

DOI: 10.7667/PSPC180299

基于多代理的实时电价机制下微网需求侧协同调控优化

王凌云¹, 胡兴媛¹, 李昇²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 为使微网中各元件稳定运行且经济效益提高, 采用多代理技术对需求侧负荷、蓄电池以及发电侧微源进行协调控制, 使微网中各代理间信息及时反馈, 减少系统故障。其次在微网并网运行的实时电价机制下, 制定蓄电池充放电控制策略, 分析蓄电池输出功率特性, 以协调一天内不同时刻的各微源出力。同时采用多 Agent 混沌粒子群优化算法对考虑用户满意度的微网经济运行模型进行求解。并通过算例对比分析以验证所提出的基于多代理协调控制的微网能有效提高运行效益。

关键词: 微网; 多代理; 实时电价; 用户满意度; 混沌优化

Collaborative regulation control optimization on demand side of microgrid based on multi-agent under real time price mechanism

WANG Lingyun¹, HU Xingyuan¹, LI Sheng²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: In order to ensure stable operation of each component in the microgrid and improve its economic efficiency, firstly, the multi-agent technology is used to coordinate the demand side load, the battery and the generator side micro source, so that the information between agents in the microgrid can be timely output to reduce the system failure. Secondly, a battery charging and discharging control strategy is designed based on the real-time electricity price microgrid mechanism connected to the grid. The output power characteristics of the battery are analyzed to coordinate the output of each micro source at different times of the day. Meanwhile, the Multi-Agent Chaotic Particle Swarm Optimization (MACPSO) algorithm is adopted to solve this proposed model. Through the simulation contrastive analysis, it is verified that the microgrid based on multi-agent coordinated control can effectively improve the economic operation efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407104 and No. 61603212).

Key words: microgrid; multi-agent; real-time electricity price; user satisfaction; chaotic optimization

0 引言

目前, 由于电力系统发电侧微源的有效利用、储能单元的合理调控以及负荷分布的适当改善, 使电力市场对系统需求侧动态调度更为重视。需求侧管理不仅有助于客户端的合理消费以及公共设备的合理运用, 也会给微电网的发电侧带来可观的收益。需求侧管理主要分为三类: 环境驱动型、网络驱动型、市场驱动型。环境驱动型主要侧重于减少温室气体排放以满足环境标准, 网络驱动型的目标是维持系统的可靠性, 市场驱动型的目标则是提高公共

设施和消费者的经济效益^[1]。

微网中对需求侧的运行优化问题主要是针对污染物排放和动态经济的调度进行研究。污染物排放的优化考虑成本最小化以及排放量最低。动态经济的优化主要考虑发电侧微源的有效出力以及发电侧与需求侧的合理优化调度, 使微网系统的能耗在满足客户端的供电需求条件下, 通过协调控制微源出力以及负荷投切, 有效降低发电侧运行成本和用户侧用电成本^[2]。文献[3]对不同时段需求侧的可转移负荷的投切情况进行分析, 采用人群搜索算法对调度模型进行求解, 但对需求侧管理的方式没有进行考虑; 文献[4]对孤岛微网的蓄电池的储能系统进行了概率规划, 但对需求侧负荷的转移与发电侧的协

同调控未进行研究分析。微电网的需求侧管理现状需要最新与可靠的信息和通信技术,通过使用相应的通信技术,电力供应商和需求侧用户间建立双向沟通,使微网形成完善的通信机制,其中需求侧管理的动态通信设备主要考虑中央控制器。

近年来,研究人员已经意识到多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)在电力系统应用中的潜在价值,多代理技术的灵活性、自主性、可扩展性以及能够减少维护等内在好处,使其成为微电网管理的最佳选择^[5-7]。微电网的MAS建模有助于形成一个智能电网,其中系统中的每一个重要元素都被表示为智能代理。在微电网系统的优化调度中,采用MAS技术对发电侧微源以及需求侧用户的负荷进行控制与管理,可以有效降低运行成本和元件损耗。文献[8]提出了基于MAS技术的微网代理与同级代理的利润最大化策略,但没有对储能单元与分布式微源进行优化;文献[9]对微网系统中的微源进行了基于MAS技术的分层电力管理,但未对需求侧负荷以及储能单元提出控制策略。

本文综合考虑发电侧微源、储能系统以及需求侧负荷管理的协调控制,提出一种基于多代理技术的协调通信机制,以微电网日调度为例,以实时电价机制下运行成本和环境成本最低为优化目标,同时考虑用户满意度,对比标准粒子群、改进粒子群与多Agent混沌优化粒子群算法的优化结果,分析微源以及负荷在采用所提储能策略前后的功率输出变化。最后通过仿真算例验证本文所提需求侧与发电侧通过MAS技术协同调控的有效性以及分时电价机制下的储能优化输出特性。

