基于 Multi-Agent 系统的含分布式电源电网能源优化管理

李文云[1]，蒋亚坤[2]，雷炳银[3]，于 峰[3]

(1. 云南电网公司科技部，云南 昆明 650011；2. 云南电力调度控制中心，云南 昆明 650041；
3. 易能(中国)电力科技有限公司，北京 100093)

摘要：在市场运行环境下，为了寻求微电网成本利益和环境效益的最大化，提出基于 Multi-Agent 系统能源优化管理策略。该研究首先构建 Multi-Agent 系统。此系统包括市场管理 Agent (MOA)，微电网管理 Agent (MMA)，公共电网 Agent (UGA)和分布式发电 Agent (DGA)。根据各微电网管理 Agent 上报的发电计划，在市场管理 Agent 中设计电价竞标策略用来确定各微电网的最佳交易电价和中标电量，以确保微电网经济利益最大化。在此基础上，在各微电网管理 Agent 中设计能量管理策略，并采用改进粒子群算法来确定微电网内部各分布式发电 Agents 的最佳功率分派，从而最小化微电网的运行成本。最后仿真验证了该方案的有效性。

关键词：MG；Multi-Agent 系统；能源管理策略；电价竞标策略；粒子群算法

MAS based energy management strategies of microgrid

LI Wenyun[1], JIANG Yakun[2], LEI Bingyin[3], YU Feng[3]

(1. The Ministry of Science and Technology of Yunnan Power Grid Co., Kunming 650011, China;
2. Yunnan Electric Power Dispatching Control Center, Kunming 650041, China;
3. YINENG (CHINA) Power Technology Co., Ltd., Beijing 100093, China)

Abstract: A Multi-Agent System (MAS) based energy optimization management strategy for microgrid in market operation environment is proposed in order to maximize the cost and environment benefit. Firstly, the MAS is constructed, which consists of one market operator Agent (MOA), several MG Management Agents (MMA), one Utility Grid Agent (UGA), and many DG Agents (DGA). Then the power price bidding strategy is designed in the MOA according to the generation power plan provided by all the MMAs. By the power price bidding strategy, the best trade price and bid-winning power are determined in order to maximize economic benefit. On the basis of this, the energy management strategy is designed in MMAs, by which the optimal power dispatches for all DGAs are obtained by using an improved particle swarm optimization method for minimizing the operating cost. Finally, the validity of proposed method is demonstrated by means of simulation results.

Key words: MG; MAS; energy management strategy; price bidding strategy; particle swarm algorithm

中图分类号： TM715 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0021-07

0 引言

随着电力需求的日益增长以及能源和环境问题的日益严峻，分布式发电愈发引起研究者们的兴趣[1-5]。为了充分利用可再生能源，微电网的概念引入了分布式发电领域并广泛引起关注[6-9]。微电网在运行成本和环境效益上远优越于传统大电网[10-12]。而上述优点需要通过在微电网中能量管理策略来实现。随着能源转换效率的不断提高和分布式发电的不断渗透，微电网的发电能力不断提升以至于具有过剩的功率输出能力[13]。为了充分利用这些高质能源并使资源得到合理的分配，微电网需要在市场运行环境下参与售电量竞标以获取最大化经济利益[14-15]。

为了满足微电网在市场运行下多种能源管理需求，售电量竞标策略和能量管理策略是必不可少的。为了合理有效地构建多层次能源管理策略，基于 Multi-Agent 的多层能量管理系统乃是最佳选择[16-18]。

MAS 是一种包含智能硬件、软件的分布式和自

治式多 Agent 系统，通过智能体之间的相互协调，能有效处理单智能体难以解决的复杂的系统性问题。由于该系统具有灵活性，快速性和自主性的固有优点，所以基于 MAS 的电力市场下的能量管理具有很好的应用前景。此外该系统也能拓展应用到更多的分布式发电领域。

