基于多代理的微电网需求响应机制研究

张仔琪，莫 峻，高志展，任西旺

(广西大学电气工程学院，广西 南宁 530004)

摘要：为了解决微电网电能产消和就近高效消纳的问题，提出了一种多代理微电网交易模型，实现微电网多层面运营主体的利益共赢及资源统筹。在此基础之上，考虑到微电网中负荷不确定性的问题，设计了需求响应机制并引入奖惩制度，既激励用户积极参与响应又避免用户逐利行为，指导用户合理用电。算例分析表明，本文所提机制能有效提高微电网的经济效益和环境友好程度，显著降低用电成本，为分布式光伏参与电力市场交易提供支撑。

关键词：微电网；多代理系统；需求响应

Research on demand response mechanism for microgrid based on multi-agent

ZHANG Ziqi, MO Jun, GAO Zhizhan, REN Xiwang

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to solve the problems of power generation and consumption within microgrid and efficient consumption nearby, a multi-agent micro grid transaction model is proposed to realize the win-win benefits of multi-level operators and resource coordination. On this basis, considering the uncertainty of load in microgrid, a demand response mechanism is designed and a reward and punishment system is introduced, which not only encourages users to actively participate in the response, but also avoids the profit seeking behavior of users, so as to guide users to use electricity reasonably. The example analysis showed that the proposed mechanism could effectively improve the economic benefits and environmental friendliness of microgrid, significantly reduce the power consumption cost, and provide support for distributed photovoltaic to participate in power market transactions.

Key words: microgrid；MAS；demand response

0 引言

近几年，以风电、光伏发电为代表的可再生能源电力在我国得到了迅猛发展。随着价格的不断下降以及政策的支持，分布式发电技术日趋成熟并得到广泛应用。但是分布式电源的不确定性和不稳定性给分布式能源并网带来巨大的挑战。

微电网的提出旨在解决分布式能源并网运行的难题，实现分布式电源灵活、高效应用[1]。但由于分布式电源不可控、不易控及发电成本较高，导致微电网还不能完全参与电力市场竞争。考虑到微电网分布广泛、系统层次多、结构复杂和实时性要求比较高的特点[2]，用多代理系统模拟微电网参与电力市场交易，通过将控制权分散到各微电网元件实现分布式协调控制。目前，多代理系统在微电网中的应用多集中于优化调度[3-4]、能量管理[5-6]等方面，在市场交易领域应用较少。因此，本文将多代理系统用于协调微电网市场交易，使多代理系统在微电网中发挥更大的作用。

经济性是微电网技术推广和发展的重要依

据。需求响应作为需求侧优化运行的重要手段之一，可以挖掘用户的自我调节潜力，引导用户合理用电，提升经济效益[7-8]。目前，对需求响应已开展较多研究。文献[9]综合考虑了发电的环境成本和需求侧管理项目，达到减少系统装机容量以及能源消耗的目的。文献[10]研究了价格变化与需求量响应之间的耦合关系，并结合算例给出了电力需求弹性系数的求解方法。文献[11]以降低网侧功率波动、兼顾用户生活舒适度以及运行经济性为目标，建立基于分时电价机制的主动配电网柔性负荷调度模型。文献[12-13]分析了峰平谷 3 时段分时电价的差异性，提出利用电价弹性矩阵构造的含有 n 时段的用户响应模型。上述文献多数是电力公司与用户签订合同，在系统负荷高峰时期或者紧急状态下，按照合同(协议)约定的负荷电量直接进行中断或削减，并未充分考虑用户实际运行状况，用户不能根据实际用电情况及时调整，也并未考虑用户侧能效的激励作用，充分发挥用户的主观能动性，指导实际分布式产消用户主动配网参与需求响应。

基于以上分析，本文提出了一种多代理微电网交易模型，解决不同能源形式微电网之间电力互济交易和能源就近消纳的问题，合理高效地利用能源。引入需求响应机制将响应电量与电价耦合，根据分时电价响应模型，构建弹性电价模型。提出微电网响应电力需求用电费用核算方法，并制定奖惩制度，激励微电网用户主动响应电网需求的同时又避免因用户逐利行为虚报响应电量造成资源浪费，指导微电网合理分配电能。