1 微网基本结构

微电网基本结构如图1所示,发电侧采用清洁能源光伏发电(PV),风力发电(WT),考虑可再生能源的不稳定性,将微型燃气轮机(MT),柴油机(DE)投入发电侧使用,储能单元采用蓄电池(BA)组合,用以维持日调度中峰平谷各时段的系统稳定。需求侧用户的可控负荷投入微网,参与协同调控,同时考虑微源若供电不足,即向大电网购电满足负荷需求,使得系统稳定运行。

1.1 基于MAS技术的微网协同调控

MAS是智能代理的集合,各个代理之间通过在JADE(Java Agent Development)多代理平台上实现信息在主网与配电网上的交互^[10-11]。JADE促进了多代理点对点应用的开发,将对微网中各元件的信息输送提供高效可靠的支持。微网的协同调控旨在使各微源、储能单元以及需求侧负荷通过MAS技

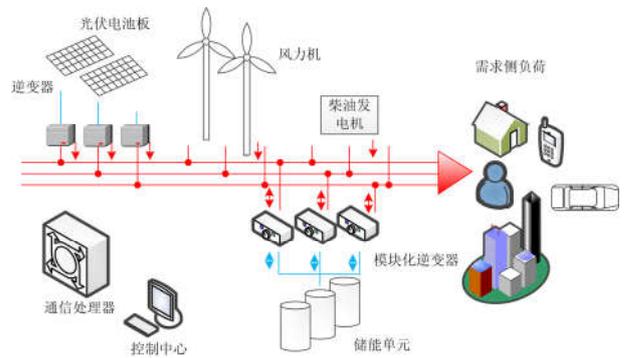


图1 微网结构图

Fig. 1 Microgrid structure diagram

术进行合理的协调调度。各微源、蓄电池以及负荷可创建相应的JADE Agent,通过MAS技术协调调度各代理,使复杂的微网系统中各Agent相互通信与联系,并由管理层Agent对其进行协调控制。采用MAS技术对微网进行协调控制,将提高微网经济调度稳定性与安全性,其系统结构如图2所示。

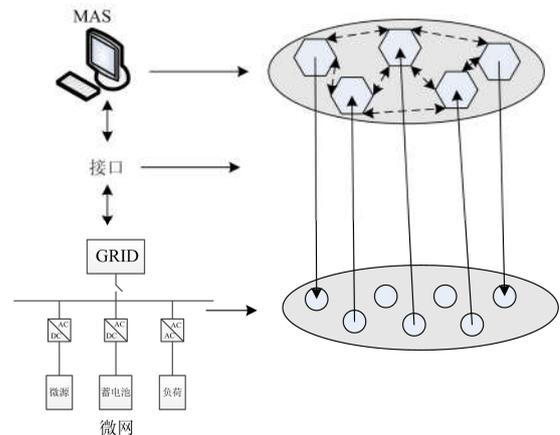


图2 基于多代理的微网系统结构

Fig. 2 Microgrid system structure based on multi-agent

本文研究微网中各微源、负荷以及蓄电池的能量优化协调,通过MAS技术与微网的结合,在JADE平台中建立发电侧PV Agent、WT Agent、MT Agent、DE Agent之间的通信规则以及微源与需求侧负荷的信息交互方式,及时有效地降低故障发生频率和元器件损耗,MAS技术能够在动态调度中让各个微源更加及时地进行信息反馈,使微网系统合理启停与运行。

1.2 储能单元的合理分配

微网在并网条件下,由于需求侧的消纳能力有限,因此可以通过合理利用蓄电池的充放电特性使发电侧微源在用电高峰期发电量更为稳定,有效控制微源与负荷间的协调运行。将一天的用电量分为

峰、平、谷三个时段, 制定合理的蓄电池充放电控制策略对不同时段系统稳定运行将十分重要。

以日调度为例, 根据负荷特性设定峰时段为 12—16 时段、20—22 时段; 平时段为 9—11 时段、17—19 时段、23—24 时段; 谷时段为 0—8 时段。峰时段, 当需求侧的负荷功率大于微源出力时, 蓄电池投入运行, 放电补充负荷侧所需功率, 当蓄电池电量低于设定值仍无法满足需求侧负荷所需功率, 微网向大电网购电; 当需求侧负荷功率小于微源出力时, 在满足需求侧用户供电所需的情况下, 尽可能多地向大电网售电, 当微源产生的功率大于微网与主网的最大交互功率 P_{Grid} 时, 将超出功率给蓄电池充电, 蓄电池充电到达上限仍有多余电量则弃电。平时段和谷时段, 当负荷功率大于微源出力时, 调度微源出力, 同时给蓄电池充电, 若出现电力不足则向大电网购电; 当负荷功率小于微源出力时, 优先给蓄电池充电, 剩余电力向大电网售电。

