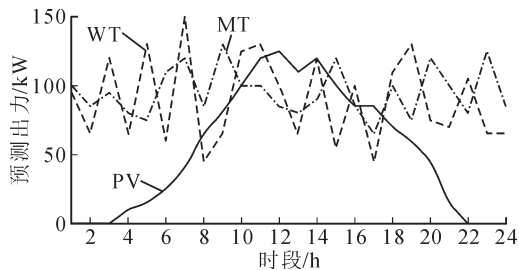


图 2 微电网内分布式电源预测出力曲线

Fig. 2 The power prediction curve of distributed power in the micro-grid

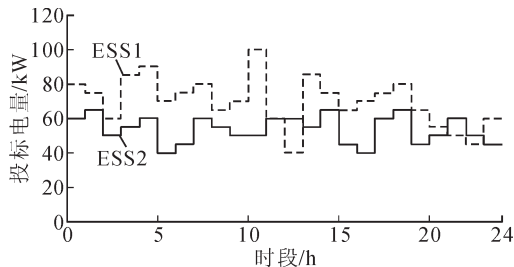


图 3 储能单元 1 和 2 的投标电量

Fig. 3 The bidding energy of ESS1 and ESS2

文中以 NetBeans 为平台使用 Java 语言编写调度策略,并调入 VRE 强化算法模拟电价投标行为,使用多代理系统模型进行仿真,其中,每轮博弈为一日 24 h,每个时段为 1 h,记录 200 轮博弈后的电价信息、电量信息及经济效益。

在孤岛运行模式下,文中设置以下 4 种运行方式来模拟微电网内部的电量电价交互:

1)ESS3 作为微电网的储能系统运行,用以吸纳剩余交易能源和供给负荷的能源不足。ESS1 和 ESS2 不参与微电网运行,各 DER(储能系统除外)按照以经济性最优为目标进行投标交易,负荷侧拥有选择权,不考虑调度轮询权重和用户请求响应;

2)目标函数中的 3 个调度轮询权重均取为 1/3,对目标进行优化;

3)不考虑用户用电的需求响应对目标进行优化;

4)采用文中提出的模型,加入调度轮询权重且考虑用户用电的需求响应对目标进行优化。

在博弈达到均衡点后,运行方式 2 和运行方式 4 均考虑了由用户侧需求响应带来的负荷变化,原始负荷及负荷变化见图 4。

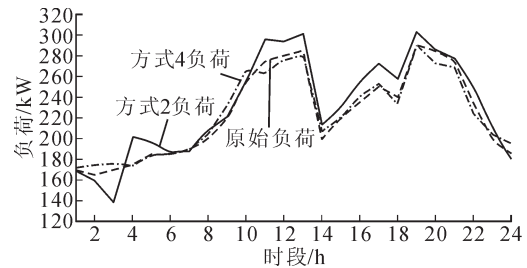


图 4 计及需求响应的用电负荷变化

Fig. 4 The change of load considering demand response

将用户侧需求响应加入文中的仿真模拟过程,由图 4 对比原始负荷和方式 2、方式 4 下的负荷变化可知:方式 2 没有加入调度轮询权重,在电量电价弹性矩阵的影响下,负荷的变化量随上一轮电量电价信息而变动,由于调度轮询权重减小了上一时段较高收益一方在目前时段收益的累加效应,能够起到平抑负荷投标电价波动和平衡交易三方收益的作用,方式 2 的负荷电量需求产生了较大幅度增长,并在第 2 时段和第 6 时段产生了较大波动;方式 4 加入了调度轮询权重和电量电价弹性矩阵影响下的需求响应,由负荷变化可以得知,在用户用电需求较高的 10~13 时段和 19~20 时段,方式 4 能够明显削减峰值,在第 2、14、18 时段,方式 4 填补了负荷较低的电量低谷,综合来说方式 4 下的均衡负荷起到了削峰填谷的效果。

在 4 种运行方式下,各 Agent 的博弈行为达到稳定均衡后,以 1 日 24 h 为例,4 种运行方式下储能系统 3 的出力见图 5,负值表示储能系统 3 吸收来自其他单元的交易剩余能源,正值表示储能系统 3 填补各方交易后产生的购电方用电缺额。24 h 内购电方、售电方、用户及 ESS3 的收益见图 6。