1 多代理微电网交易模型

本地微电网参与电力市场后，可能会出现大电网和微电网同时存在电力剩余、不足的情况[14-15]。考虑到微电网的特殊性和环保节能要求，将各微电网互联，提高微电网群内新能源就地消纳的能力，实现分布式电源之间、微电网之间、微电网和大电网之间的协调控制。在微电网传统的系统结构和环境下，构建三层多代理微电网电力市场交易模型如图 1 所示。

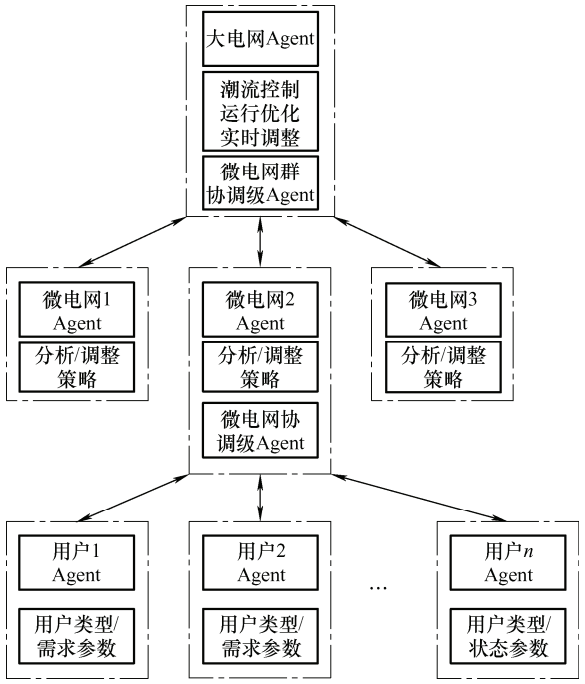

图 1 多代理微电网交易模型

Fig. 1 Multi agent microgrid transaction model

含微电网的电力市场主要代理(Agent)作用如下：

1) 大电网 Agent：统筹管理各微电网的运行情况。根据下级 Agent 提供的信息，预测用电，安排机组计划；将市场电价及微电网输出电量反馈给各级 Agent，为用户下一步交易决策提供参考；对各微电网进行调度，保证系统安全稳定运行。

2) 微电网群协调级 Agent：协调各微电网之间的通信，获取微电网群的供需数据，协调各微电网之间进行购售电交易并进行交易结算。

3) 微电网 Agent：根据下级 Agent 上报的微电网不平衡电量，确定自身运行角色(售电或购电微电网)，制定竞标/购电策略；对微电网进行实时监控，当微电网发生故障时，迅速从大电网切除进入孤岛运行状态。

4) 微电网协调级 Agent：协调微电网内的通信，获取微电网内的供需数据，向用户 Agent 发布需求响应任务；统计用户需求响应电量数据，向上级 Agent 上报不平衡电量；协调微电网内部

用户购售电交易并进行交易结算。

5) 用户 Agent：向上级 Agent 上报自身不平衡电量，根据上级 Agent 的响应任务上报自身响应电量，响应电量需求的用户按上报响应电量消减/增加自身负荷电量。

考虑到微电网的二重性，微电网根据自身供用电情况以售电商/购电商的身份参与电力市场竞争，电能由下至上分层交易消纳。用户有剩余电量时通过微电网优先卖给同一微电网中的其他用户，若仍有剩余，则由微电网统一收购后卖给其他微电网；用户处于缺电状态时，先向微电网上报不平衡电量，由同一微电网中其他用户认购，若仍需购电则需通过微电网向其他微电网购电；微电网群互济、消纳后，各微电网仍不能达到供用电平衡，则与大电网进行购售电交易。