某时刻的负荷功率与微源出力之差称为微网的“净负荷”, 即 t 时刻的净负荷设为 ΔP_t , 蓄电池的荷电状态为 W_{Br} , 其中, $W_{Br,min}$ 和 $W_{Br,max}$ 分别为储能装置的最小和最大荷电状态, P_{Grid} 为微网和大电网之间的交互功率, $P_{Grid,max}$ 为其最大值, P_{Br} 为 t 时刻蓄电池的充放电功率, $P_{Br,d,max}$ 、 $P_{Br,c,max}$ 分别为蓄电池的最大放电和充电功率。考虑净负荷 ΔP_t 大于或小于 0 时的蓄电池控制策略如图 3 所示。

2 微网的优化模型

2.1 目标函数

为提高微网系统的运行效益, 降低各微源的污染物排放量, 采用发电侧微源与用户侧可控负荷协同运行的方式解决微网的动态经济调度问题, 以发

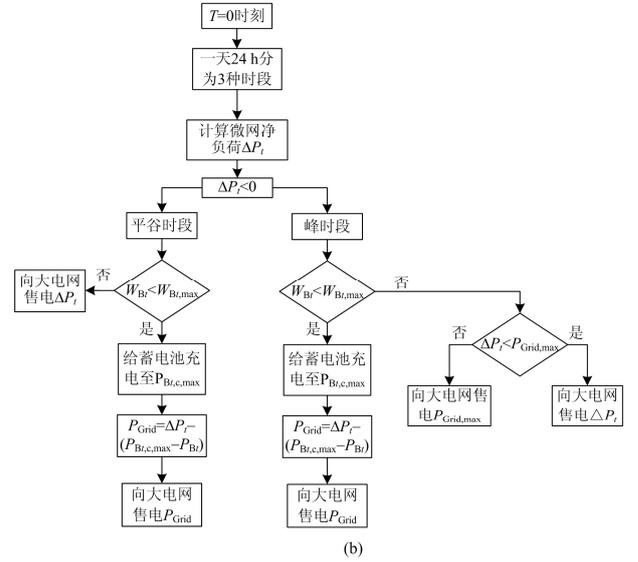
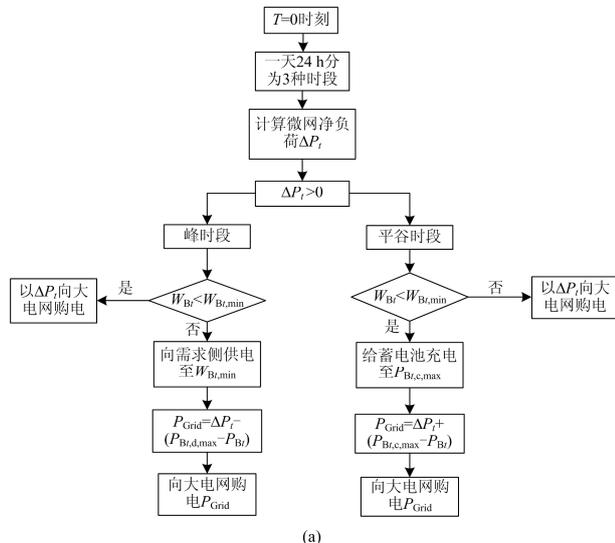


图 3 蓄电池控制策略流程图

Fig. 3 Battery control strategy flow chart

电成本和污染物排放量最低为目标函数, 构建如下优化模型。

1) 微网系统运行的发电成本和污染物排放量最低

$$F_1(t) = \min \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M C_m(t) \quad (1)$$

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{i,j} \delta_j P_i(t) \quad (2)$$

式中: F_1 为微源的发电成本; $C_m(t)$ 为总发电成本; F_2 为发电侧微源的污染物排放量的治理成本, 其中包含微源 i 的污染物 j 的单位产量 $\xi_{i,j}$ 以及污染物的单位治理费用 δ_j , $P_i(t)$ 为微源 i 在 t 时刻的出力。污染物气体在本文中主要考虑 CO_2 , NO_2 , NO_x 。发电成本的具体公式如下。

$$C_1(t) = \sum_{i=1}^n k_{i,om} P_i(t) \quad (3)$$

$$C_2(t) = \sum_{i=1}^n f_i(P_i(t)) \quad (4)$$

$$C_3(t) = S^1(t)P^1(t) + S^2(t)P^2(t) + S^3(t)P^3(t) \quad (5)$$

式中: C_1 为管理成本; C_2 为燃料成本; C_3 为交互成本; $k_{i,om}$ 为微源 i 单位输出功率的维护成本; $f_i(P_i(t))$ 为微源 i 在 t 时刻关于微源出力的燃料成本函数; $S^1(t)$ 、 $S^2(t)$ 、 $S^3(t)$ 分别表示微源 i 在峰平谷的实时电价; $P^1(t)$ 、 $P^2(t)$ 、 $P^3(t)$ 则表示微源 i 在三个时段的实时输出功率。