由图 5 可以看出:相比其他运行方式,方式 4

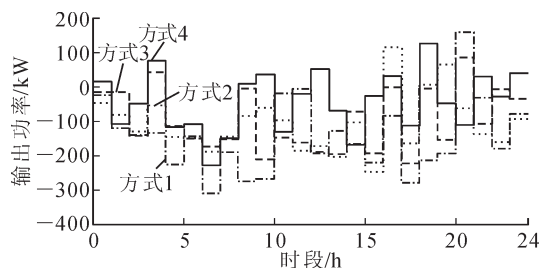


图5 不同运行方式下 ESS3 的输出功率

Fig. 5 The output of ESS3 in different runs

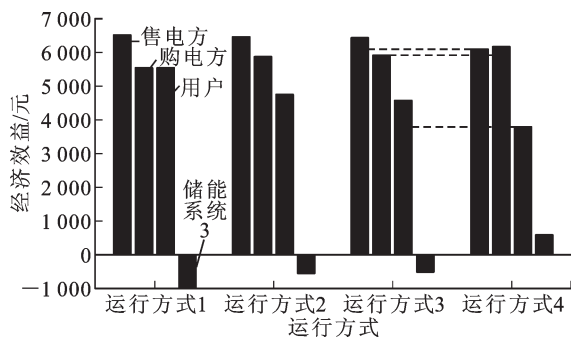


图6 不同运行方式下的各方收益对比

Fig. 6 The profit of agents in different runs

下 ESS3 的更多的吸收来自售电方的交易剩余能源;在 ESS1 和 ESS2 未参与运行的情况下,ESS3 以整个网络的功率平衡为基准进行出力,不具有较大出力的裕度,导致其利用率较低,此时储能系统处于完全被动状态;方式 2 没有加入调度轮询权重,考虑到 ESS3 本身没有投标权,自主性较差,因而在该运行方式,具有投标权的购电方和售电方具有更高的主动性,ESS3 处于半被动状态;方式 3 不考虑需求响应的情况下 ESS3 已经达到充放电较为均衡的状态,与方式 3 相比,方式 4 下 ESS3 更多进行放电,向外传输功率,加大了储能系统 3 的利用率,并提高了其经济效益。

图 6 为一天 24 h 内 4 种运行方式下购电方、售电方、用户及 ESS3 的经济效益对比,其中购电方和用户的经济效益为各自用电成本,不难看出,只有在方式 4 下,ESS3 的收益为正,用户用电成本最低;且在方式 1 下,售电方的收益达到峰值,其收益大多归功于 ESS3 较高的充电量,没有更有效利用储能系统 3 的高额的备用电量,由于方式 1 没有考虑 ESS1 和 ESS2 的运行,购电方只有用户一方,对比其他 3 种方式,用户的用电成本最高;在方式 2 和方式 3 下,购电方和售电方的收益保持相当,ESS3 的收益仍为负值,但同时加入调度轮询权重及需求响应之后,购电方和售电方的收益趋向均衡,总体考虑,方式 4 平衡了购电方、售电方两方收益,并使 ESS3 获得较多收益,提高了整个微电网的经济效益。

图 7 展示了方式 4 下,在博弈达到均衡之后(200 轮)各 Agent 的投标电价信息,在 VRE 强化学习的引导下,各 Agent 以上一时段投标决策产生的相对经济效益为基准,对下一时段的电价投标策略进行修改,用以获取最高的经济效益,图 7 中各 Agent 投标策略已达到均衡,此时整个网络经济效益总值取得最大,网络内各单元均获取较高收益,为博弈的均衡投标电价。在长时间的博弈之后,各个单元针对不同时段电量信息在不同时段选取了稳定的电价投标策略,以确保所有单元在 24 个时段内竞价和收益的稳定性,一旦出现打破均衡的电价投标信息介入,网络的经济均衡状态被打破,进入新一轮博弈并逐步达到稳定状态。