2 基于激励的微电网需求响应机制

2.1 电价弹性系数

根据微观经济学原理，一种商品的价格变动和需求量的关系称为需求价格弹性[16]。电能具有商品的特点，故电价的变化与电能的需求量之间的关系也符合需求价格弹性理论。本文引入电价弹性系数 e，表示在某一时段的负荷变化与各时段电价变化之间的关系[17-18]，计算公式为

$$e_{i,j}=\frac{\Delta P_i/P_{i,0}}{\Delta Q_j/Q_{j,0}}=\frac{\left(P_i-P_{i,0}\right)/P_{i,0}}{\left(Q_j-Q_{j,0}\right)/Q_{j,0}} \tag{1}$$

式中，$P_{i,0}$、$Q_{j,0}$ 分别为实施分时电价前的电价和电量；P_i、Q_j 分别为实施分时电价后的电价和电量；ΔP_i、ΔQ_j 分别为电价和电量的变化量。

由于用户在不同时间用电特性不同，其电价弹性系数也将不同，由于用户只知道当前时刻 t 以前的电价，因此该矩阵为下三角矩阵，参考电价分时响应模型[19]，一天分为 24 个时段，得到居民用户的电价需求弹性系数矩阵 E 为[20]

$$E=\begin{bmatrix} e_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ e_{2,1} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{24,1} & e_{24,2} & \cdots & e_{24,24} \end{bmatrix} \tag{2}$$

用户主动响应电力需求时，响应配电网电量需求前后的电价差称为弹性电价[21]。用户 t 时段响应电力需求的弹性电价为

$$T_t(Q)=\Delta P_t=\frac{\sum_{t=1}^{n}\Delta Q_t P_{t.0}}{\sum_{t=1}^{n}e_{i,j}\times\sum_{t=1}^{n}Q_{t,0}} \tag{3}$$

2.2 用电单价设置

参考分时电价的制定规则，设定微电网内部用户 t 时段交易电价为 P_{Nt}；微电网向大电网购电和售电的单价分别为 P_{Gt}、P_{St}，用电单价分别为

$$P_{Nt}=\alpha_k P_{Np}+T_t(Q) \tag{4}$$

$$P_{Gt}=\alpha_k P_{Gp} \tag{5}$$

$$P_{St}=\alpha_k P_{Sp} \tag{6}$$

式中，α_k 为比例系数；P_{Np} 为微电网内部平时段交易价格；P_{Gp} 和 P_{Sp} 分别为大电网平时段购售电价格；$T_t(Q)$为弹性电价。

2.3 奖惩金额设置

在负荷高峰期，用户可以根据自身用电情况上报响应电量，并为响应赚取额外的奖励。同样，如果用户实际响应电量与所承诺的响应电量不符，他们将被迫支付罚款。奖励金额和惩罚金额表示为

$$\mathrm{inc}_i^{(t)}=\lambda_t Q_{IL,i}^{(t)} \tag{7}$$

$$\mathrm{pen}_i^{(t)}=\mu_t\left|Q_{IR,i}^{(t)}-Q_{IL,i}^{(t)}\right| \tag{8}$$

式中，λ_t 和 μ_t 分别为奖励价值和罚款价值，在不同时段对应不同价值；$Q_{IR,i}^{(t)}$ 为承诺响应电量；$Q_{IL,i}^{(t)}$ 为实际响应电量。

在 t 时段用户 i 总奖惩金额 $IP_i^{(t)}$ 为

$$IP_i^{(t)}=\mathrm{inc}_i^{(t)}-\mathrm{pen}_i^{(t)} \tag{9}$$

2.4 用电费用核算

微电网可以看作一个小型的配电网络，由于发电企业的售电权被供电公司垄断，且微电网内部发电量和响应电量存在不确定性，微电网内部的弹性电价变化很难反馈至发电端，微电网的接入并不会大幅度改变大电网的交易方式，大电网电价受微电网弹性电价的影响极其微小。因此，