2) 用户满意度

针对微网的动态经济优化调度过程, 不仅考虑

经济效益, 同时将用户侧满意度纳入考虑范畴, 对日后的需求侧与发电侧的协调控制将有更好的参考价值, 构建的满意度表达式为

$$G = \alpha_1 \varepsilon + \alpha_2 v \quad (6)$$

其中

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (7)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |f_{\text{TOU},t}(P^1(t), P^2(t), P^3(t)) - f_i(P_t)|}{\sum_{t=1}^T f_i(P_t)} \quad (8)$$

$$v = \frac{|C(P_0) - C(P^1(t), P^2(t), P^3(t))|}{C(P_0)} \quad (9)$$

式中: G 为满意度; α_1 和 α_2 为满意度系数, 两者之和为 1; ε 和 v 分别表示用电方式和用电支出满意度, 用电方式满意度可由实时电价优化前后用电量的改变来表示, 用电支出满意度可由优化前后的用户总费用支出变化量来表示; $f_{\text{TOU},t}(\cdot)$ 为采用实时电价的用电量, $f_i(P_t)$ 为固定电价时的用电量, 两者之间的差值为采用实时电价机制后的用户侧每个时段的电量变化总和; $C(P_0)$ 为固定电价的用电支出; $C(P^1(t), P^2(t), P^3(t))$ 为实时电价后的用电支出。

2.2 微网运行约束条件

1) 有功功率平衡约束

$$\sum P_i(T) + P_{\text{BA}}(T) + P_{\text{Grid}}(T) = P_{\text{Load}}(T) \quad (10)$$

式中: $P_i(T)$ 为微源 i 的输出功率, 其中微源出力包括 P_{PV} 、 P_{WT} 、 P_{DE} 和 P_{MT} ; $P_{\text{Grid}}(T)$ 为微网与大电网的交互功率; P_{BA} 为蓄电池的充放电功率。微网中蓄电池放电时的功率定义为正值, 反之为负, P_{Load} 为微网中负荷功率。

2) 微源有功功率出力上下限约束

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (11)$$

3) 微网与主网的交互功率上下限约束

$$P_{\text{Grid},\min} \leq P_{\text{Grid}} \leq P_{\text{Grid},\max} \quad (12)$$

4) 蓄电池荷电状态

$$W_{\text{B},\min} \leq W_{\text{B}} \leq W_{\text{B},\max} \quad (13)$$

式中: W_{B} 为蓄电池的荷电状态; $W_{\text{B},\min}$ 和 $W_{\text{B},\max}$ 分别为蓄电池荷电状态的下限和上限。

3 模型求解

3.1 优化算法

粒子群算法是一种模拟社会行为的随机全局优化算法, 其求解问题的可能解用粒子表示, 粒子群里的粒子都有可能为问题的可能解, 粒子可根据目标函数确定一个适应值, 通过比较适应值不断修正粒子的位置, 使粒子最终得到自身的最优解和全

局的最优解。标准 PSO 算法迭代计算公式如下。

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (p_g^k - x_i^k) \quad (14)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (15)$$

式中: v_i^k 和 x_i^k 分别为粒子 i 在第 k 次迭代中的速度以及位置; p_i^k 与 p_g^k 分别为粒子 i 在第 k 次迭代中的局部最优解和全局最优解; c_1 、 c_2 为学习因子; ω 为权重系数。通常学习因子为常数, 但早期粒子容易陷入局部最优, 为避免粒子早熟收敛, 求解过程中改进学习因子, 以时间作为学习因子的自变量, 迭代公式中的学习因子 c_1 随着时间的变化单调递减, c_2 单调递增。同时权重系数 ω 随时间实时更新, 其值随时间的递增越来越小, 使得目标函数值能够尽快收敛到最优值。相应公式为

$$c_1 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{T_{d,\max}} t + \lambda_2 \quad (16)$$

$$c_2 = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{T_{d,\max}} t + \lambda_1 \quad (17)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{T_{d,\max}} t \quad (18)$$

式中: λ_1 为初始学习因子; λ_2 为进化至最大迭代次数时的学习因子; $T_{d,\max}$ 为最大迭代次数; ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别表示权重的最大值与最小值。