本文为了在市场运行环境下寻求微电网成本利益和环境效益的最大化，提出了基于 Multi-Agent 系统能源优化管理策略。首先一个 Multi-Agent 系统被构建，此系统包括市场管理 Agent (MOA)，微电网管理 Agent (MMA)，公共电网 Agent (UGA)和分布式发电 Agent (DGA)。其次，为了确保微电网经济利益最大化，在市场管理 Agent 中，根据各微电网管理 Agent 上报的发电计划，设计了电价竞标策略用来确定各微电网的最佳交易电价和中标电量。在确定了中标售电量的基础上，为了最小化微电网的运行成本，在各微电网管理 Agent 中，设计了能量管理策略，并采用改进粒子群算法求得微电网内部各分布式发电 Agents 的最佳功率分派。最后仿真验证了该方案的有效性。

1 基于 Multi-Agent 能量管理系统的构建

在市场运行环境下，基于 Multi-Agent 的多层能量管理系统被构建如图 1 所示，各 Agent 的结构被设计如图 2 所示。

1) MOA：市场管理 Agent，主要负责制定电价竞标策略用以确定市场最佳交易电价和各微电网中标电量，从而使微电网获得最大经济利益。

2) MMA：微电网管理 Agent，主要负责制定能量管理策略用以确定微电网内部所以分布式发电的最佳功率分派，从而使微电网运行成本最小化。

3) UGA：主网 Agent，在市场竞标过程中，作为竞标者也参与市场竞标。

4) LA：负荷 Agent，主要负责负荷管理，在市场竞标过程中，也作为电量购买者也参与市场竞标。

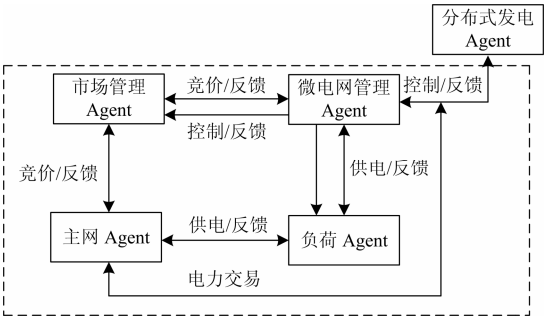

图 1 基于 MAS 的能量管理系统

Fig. 1 MAS based energy management system

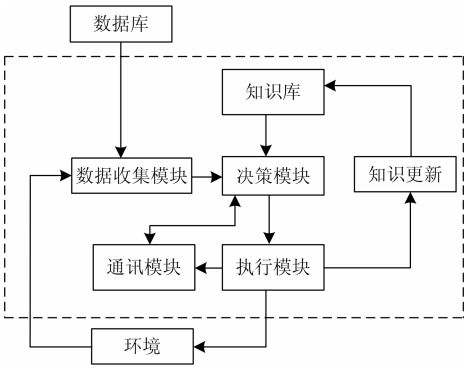

图 2 Agent 的结构

Fig. 2 Agent construction

电价竞标策略和能量管理策略分别在 MOA 和 MMA 的决策模块中制定。而这些策略通过执行模块在 Multi-Agent 的 JADE 平台上实现，图 3 描述了通过智能体间的信息交互来执行电价竞标策略的过程。

首先 MOA 对 UGA、LA 和 MMA 进行初始化；随后被初始化的各 Agent “Inform” 它们的发电计划给 MOA；以此为依据，MOA 制定电价竞标策略并确定各 Agent 的中标电量，随即发出“Request”给各 Agent；各 Agent 给出“Agree”信息；在确定了中标电量之后，MMG 制定能量管理策略并确定了微电网内部各分布式发电的最佳功率分派，随即“Request”给各 DGA；最后各 DGA 发出“agree”信息。