微电网按大电网电价向大电网购电，余电按大电网收购价并网，微电网内部用户之间按弹性电价进行电能交易。

微电网处于缺电模式时，用电费用为

$$F_{\text{total 1}}(t)=P_{Gi}\left(\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{need},i}^{(t)}-\sum_{i=1}^{n}Q_{IL,i}^{(t)}-\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{produced},i}^{(t)}\right)-\sum_{i=1}^{n}IP_i^{(t)}+\left[\alpha_k P_{Np}+T_t(Q)\right]\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{produced},i}^{(i)} \tag{10}$$

当微电网处于余电模式时，用电费用为

$$F_{\text{total 2}}(t)=\left[\alpha_k P_{Np}+T_t(Q)\right]\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{produced},i}^{(t)}-\sum_{i=1}^{n}IP_i^{(t)}-P_{Si}\left(\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{produced},i}^{(t)}-\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{need},i}^{(t)}-\sum_{i=1}^{n}Q_{IL,i}^{(t)}\right) \tag{11}$$

2.5 环境效益核算

微电网主要是利用清洁能源发电，能减少传统能源的使用，从而减少化石燃料燃烧带来的负面效应。传统能源燃料燃烧产生的污染物主要有 SO_2、NO_x、CO_2、CO、粉煤灰、炉渣和 TSP 等。传统火力发电厂污染物环境价值如表 1 所示[22]。

表 1 火力发电厂治污费用及污染物排放量

Tab. 1 Pollution control cost and pollutant emission of thermal power plant

污染物类型	治污费用/(元/kg)	污染物排放量/(g/kW·h)
SO_2	6	8.6
NO_x	8	3.803
CO_2	0.023	822.8
CO	1	0.2
TSP	2.2	0.2
粉煤灰	0.12	52.3
炉渣	0.1	14.3

假设从大电网购入的电量均为传统火力发电，微电网环境效益为微电网交易相对于传统火力发电模式减少的环境污染价值，可计算为

$$B=\sum_{k=1}^{n}(V_k Q_k)\left(\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{G}}^{(i)}-\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{G},0}^{(i)}\right) \tag{12}$$

式中，$\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{G}}^{(i)}$ 和 $\sum_{i=1}^{n}Q_{\text{G},0}^{(i)}$ 分别为响应前后微电网向大电网购电电量；V_k 和 Q_k 分别为第 k 种污染物治污费用和度电污染物排放量。

3 算例分析

为了验证本文所提机制的效果，本文选取广东某小区典型日负荷数据，以该小区作为一个小型微电网进行研究。微电网 24 时段负荷、光伏发电量和净负荷如图 2、图 3 所示。

该微电网负荷存在明显的峰谷时段，且峰谷差比较大。21:00 时段净负荷最大，为 350 kW，15:00 时段净负荷最小，为−250 kW。在时段 1:00～7:00，20:00～24:00，光伏电源不出力，微电网所需电量完全由大电网输送。7:00～8:00、11:00～17:00 时段净负荷小于 0，该时段分布式光伏优先就近消纳，多余光伏电量将并网售给大电网。