本文在改进粒子群算法(IPSO)的基础上提出采用多 Agent 粒子群(MAPSO)优化算法对目标函数进行优化求解。因为多 Agent 系统的灵活性和开放性, 且其本质上与粒子群算法都属于松散耦合的智能群结构^[12-18], 由此可采用多 Agent 粒子群算法(MAPSO)进行需求侧负荷分配的求解。多 Agent 系统自学习机制可构建如图 4 所示的格子结构, 首先在环境中对每个 Agent 随机初始化, 且每个 Agent 有八个邻里 Agent, 构建每个 Agent 可以与邻里通信的局部环境, 为提高自身寻优能力, Agent 不断迭代学习和积累知识。设 Agent 空间位置为 $L_{i,j} = (l_1, l_2, \dots, l_n)$, 每个 Agent 的 $mL_{i,j}$ 的位置如下:

$$mL_{i,j} = \begin{cases} L_{i,j}, & i'=1, j'=1 \\ LL_{i',j'}, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $LL_{i',j'} = (ll_{i',j',1}, ll_{i',j',2}, \dots, ll_{i',j',n})$, $ll_{i',j',k}$ 如下:

$$ll_{i',j',k} = \begin{cases} x_{k,\min}, & l_k \text{rand}(1-mR, 1+mR) < x_{k,\min} \\ x_{k,\max}, & l_k \text{rand}(1-mR, 1+mR) > x_{k,\max} \\ l_k \text{rand}(1-mR, 1+mR), & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

其中局部搜索半径 mR 的取值范围为 0 到 1。Agent 在与邻里比较时, 能有效减少寻优范围, 对当前适应值进行计算并以最小适应值替代当前

Agent, 提高搜索精度。

在 Agent 自学习机制的环境下, 加入混沌优化能对当前位置进行混沌搜索, 使近优解摆脱局部最优。

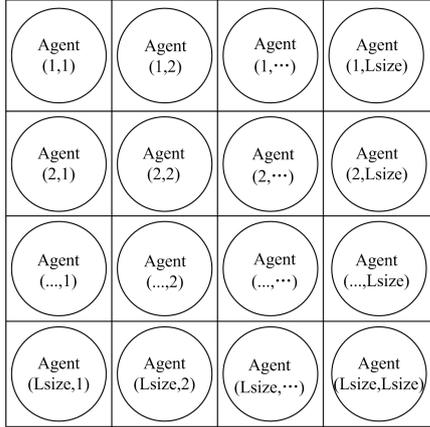


图 4 Multi-Agent 系统环境图

Fig. 4 Multi-Agent system environment map

首先利用 Logistic 方程进行随机队列, 如式(21)。

$$z_n + 1 = \mu z_n (1 - z_n), \quad n=0,1,2,\dots \quad (21)$$

然后在进行优化求解时, 初始化多 Agent 环境下的相关参数, 需要注意的是在进行各个粒子当前适应值的计算时, 通过多 Agent 自学习机制, 使各个 Agent 分别与邻里进行竞争与合作, 记录更新值, 这样可以使更新速度更快。之后用混沌优化当前最优值 P_g , 使其映射到上式中, 其中,

$$z_i = (p_{gi} - a_i) / (b_i - a_i) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (22)$$

产生的混沌变量 $z_i^{(m)}$ 通过逆映射返回原解空间, 即

$$p_g^{(m)} = a_i + (b_i - a_i) z_i^{(m)} \quad (23)$$

可得到下式:

$$p_g^{(m)} = (p_{g1}^{(m)}, p_{g2}^{(m)}, \dots, p_{gn}^{(m)}), \quad m=1,2,\dots \quad (24)$$

通过多 Agent 混沌粒子群算法(MACPSO)可使粒子不仅与邻里粒子进行对比产生最优值, 其随机队列也可降低粒子陷入局部最优。

3.2 基于多代理技术的协同调控

多代理技术在 JADE 平台上实现, 考虑发电侧微源 PV、WT、MT、DE, 储能单元蓄电池(BA)以及需求侧负荷的协调控制。各代理间的通信机制如图 5 所示。

微网中各微源、蓄电池以及负荷的代理信息均在存储地址 other 中, 通过 other 调用相应运行元件的通信 ID 地址, 当微网优化运行时, 发电侧微源 PV、WT、MT、DE 进行能量交互, 图中 3—14 的步骤即其交互信息, 包括各代理向管理层 AMS(Agent Management System)询问所有代理的容量以及约束