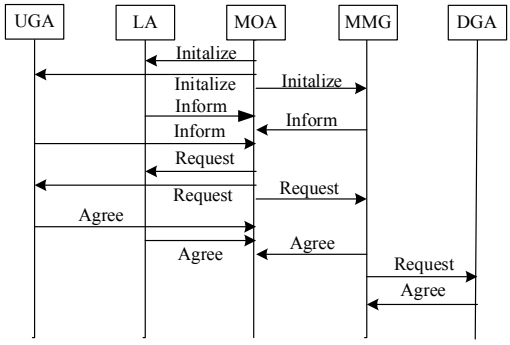

图 3 Agent 之间的信息交互

Fig. 3 Interactions among agents

2 MOA 的电价竞标策略

MOA 需要制定电价竞标策略用以确定市场最佳交易电价和各微电网中标电量，从而使微电网获得最大经济利益。本文采用拉格朗日和古诺模型理论来设计电价竞标控制策略。

首先构建最大化利润函数为

$$\max \pi_i = \max\left[\rho P_i(t) - (1+\lambda_i)C_i\right] \tag{1}$$

式中：π_i 是第 i 个竞标者的利润目标函数；$P_i(t)$ 是

第 i 个竞标者的输出功率；ρ 是实时电价；λ_i 是比例因子；C_i 是第 i 个竞标者的成本函数，被描述为式(2)。

$$C_i = a_i\left(P_i(t)\right)^2 + b_i P_i(t) + d_i \tag{2}$$

其中，a_i, b_i, d_i 是二次成本函数曲线的系数。

类似地，第 i 个竞标者到第 j 个竞争者之间的利润评估 π_j^i 为

$$\max \pi_j^i = \max\left[\rho P_j^i(t) - \left(1+\lambda_j^i\right)C_j^i\right] \tag{3}$$

式中：$P_j^i(t)$ 是从第 i 个竞标者到第 j 个竞争者的输出功率的估计值；C_j^i 和 λ_j^i 分别是成本函数和成本函数的比例因子的估计值。

$$C_j^i = a_i^j\left(P_j^i(t)\right)^2 + b_i^j P_j^i(t) + d_i^j \tag{4}$$

拉格朗日和古诺模型的平衡条件如下：

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial P_i(t)} = \frac{\partial \pi_j^i}{\partial P_j^i(t)} = 0 = \frac{\partial \pi_i}{\partial \rho} = \frac{\partial \pi_j^i}{\partial \rho} \tag{5}$$

联立求解方程式(1)~式(5)可得电价竞标策略，而第 i 个竞标者的最佳中标输出为

$$P_i(t) = \frac{P_{\text{Load}} + \sum_{i=1}^{N-1}\frac{b_i^j}{2a_i^j} - \frac{\left(1+\lambda_i\right)}{\left(1+\lambda_j^i\right)}\sum_{i=1}^{N-1}\frac{b_i}{2a_i^j}}{1+\frac{\left(1+\lambda_i\right)}{\left(1+\lambda_j^i\right)}\sum_{i=1}^{N-1}\frac{b_i}{2a_i^j}} \tag{6}$$

式中：N 是所有参与竞标者的数量；P_{Load} 是给定的总负载，从而市场交易电价也可得：

$$\rho_{\text{M}}\left(P_i(t)\right) = \rho = \frac{\partial C_i}{\partial P_i(t)} = \left(1+\lambda_i\right)\left(2a_i P_i(t) + b_i\right) \tag{7}$$

3　MMG 的能量管理策略

MOA 确定中标计划后，MMG 需要制定能量管理策略重新分派功率给各分布式发电单元以使微电网运行成本最小化。该能量管理策略的制定是一个多目标优化问题。

3.1 多目标函数的构建

3.1.1 运行成本函数构建为

$$F\left(P_{it}\right) = \sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{i=1}^{N}\left[C_{\text{fuel}}\left(P_{it}\right) + C_{\text{om}}\left(P_{it}\right)\right] + C_{\text{buy}}P_{\text{buy}}(t) - C_{\text{sell}}P_{\text{sell}}(t)\right] \tag{8}$$

式中：P_{it} 是第 i 个发电单元的功率；N 是发电单元的数量；T 为微电网的调度周期；$P_{\text{buy}}(t)$ 和 $P_{\text{sell}}(t)$ 是微电网和公用电网之间的交换功率；C_{buy} 和 C_{sell} 是微电网购电和买电的费用；$C_{\text{fuel}}\left(P_{it}\right)$ 是燃料成本；$C_{\text{om}}\left(P_{it}\right)$ 为运行维护成本，可描述为式(9)。

$$C_{\text{om}}\left(P_{it}\right) = \sum_{i=1}^{N} K_{\text{OM}}(i) P_{it} \tag{9}$$