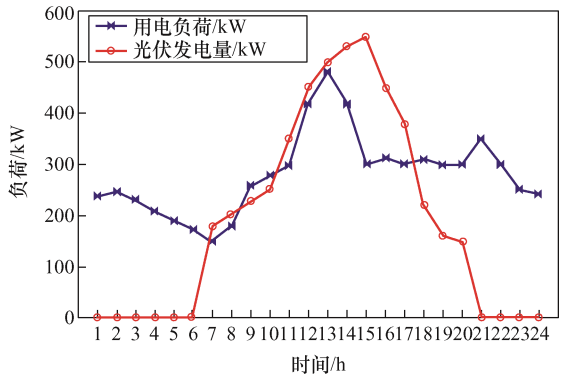

图 2 微电网 24 时段用电负荷、光伏发电量

Fig. 2 Power load and photovoltaic power generation in 24 hours

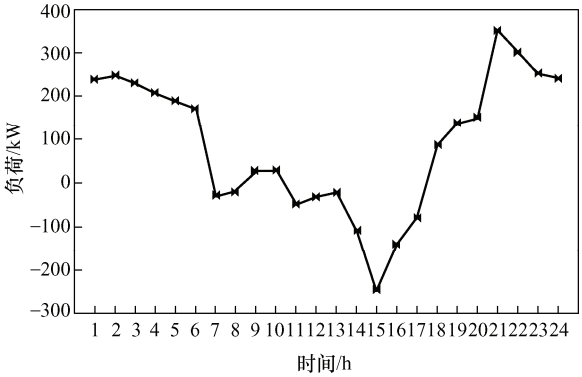

图 3 微电网 24 时段净负荷

Fig. 3 load in 24 hours

参考文献[23]，将 24 时段划分为峰、平和谷

三个时段。参考国家发展改革委批准的现行销售电价表中的电度电价，设定平段电价=基础电价，峰段电价=平段电价×170%，谷段电价=平段电价×70%。峰、平和谷时段的划分和对应的各时段购售电价格如表 2 所示。

表 2　时段划分及其对应电价

Tab. 2 Time division and corresponding electricity price

时段	时段划分	电价/(元/kW·h)		
		向电网购电	售电给电网	微电网内部交易价
峰	11:00～15:00，19:00～21:00	1.08	0.83	0.85
平	8:00～10:00，16:00～18:00，22:00～23:00	0.64	0.49	0.5
谷	00:00～7:00	0.45	0.34	0.35

各时段电价弹性系数如表 3 所示。

表 3　各时段需求价格弹性系数

Tab. 3 Price elasticity of demand at each time period

自弹系数			交叉弹系数		
峰	平	谷	峰-平	峰-谷	平-谷
0.33	0.42	0.51	0.02	0.04	0.02

3.1　削峰填谷能力分析

微电网在谷时段响应电量不能超过自身负荷25%的用电容量，在平时段和峰时段响应电量不能超过其自身负荷 50%的用电容量。需求响应前后 24 时段用电负荷如图 4 所示。

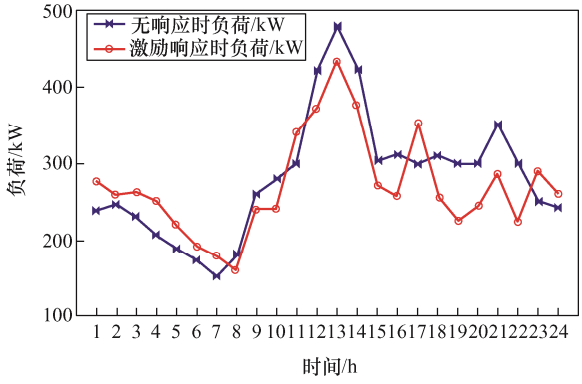

图 4　响应前后用电负荷曲线

Fig. 4 Comparison of power load before and after response

由图 4 可知，引入需求响应后，系统最大负荷由 480 kW 下降到 435 kW，减少 45 kW，最小用电量由原来的 150 kW 上升到 160 kW，增加了 10 kW。需求响应前峰谷差为 320 kW，需求响应后峰谷差为 285 kW，负荷波动率由 0.308 降低到 0.247。峰时段用电量减少 417 kW，平时段用电量减少 34 kW，谷时段用电量增加 187 kW。因此，本文所提需求响应激励机制有效引导用户错峰用电，将高电价时段负荷转移至低电价时段，降低峰时段用电量，增加低谷时段用电量，平缓负荷曲线，提高负荷率，达到削峰填谷的作用。

3.2　经济性分析

响应奖励金额在峰平谷时段分别设定为 0.6/0.4/0.2 元/kW·h。当承诺响应电量和实际响应电量偏差绝对值在 10%范围内时免于惩罚，当偏差电量大于 10%时对超出电量进行处罚，处罚值为 1.2 元/kW·h。按式(7)～式(11)，计算微电网响应前后 24 时段的用电费用、奖惩金额如图 5、图 6 所示，峰、谷和平时段的用电成本和用电量如表 4 所示。