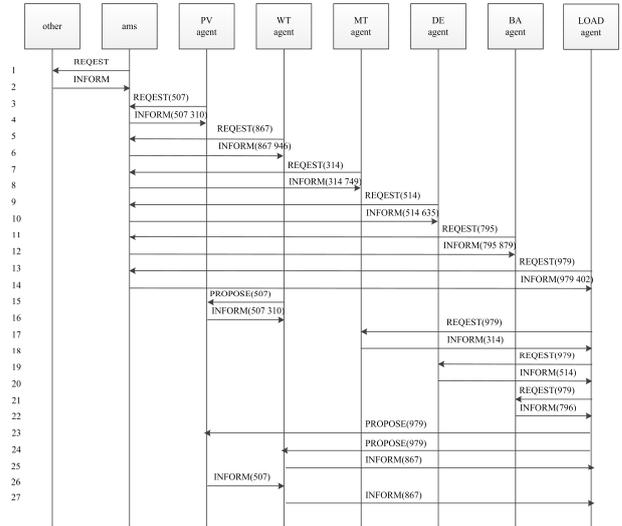


图 5 各代理间的通信机制

Fig. 5 Communication mechanism between different agents

条件, 在 AMS 中进行多 Agent 混沌粒子群优化, 各代理向管理层 AMS 发送请求信号(request), 管理层收到信号后对发电侧微源给出反馈信息(inform), 形成通信回路。由图 5 可知, 为使微网经济效益和环境效益提高, 负荷与微源以及蓄电池之间都进行了信息交互, 粒子群通过 JADE 完成系统中各个代理的通信。由光伏代理(PVA)和风机代理(WTA)算得需求侧所需功率, 将粒子运动结果通过 AMS 传递到 LOAD agent 完成报价, 算出目标函数, 对各个粒子进行修正, 直至完成迭代。由图中 17-18 的步骤可知, 在微网优化调度运行中, 需求侧负荷在用电高峰期需要电量时, 通过 LOAD agent 向发电侧微源 MT agent 发送请求信号 request, 以峰值 13 时为例, 用户侧需要发电侧出力 205 kW, MT agent 接收到请求信号后, 通过向管理层 AMS 反馈需求侧请求信息, AMS 下达命令使微源 MT 向需求侧负荷供电 28.59 kW, 由 MT agent 向 LOAD agent 反馈执行信息, 剩余电量由 PV、WT、DE、BA 出力满足。各微源代理均向管理层发出通信信息, 及时将自身运行状态和其他代理请求信息反馈给上层控制器, 运行步骤为各代理首先初始化数据, 然后在代理间交换数据, 之后将数据值发送给发起者代理, 最终停止代理, 通信完成各粒子的迭代与寻优, 使各元件在实时运行中能通过 MAS 技术提高安全性和可靠性。

4 算例分析

4.1 数据分析

本文针对微源的调度、储能单元的控制策略以

及需求侧的负荷管理展开研究分析。对清洁能源风机、光伏以及需求侧的负荷进行预测,结果如图 6。

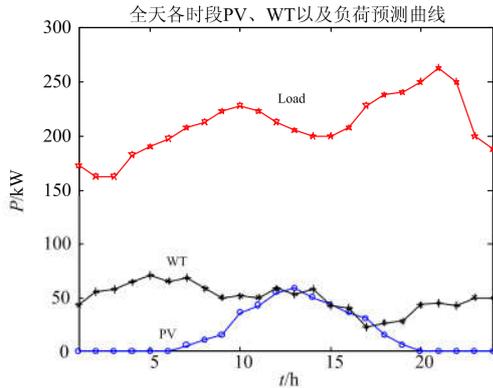


图 6 全天各时段 PV、WT 以及负荷预测曲线

Fig. 6 PV, WT and load forecasting curves at all time of the day

微网中采用 100 kW 光伏、250 kW 风机、80 kW 微型燃气轮机、100 kW 柴油机以及 80 kWh 蓄电池。以提升经济效益为前提,对需求侧负荷制定相应的电价,将一天分为峰平谷三个时段进行电价制定,以小时为单位对微网进行实时电价的动态调度。相关参数如表 1—表 3^[19-20],通过算例仿真分析,对比优化前后功率输出特性。

表 1 系统购电与售电价格

Table 1 System power purchase and sale price

交易形式	价格/(元/kWh)		
	峰时段	平时段	谷时段
购电	1.21	0.69	0.43
售电	1.02	0.50	0.27

表 2 微源相关参数

Table 2 Micro-source related parameters

微源类型	功率下限/kW	功率上限/kW	运行管理系数(元/kWh)
MT	5	60	0.04
DE	0	30	0.06
BA	0	150	0.08

表 3 各类污染物排放参数

Table 3 Various pollutant discharge parameters

微源类型	单位: g/kWh		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
MT	725	2.28	1.82
DE	1 230	0.42	2.35