式中：$K_{\text{OM}}(i)$ 是第 i 个单元维护成本系数；对于不同的发电单元数值为 $K_{\text{OM}}(DE)$=0.01258 \$/kWh，$K_{\text{OM}}(FC)$ =0.0041 \$/kWh，$K_{\text{OM}}(MT)$ = 0.00587 \$/kWh。

3.1.2 环境成本函数构建为

$$E\left(P_{it}\right) = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} 10^{-2}\left(\alpha_i + \mu_i P_{it} + \gamma_i P_{it}^2\right) + \xi_i \exp\left(\lambda_i P_{it}\right) \tag{10}$$

其中，α_i、μ_i、γ_i、ξ_i、λ_i 是分别是第 i 个单元污染气体的排放系数，各分布式发电单元的废气排放系数如表 1。

表 1 污染气体排放系数

Table 1 Pollution emission coefficients

g/kWh	MT	FC	DE	WT,PV	Grid	T-cost
NO_x	0.618	0.023	4.331	0	1.6	10.176
CO_2	184.08	635.0	232.03	0	889	0.039
CO	0.170 2	0.054	2.3203	0	1.4	5.877 4
SO_2	0.000 9	0.002	0.4641	0	1.8	2.398 8

注：T-cost 是污染气体处理成本 \$/g。

3.1.3 总目标函数构建为

$$\min C_{\text{MG}} = \min\left[\omega F\left(P_{it}\right) + (1-\omega)E\left(P_{it}\right)\right] \tag{11}$$

式中：C_{MG} 是 MG 的总成本；$F\left(P_{it}\right)$ 和 $E\left(P_{it}\right)$ 分别是运行和环境成本函数；ω 是在多目标的权重系数。

3.2 约束条件

3.2.1 微电网的竞标功率约束条件

$$0 \le P_{\text{w}}(t) \le \sum_{i=1}^{N}\max\left[P_{\text{w},i}(t)\right] - P_{\text{Load}}(t) \tag{12}$$

式中：$P_{\text{w}}(t)$ 中标功率；$\max\left[P_{\text{w},i}(t)\right]$ 是发电单元的最大输出功率；$P_{\text{Load}}(t)$ 是总负荷。微电网的发电能力应满足式(13)、式(14)。

$$\sum_{i=1}^{N} P_i(t) = P_{\text{Load}}(t) + \sum_{i=1}^{N}\left[P_{\text{buy},i}(t)\right] \tag{13}$$

$$\min P_i(t) \le P_i(t) \le \max P_i(t) \tag{14}$$

式中：$P_{\text{buy},i}(t)$ 是第 i 个竞标者的购买功率；$\min P_i(t)$、$\max P_i(t)$ 是第 i 个竞标者的功率的最小、最大值。

3.2.2 分布式电源功率约束条件

$$\sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{i=1}^{N_d}P_{it}+\sum_{i=1}^{N_{st}}\left(P_{\mathrm{dst},i}-P_{\mathrm{cst},i}\right)+P_{\mathrm{buy}}(t)-P_{\mathrm{sell}}(t)\right]=P_{\mathrm{bid}}+P_{\mathrm{loss}} \tag{15}$$

$$\min P_{it}\le P_{it}\le \max P_{it} \tag{16}$$

式中：$\min P_{it}$ 和 $\max P_{it}$ 分别是第 i 个分布式发电单元的最小最大输出功率；$P_{\mathrm{dst},i}$ 和 $P_{\mathrm{cst},i}$ 分别是储能单元的充电和放电功率；N_{st} 是系统的储能单元数量；$P_{\mathrm{loss}}(t)$ 是功率输出的损失，这里假设根据潮流计算可获知。