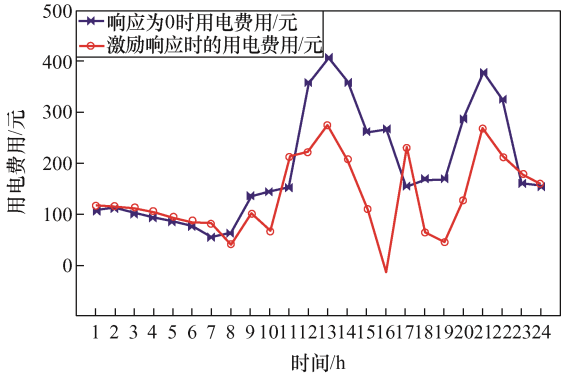

图 5　响应前后用电费用对比

Fig. 5 Comparison of costs before and after response

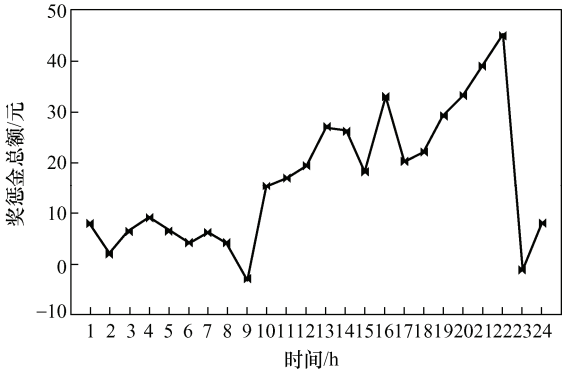

图 6　24 时段奖惩金额

Fig. 6 Reward and punishment amount in 24 hours

峰时段，在需求响应激励模式下，用电量减少 417 kW·h，用电费用减少 1 221.07 元，度电成本由 0.905 元/kW·h 减小到 0.568 元/kW·h。谷时段和平时段，以价格作为引导用户响应电量作用较弱。传统模式下，微电网用户的 24 h 实际用电量为 6 709 kW·h，用电总费用为 4 564.67 元；需求响应激励模式下，微电网的 24 h 实际用电量为 6 505 kW·h，用电费用为 3 251.95 元。对比计算分析可以得出，在需求响应激励机制下，实际用电量变化不大，但用户用电成本却大大降低，特别是在用电高峰时，用户购电成本显著减少。这是因为：一方面，微电网与主网的交互可以更好地进行经济协调；另一方面，受用电高峰期过高的电价和需求响应激励作用的双重影响，用户会调整用电负荷，对部分非必需负荷进行中断或转移至其他低电价时段使用。

表 4　响应前后峰平谷用电量及费用

Tab. 4 Power consumption and cost before and after response

时段	响应为 0		激励响应	
	电量/(kW·h)	用电费用/元	电量/(kW·h)	用电费用/元
峰	2 921.00	2 643.83	2 504.00	1 406. 16
平	2 236.00	1 227.94	2 202.00	1 055.38
谷	1 612.00	692.90	1 799.00	740.01
总量	6 769.00	4 564.67	6 505.00	3 201.55

在 9、12、22 和 23 时段，用户实际响应电量超出其承诺响应电量的 10%，需为超出部分电量缴违约金，且在 9 和 23 时段其惩罚值大于奖励值。当大量用户，尤其是在峰时段，上报响应电量超出自身所能承受的消纳量，则供电公司需预留大量快速起停的备用机组来平抑微电网用电的不平衡电量，造成资源浪费。

3.3　环境效益分析

按式(12)，核算微电网环境治理成本。传统模式下，环境治理费用为 560.74 元；在需求响应激励模式下，环境治理费用为 534.2 元。因此，微电网需求响应机制下环境效益为 26.54 元/天。由此可见，本文模型能有效减少污染气体的排放，提升系统的环境友好程度。同时，本文引入了多代理微电网分层消纳模型，当某个微电网在某时段的负荷过低，无法完全消纳其可再生能源的产出时，为了避免可再生能源的浪费，可以将这部分能源卖给其他功率不足的微电网，或者交由有储能设备的其他微电网代为存储；当该微电网产出无法满足自身负荷需求时，可优先利用之前存储的能源进行功率补偿，提高可再生能源的利用率。