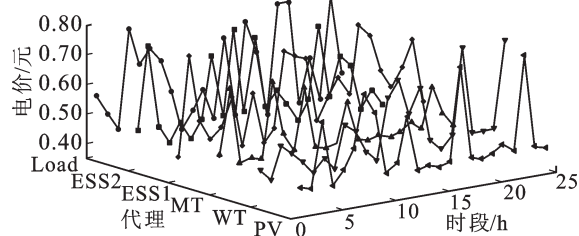


图7 方式4 博弈均衡投标电价信息

Fig. 7 The game equilibrium bid price information in run 4

4 结语

文中提出了一种基于价格优先和轮询权重的优化调度决策,考虑了风险性电量投标决策和用户购电费用约束,建立了基于 VRE 强化学习算法的电价投标策略和基于电量电价弹性的用户需求响应模型,针对孤岛运行方式下的微电网内的经济性分配做了仿真模拟,仿真结果表明:文中的模型能够实现微电网内各 DER 的经济自主性,在有效利用储能系统快速充放电特性的基础上,使储能系统由被动调度转为自主经营决策,在微电网内部调度层面上实现了经济的均衡分配。此外,在需求侧响应的影响下,每日负荷受电量电价弹性矩阵影响产生变化,仿真结果表明,文中提出的模型能够实现负荷曲线的削峰填谷。

参考文献:

- [1] 彭思敏,曹云峰,蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(16): 38-43.
PENG Simin, CAO Yunfeng, CAI Xu. Control of large scale battery energy storage system interface to microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 38-43.
- [2] 王成山,洪博文,郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度

- 策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775-1782.
- WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1775-1782.
- [3] 江润洲, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3596-3602.
- JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan, et al. Economic operation of smart distribution network containing multi microgrids and energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3596-3602.
- [4] 杨万清, 李春平, 栾敬钊, 等. 基于负荷分析与优化控制的微网容量配置方案[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 13-16.
- YANG Wanqing, LI Chunping, LUAN Jingzhao, et al. Microgrid capacity allocation scheme based on load analysis and optimization control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 13-16.
- [5] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3097.
- CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A control strategy of seamless transfer between grid-connected and islanding operation for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3089-3097.
- [6] 丁明, 罗魁, 毕锐. 孤岛模式下基于多代理系统的微电网能量协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 1-8.
- DING Ming, LUO Kui, BI Rui. An energy coordination control strategy for islanded microgrid based on a multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 1-8.
- [7] COLSON C M, NEHRIR M H, GUNDERSON R W. Multi-agent micro-grid power management[C]//Proceedings of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy: IEEE, 2011: 3678-3683.
- [8] TSAI S H, LEE C Y, WU Y K. Efficient calculation of critical eigenvalues in large power systems using the real variant of the jacobi-davidson QR method[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(4): 467-478.
- [9] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for micro-grids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [10] 柳川, 王宇拓, 王林川, 等. 含冷热电联供系统微电网优化运行研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 31-37.
- LIU Chuan, WANG Yutuo, WANG Linchuan, et al. Research on the economical operation of the micro-grid with CCHP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(2): 31-37.
- [11] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-51.
- AI Qian, ZHANG Jian. Optimization bidding strategies of micro-grids based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 46-51.
- [12] 安学娜, 张少华, 王晔, 等. 考虑可中断负荷合同的电力市场古诺均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 49-53.
- AN Xuena, ZHANG Shaohua, WANG Xian, et al. Cournot equilibrium analysis of electricity markets considering interruptible load contracts[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 49-53.
- [13] 江润洲, 邱晓燕, 李丹. 基于多代理的多微网智能配电网动态博弈模型[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3321-3327.
- JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan. Multi-agent system based dynamic game model of smart distribution network containing multi-microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3321-3327.
- [14] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.
- BIE Chaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [15] 崔强, 王秀丽, 刘祖永. 市场环境下的计及储能电站运行的联动电价研究及其效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 62-68.
- CUI Qiang, WANG Xiuli, LIU Zuyong. Study on linkage electricity price and benefit analysis considering energy storage station operation in market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 62-68.
- [16] 袁铁江, 晁勤, 吐尔逊·伊不拉音, 等. 电力市场环境下的含风电机组的环境经济调度模型及其仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 67-71.
- YUAN Tiejiang, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin, et al. An environmental economic dispatch model for power grid containing wind power generation units and its simulation in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 67-71.
- [17] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- 刘延博(1989—), 男, 在读研究生, 研究生方向为储能技术、微电网运行。