3.3 改进的优化算法

本文提出了一种改进的粒子群算法(PSO)来解决上述的优化问题。粒子群优化求解过程可以被视为：在*N*维空间中，将搜索目标看作一个点，称之为一个粒子，这个粒子在搜索空间中根据本身飞行经验和同伴的飞行经验随时动态调整自己的速度和方向，然后追随当前的最优粒子寻求最优结果[19]。粒子的优劣程度由适应度函数决定，粒子的适应值则由目标函数决定；粒子还要知道两个极值，即个体极值和全局最优值。个体极值记录了自己在飞行中经历的最好位置和当前位置，全局最优值记录了所有粒子发现的最好位置。在迭代过程中，粒子会不断更新这两个极值从而动态的调整自己飞行的速度和方向，解出目标函数的最优解。粒子更新速度及位置的方程可表示为

$$V_{i,j}(t+1)=\omega V_{i,j}(t)+c_1\varphi_1\left[P_{i,j}(t)-X_{i,j}(t)\right]+c_2\varphi_2\left[G_{i,j}(t)-X_{i,j}(t)\right] \tag{17}$$

$$X_{i,j}(t+1)=X_{i,j}(t)+V_{i,j}(t) \tag{18}$$

以上方程表示了第 i 个粒子第 j 维的速度和位置变化规则。速度更新公式中的第一项表示粒子速度；ω 是用来控制粒子群算法中收敛情况的惯性权重因子；c_1、c_2 表示加速系数以控制一个粒子在一次迭代过程中移动距离，相应地，φ_1、φ_2 是 0 到 1 之间的随机数。$P_{i,j}(t)$ 参数表示最佳粒子适应度函数值，$G_{i,j}(t)$ 是任何粒子迄今所取得的全局极值。根据公式，在计算出速度和位置之后，新的粒子按照该算法进行下一次迭代。通常，需要设置一定的迭代次数，或者直到结果达到允许的精度再停止迭代。

(1) 为了跳出局部极小点，需要提高惯性权重系数，但过大的惯性权重系数会降低系统的收敛性。为了兼顾这两个目标，本文应用线性方程更新权重系数，即随着迭代的进行线性地减少权重系数值。

$$\omega=\omega_{\max}-\left(\omega_{\max}-\omega_{\min}\right)\times\frac{iter}{iter_{\max}} \tag{19}$$

式中：$\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别为权重系数的初始值和终值；$iter$ 为当前迭代次数；$iter_{\max}$ 为迭代的最大值。

(2) 当粒子在种群中的位置与全局最优值重叠时，粒子只有在之前速度及权重系数值不为零的情况下才能成功跳出最优值，否则会造成算法的收敛早熟现象。本文应用新的速度更新方程

$$V_{\tau,j}(t+1)=\omega V_{\tau,j}(t)-X_{\tau,j}(t)+G_{\tau,j}(t)+\rho(t)\left(1-2r_j(t)\right) \tag{20}$$

式中：$\rho(t)\left(1-2r_j(t)\right)$ 从样本空间随机生成样本长度 $2\rho(t)$；ρ 为适应每一次迭代的比例因子，可由式(21)更新。

$$\rho(t+1)=\begin{cases}2\rho(t) & \text{if\#successes}>s_c\\ 0.5\rho(t) & \text{if\#failures}>f_c\\ \rho(t) & \text{otherwise}\end{cases} \tag{21}$$

式中：# failures 和# successes 为连续失败或成功数目；s_c 和 f_c 为可调阀值参数分别设为 15 和 5。

采用此改进的粒子群算法可快速求得能量管理策略的最优解，以便对各微电源进行实时最佳功率分派。

4 仿真研究

为了验证基于 Multi-Agent 多层能量管理策略的有效性，仿真研究分为两部分：电价竞标策略验证和能量管理策略验证。

4.1 电价竞标策略验证

本文采用一个公共电网公司和五个微电网公司的招投标模型，各电网的成本系数列于表 2。

表 2 微电网成本系数

Table 2 Cost coefficients

系数	UG 1	MG1	MG2	MG3	MG4	MG5
a	28	40	48	23	42	50
b	12.5	16.5	26.0	29.8	22.0	9.5
c	0.140	0.170	0.210	0.145	0.168	0.425
最大输出/MW	300	200	75	150	150	200
最小输出/MW	0	0	15	50	0	0