4　结束语

本文针对微电网之间电力互济交易和能源就近消纳的问题，构建了多代理微电交易模型，提出了一种用户自主需求响应机制。算例结果显示：

1) 需求响应激励机制能引导用户转移用电时段，将高电价时段负荷转移至低电价时段，降低峰时段用电量，增加低谷时段用电量，平缓负荷曲线，达到削峰填谷的效果。

2) 引入奖惩机制，既能激励用户主动参与响应，又能避免因用户的逐利行为超预期上报响应电量而造成电网的不稳定。

3) 需求响应激励机制能大幅降低用电费用和环境治理费用，有良好的经济效益和环境效益。

本文所述模型可为微电网参与电力市场提供参考。实际上，微电网中用户并不只有单一类型的居民用户，下一步将对多种用户构成的微电网激励型需求响应模型进行研究。**EA**

参考文献

[1] 杨新法，苏剑，吕志鹏，等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：57-70.

[2] 李鹏，窦鹏冲，李雨薇，等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备，2015，35(4)：8-16.

[3] 孔祥玉，曾意，陆宁，等. 基于多智能体竞价均衡的微电网优化运行方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(6)：1626-1634.

[4] HOU Jiebin，LIAO Bilian. Hierarchical coordinated

voltage control of active distribution network and microgrid based on multi-agent technology[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science，2020，3(3)：86-94.

[5] 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.

[6] NICHOLAS G. Using behavioral economic theory in modeling of demand response[J]. Applied Energy，2019，23(9)：107-116.

[7] 李彬，陈京生，李德智，等. 我国实施大规模需求响应的关键问题剖析与展望[J]. 电网技术，2019，43(2)：694-704.

[8] 张晓辉，闫鹏达，钟嘉庆，等. 考虑环境成本和需求侧管理项目的电源规划模型[J]. 电网技术，2015，39(10)：2809-2814.

[9] 周磊，李扬. 分时电价环境下基于家居能量管理系统的家居负荷建模与优化运行[J]. 电网技术，2015，39(2)：367-374.

[10] 孙建军，张世泽，曾梦迪，等. 考虑分时电价的主动配电网柔性负荷多目标优化控制[J]. 电工技术学报，2018，33(2)：401-412.

[11] 刘迪，孙毅，李彬，等. 计及调节弹性差异化的产消群价格型需求响应机制[J]. 电网技术，2020，44(6)：2062-2070.

[12] 汪磊，杨贺钧，马英浩，等. 考虑多重评价指标的多时段分时电价优化模型[J]. 中国电力，2019，52(6)：54-59.

[13] 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.

[14] 王思明，牛玉刚，方磊，等. 考虑新能源出力不确定性的微网社区双阶段调度策略[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(17)：89-98.

[15] 高亚静，吕孟扩，梁海峰，等. 基于离散吸引力模型的用电需求价格弹性矩阵[J]. 电力系统自动化，2014，38(13)：103-107，144.

[16] 马冲. 基于用户用电特性的分时电价优化研究[D]. 北京：华北电力大学，2019.

[17] AALAMI H A，MOGHADDAM M P，YOUSEFI G R. Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs[J]. Applied Energy，2010，87(1)：243-250.

[18] 陈沧杨，胡博，谢开贵，等. 计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J]. 电网技术，2014，38(8)：2141-2148.

[19] 林清明. 智能电网分时电价的定价与优化[D]. 上海：上海交通大学，2015.

[20] 吉斌，莫峻，谭建成. 高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J]. 电网技术，2018，42(10)：3315-3323.

[21] 陆华，周浩. 发电厂的环境成本分析[J]. 环境保护，2004(4)：51-54.

[22] 王冠男. 基于动态优化调度的微网经济分析[D]. 北京：华北电力大学，2013.

作者简介：

张仔琪

张仔琪(1996—)，女，硕士研究生，研究方向为电力市场。

莫峻(1983—)，男，博士，讲师，研究方向为电力系统继电保护、网络通信及新能源技术。

高志展(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为电力市场。

(收稿日期：2020-10-19)