4.2 结果分析

本文首先对实时电价机制下的微源与需求侧负荷采用基于 MAS 协同调控方法进行优化处理,不仅考虑目标函数中微网的经济效益和环境污染等

问题,而且计及蓄电池充放电策略对储能单元的出力进行对比分析,再针对优化算法的改进进行对比实验,优化结果分别如下:

基于 MAS 技术使各微源通过 MACPSO 优化算法使粒子迅速寻优,粒子每一次的迭代修正通过 AMS 通信,由 Agent 管理层协调调度各微源的输出功率,各微源一天的出力如图 7,由微网与大电网的交互功率可知,在峰时段 20 时交互功率为正向最大值,即在 MT 与 DE 发电的同时,微网向大电网购电满足负荷所需,起到削峰的作用,在 0—8 时段,交互功率为负值,微网向大电网售电可降低发电成本。

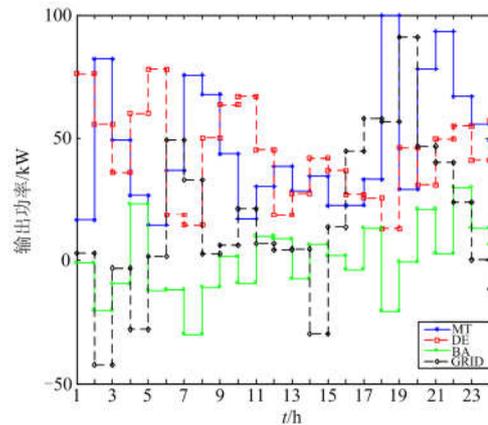


图 7 各微源优化后出力图

Fig. 7 Micro-source output after optimal dispatch of microgrid

由图 8 的算法收敛性对比可知,PSO 算法收敛速度较慢,相较于 PSO 算法,IPSO 算法收敛更快,且寻优结果更好,由于各 Agent 之间要与相近代理进行优化值的大小对比,使得结果不易陷入局部最优,所以 MAPSO 算法收敛速度相对较慢,在满足系统实时性要求下,其输出结果更优。MACPSO 算法不改变 PSO 算法的初始化随机性本质,利用混沌提高粒子种群的多样性和搜索遍历性,可使粒子不易陷入局部最优,通过混沌搜索可改善下次迭代的粒子运行方向,从而提高寻优精度,由图 8 可知 MACPSO 所得结果最优。由图 9 蓄电池输出功率可知,在 12—16、20—22 的峰时段,蓄电池辅助微源对需求侧负荷进行供电,使蓄电池的充放电更合理。考虑实时电价机制,在平谷时段,当微源出力满足需求侧供电时,将多余电量售出给大电网,提高微网的经济效益。蓄电池在各时段辅助微源保持系统供需平衡,并通过实时电价机制有效提高了蓄电池在峰时段的利用率以及优化了平谷时段的协调控制。在仿真运算中,取 $\omega_{max}=0.9$, $\omega_{min}=0.4$, 空间维度 $D=96$, 最大迭代次数 $T_{dmax}=600$, 将粒子迭代的

最优结果算出 20 组求平均值, 最后, 优化前的微网系统总成本为 1 074.6 元, 通过 MACPSO 优化后实时电价总成本为 845.8 元, 且用户满意度为 95.92%, 验证了所提策略的有效性。

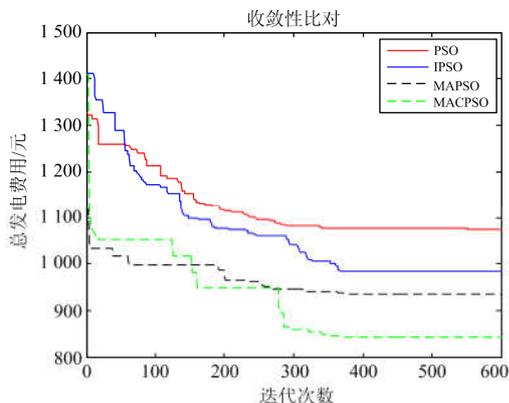


图 8 算法收敛性对比

Fig. 8 Algorithm convergence contrast diagram

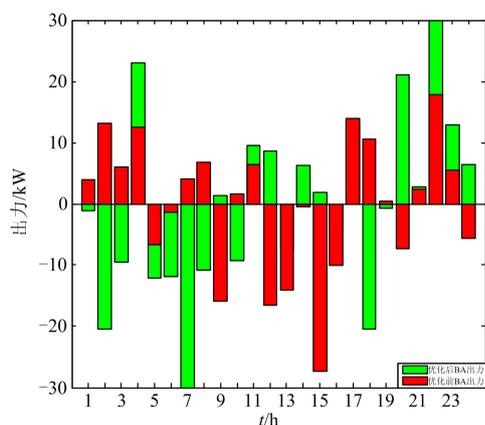


图 9 蓄电池优化前后充放电对比

Fig. 9 Charge/discharge contrast diagram of battery before and after optimization