通过本文提出的电价竞标策略求解的竞价结果如表 3 所示。

(1) 当市场管理 Agent 给出负荷信息为 1000 MW 时，有三家发电公司获得最大功率发电，

其他三家也较为接近满发状态，说明通过次竞价策略各发电公司能够获得最大经济效益。

(2) 当负荷需求变为 800 MW 时，由于 MG2 发电达到了 75 MW 的功率输出上限值，与 1000 MW 时的负荷情况相比，其利润由 1580.1 美元降低为 302.1 美元。

(3) 当负荷需求量进一步降低到 600 MW 时，由于微 MG3 的发电量达到了下限值，此时 MG3 的虽然参与竞价过程，但该时刻其收益为零。

由表 3 表明，在该电价竞标策略下，除了发电达到上下限的特殊条件下，每个竞标者都能获得最大的经济利益。

表 3 微电网竞标结果

Table 3 Biding results of MG

负荷/MW	结果	UG 1	MG 1	MG 2	MG 3	UG 4	MG5	出清电价
	输出/MW	183.5	160.2	75.0	150.0	150.0	105.8	
1 000	利润/USD/h	5100.8	4000.0	1580.1	2412.0	3200.1	144.2	67.53
	电价/USD	67.53	61.23	56.30	58.26	61.11	63.25	
	输出/MW	159.7	128.4	75.0	73.2	105.0	75.15	
800	利润/USD/h	860.5	520.7	302.1	188.1	361.2	123.0	40.23
	电价/USD	40.23	39.25	30.65	32.51	37.55	38.72	
	输出/MW	125.3	98.8	49.0	50	79.63	62.1	
600	利润/USD/h	555.4	316.0	32.4	0	182.6	80.8	37.25
	电价/USD	37.251	36.58	29.85	28.99	35.29	36.52	

4.2 能量管理策略验证

本文以 MG1 为实例验证所提出的能量管理策略的有效性。该微电源包括一个微型燃机轮机(MT)、一个燃料电池(FC)、一个柴油发电机(DE)、一个光伏电源(PV)和一个风力发电机(WT)，为了保证 24 小时内给如图 4 所示的负荷持续不断供电，需要投入储能电池(BT)。

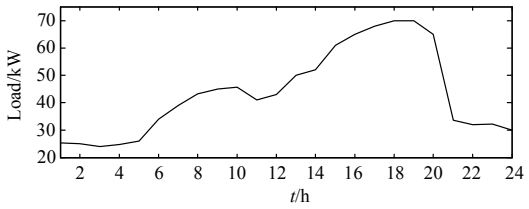

图 4 24 小时负荷需求

Fig. 4 Load demand during 24 hours

对于改进粒子群算法的参数设置如下：种群规模为 40，迭代次数为 300，维数是 6，加速度系数 $c_1=c_2=1.4962$，初始惯性权重为 0.2,终止值为 0.9。

在本文提出的能量管理策略下，MG1 中各微电源的最佳功率分派如图 5 和图 6 所示。MG1 的总成本优化曲线如图 7 所示。

从图 5 和 6 的功率分派曲线上看，在仿真的 24 h 内，可再生能源一直工作在 MPPT 模态，即该能量管理策略能最大限度地采用可再生能源供电。当可再生能源供电大于负荷时，MMA 可以将剩余功率

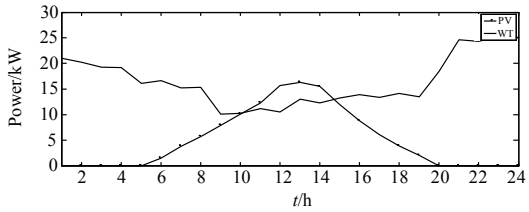

图 5 PV 和 MT 单元的发电

Fig. 5 Power of PV and WT units

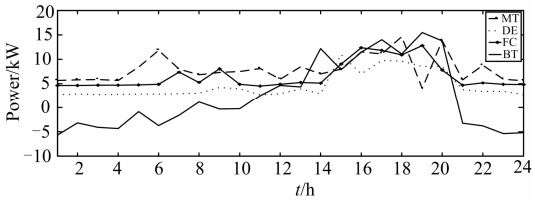

图 6 各微电源最佳功率分派

Fig. 6 Optimal power dispatches of all microsources

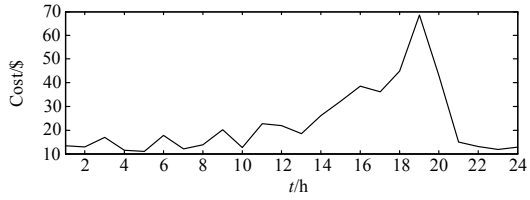

图 7 MG1 总成本的优化曲线

Fig. 7 Optimal total cost of MG1

分派储存于储能单元里；当可再生能源发电低于负荷时，储能元件放电。在整个仿真时间里，尽可能

地减小对 FC、DE 和 MT 发电单元的功率分派，因为这些发电单元具有高的运行成本和污染排放。该仿真结果表明：本文提出的能量管理策略不仅保证了负荷供电的可靠性，同时最大程度地减少了运行成本和改善了环境效益。

5 结论

本文提出了基于 Multi-Agent 多层能量管理系统，并设计了电价竞标策略和能量管理策略。通过 Agent 之间的信息交互和构建的多层管理策略，有效地实现了市场运行环境下微电网经济利益、运行成本和环境效益的最大化的目标。仿真结果表明，该方案在负载变化情况下通过实时电力交易和最佳的功率分派实现了微电网经济和环境效益的最大化。

参考文献

[1] 王成山, 李鹏. 分布式发电, 微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.

[2] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system volatage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96.

[3] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
ZHANG Li, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.

[4] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的智能配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 10-14.
TANG Zhijun, ZOU Guibin, GAO Houlei, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 10-14.

[5] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on effects of volt/var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.

[6] TENTI P, COSTABEBER A, MATTAVELLI P, et al. Distribution loss minimization by token ring control of power electronic interfaces in residential microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3817-3826.

[7] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122.
CHEN Dawei, ZHU Guiping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122.

[8] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[9] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.

[10] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.

[11] 霍群海, 李宁宁. 微电网中微源逆变器带混合负载控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 270-277.
HUO Qunhai, LI Ningning. Research on control strategy of micro-source inverter with mixed load in micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 270-277.

[12] MOGHADDAM A A, SEIFI A, NIKNAM T, et al. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source[J]. Energy, 2011, 36(11): 6490-6507.

[13] HATZIARGYRIOU N D, DIMEAS A, TSIKALAKIS A G, et al. Management of microgrids in market environment[C] // IEEE International Conference on Future Power Systems, 2005: 1-7.

[14] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-8.

[15] 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.

[16] DIMEAS A, HATZIARGYRIOU N. A multi-agent system for microgrids[M]. Methods and Applications of Artificial Intelligence, Springer Berlin Heidelberg, 2004: 447-455.

[17] COLSON C M, NEHRIR M H. A review of challenges to real-time power management of microgrids[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009: 1-8.

[18] QIAN A, JIAN Z. Optimization bidding strategies of microgrids based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 46-51.

[19] VAN DEN BERGH F, ENGELBRECHT A P. Cooperative learning in neural networks using particle swarm optimizers[J]. South African Computer Journal, 2000, 26(84-90): 21.

收稿日期：2014-09-08

作者简介：

李文云(1965-)，男，教授，高级工程师，研究方向为智能电网技术、电网智能化、调度信息化技术等；E-mial: liwenyun@yn.csg.cn

蒋亚坤(1970-)，男，硕士，高级工程师，研究方向为智能化调度系统、调度自动化技术等；

雷炳银(1982-)，男，硕士，高级工程师，研究方向为智能电网技术、调度智能化等。

(编辑　张爱琴)