5 结论

本文基于 MAS 技术对微电网发电侧与需求侧进行协调调度, 制定相应的储能单元蓄电池的充放电策略, 在实时电价的环境体系下协调控制蓄电池与微源的合理出力, 通过多代理系统中各 Agent 的通信完成 MACPSO 迭代中各粒子的寻优与修正, 使其对微源的输出功率进行适当的“削峰填谷”, 提高能源利用率。通过多 Agent 混沌优化算法, 验证了所提基于 MAS 技术的实时电价机制下系统的环境成本与运行成本有效降低, 同时提高了用户侧的满意度, 使微网运行更高效合理。

后续的研究中, 如何有效地将实时电价机制与

柔性负荷管理相结合, 使其在微网系统中协调运行, 充分做到资源利用与节约, 有待进一步探讨。

参考文献

- [1] LOKESHGUPTA B, SIVASUBRAMANI S. Multi-objective dynamic economic and emission dispatch with demand side management[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97: 334-343.
- [2] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源—荷—储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [3] 邵靖珂, 汪飒, 谭阳红, 等. 计及需求侧响应的微网经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 31-36.
SHAO Jingke, WANG Feng, TAN Yanghong, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering demand side response[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(10): 31-36.
- [4] 陶琼, 李春来, 穆云飞, 等. 考虑需求侧响应能力的孤立微网蓄电池储能系统容量概率规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 37-44.
TAO Qiong, LI Chunlai, MU Yunfei, et al. Statistical capacity planning method for battery energy storage system of island microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(1): 37-44.
- [5] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M, et al. Multi-Agent system (MAS) for short-term generation scheduling of a microgrid[C] // IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, December 6-9, 2010, Kandy, Sri Lanka: 1-6.
- [6] PIPATTANASOMPORN M, FEROUZE H, RAHMAN S. Multi-agent systems in a distributed smart grid: design and implementation[C] // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2009, March 15-18, 2009, Seattle, WA, United States: 1-8.
- [7] 蒲天骄, 李焯, 陈乃仕, 等. 基于 MAS 的主动配电网多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 67-75.
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network based on multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 67-75.

- [8] 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 microgrids based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 46-51.
- [9] HAMAD A A, EL-SAADANY E F. Multi-agent supervisory control for optimal economic dispatch in DC microgrids[J]. Sustainable Cities & Society, 2016, 27: 129-136.
- [10] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 27-35.
HAO Yuchen, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Application of multi-agent systems to the DC microgrid stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 27-35.
- [11] 李文云, 蒋亚坤, 雷炳银, 等. 基于 Multi-Agent 系统的含分布式电源电网能源优化管理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 21-27.
LI Wenyun, JIANG Yakun, LEI Bingyin, et al. MAS based energy management strategies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 21-27.
- [12] 唐贤伦, 张衡, 李进, 等. 基于多 Agent 粒子群优化算法的电力系统经济负荷分配[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 42-47.
TANG Xianlun, ZHANG Heng, LI Jin, et al. An economic load dispatch method of power system based on multi-Agent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 42-47.
- [13] 王晶, 李瑞环, 束洪春. 基于智能多代理的能量协调控制在微网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 132-138.
WANG Jing, LI Ruihuan, SHU Hongchun. Energy coordination control based on intelligent MAS for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 132-138.
- [14] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M. Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 138-148.
- [15] 王晶, 王宗礼, 张颖. 多代理协调技术在微网中的应用研究综述[J]. 中国电力, 2013, 46(10): 67-73.
WANG Jing, WANG Zongli, ZHANG Ying. A review of the application of multi-agent coordinated technology in microgrids[J]. Electric Power, 2013, 46(10): 67-73.
- [16] 丁明, 马凯, 毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 1-8.
DING Ming, MA Kai, BI Rui. Energy coordination control of multi-microgrid based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 1-8.
- [17] WANG L, LI Q, DING R, et al. Integrated scheduling of energy supply and demand in microgrids under uncertainty: a robust multi-objective optimization approach[J]. Energy, 2017, 130: 1-14.
- [18] 毛晓明, 陈深, 吴杰康, 等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1192-1197.
MAO Xiaoming, CHEN Shen, WU Jiekang, et al. Optimal dispatching of microgrid containing battery under time-of-use price mechanism[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1192-1197.
- [19] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
SHI Qingjun. Optimum allocation of micro-grid capacity and energy management[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [20] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-07-03

作者简介:

王凌云(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行优化与控制; E-mail: wly@ctgu.edu.cn

胡兴媛(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源微电网运行与控制。E-mail: 437135005@qq.com

(编辑 葛艳娜)