

DOI: 10.7667/PSPC160407

基于Stackelberg博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化

李 暄¹, 马 瑞¹, 罗 阳²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 国网湖南省电力公司岳阳供电分公司, 湖南 岳阳 414022)

摘要: 智能电网背景下, 微网的发展赋予其自身主动响应特性。目前基于价格弹性理论的价格响应模型未能有效衡量微网与供电公司间的主动博弈行为, 为此提出基于 Stackelberg 博弈的微网价格响应及供电定价优化方法。基于模糊最大满意度法建立了兼顾用电成本和用电舒适度的微网用户效用函数, 从而构建基于 1- n 型 Stackelberg 博弈的微网价格响应及供电定价优化模型, 采用基于遗传算法的逆向归纳法求解。算例仿真求得供电公司与三个不同响应程度微网的 Stackelberg 博弈均衡点, 分析对应供电公司电价优化策略和各微网响应特征, 验证了所提方法的可行性, 为预测评估微网主动响应特性以实现供电公司科学优化定价提供理论参考。

关键词: 微电网; 需求响应; Stackelberg 博弈; 遗传算法; 模糊

Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game

LI Xuan¹, MA Rui¹, LUO Yang²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Grid Yueyang Power Supply Company, Yueyang 414022, China)

Abstract: In the context of smart grid, development of micro-grid endows itself with demand response (DR) character. Current price-based DR model based on elasticity price theory is not effective in evaluating the active game behavior between micro-grid and the power supply company. To this end, this paper proposes price-based DR model of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game. Cost and consumption comfort level are together considered to build benefit function of micro-grid based on fuzzy satisfaction-maximizing method. Then price-based DR and optimal pricing model are proposed based on 1- n Stackelberg game, and solved by genetic algorithm (GA) based backward induction. The simulation obtains the Stackelberg game balance point of the model of power supply company and three different micro-grids. Corresponding pricing strategy and micro-grid's response characteristics are analyzed, proving the feasibility of the proposed method, and providing theoretical reference for prediction and estimation of micro-grid's response characteristic to help the power supply company scientifically optimize electricity price.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277015) and Education Department Innovation Platform Open Foundation of Hunan Province (No. 54291).

Key words: micro-grid; demand response; Stackelberg game; genetic algorithm; fuzziness

0 引言

近年来微网以其灵活运行、安全可靠、清洁能源友好接入等优势成为智能电网研究热点^[1-3]。微网由于具有多重不确定性与主动响应特质^[4-5], 是主网的一种需求响应资源^[6]。电价作为有效的激励响应

措施, 相关传统价格响应模型的建立大多基于价格弹性理论^[7-8], 然而对于微网, 其价格弹性矩阵与其内部结构、可再生能源类型、设备用电约束、网内用户用电习惯等诸多因素相关, 基于价格弹性的价格响应模型难以准确反映不同类型微网结构的内在约束, 建立科学合理的微网价格响应模型值得研究。

随着智能电网快速发展与电力市场化改革, 博弈论为该环境下的多决策主体优化问题提供了新的解决途径^[9], 主要集中在供电商间、发电商间^[10]、

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51277015); 湖南省教育厅“创新平台开放基金”项目 (54291)

用户与供电商间^[11]的博弈研究。微网参与需求响应本质反映了其与供电公司间的博弈行为^[12], 因而基于博弈理论建立科学有效的供电公司和微网的需求响应模型及研究对应均衡点求取方法, 有利于微网根据自身特征和偏好做出最佳响应策略, 同时使供电公司确定合理价格激励以提高自身效益, 实现共赢。文献[13]研究多个互联微网间价格竞争的非合作博弈模型及其 Nash 均衡。文献[14]基于合作博弈研究多微电网之间的能量交换, 将微电网分成售电方和购电方两个联盟, 其间以网损最小为目标进行电能交换。文献[15]基于多代理系统建立智能配电网调度决策模型和电价投标决策模型, 模拟多微网智能配电网动态博弈过程。上述文献考虑微网间博弈交互过程, 未涉及微网与主网博弈的主从关系。

本文从博弈论角度考虑微网这类需求响应资源, 首先给出供电公司及微网效用函数, 其中微网效用函数采用模糊最大满意度法综合考虑其内部设备用电成本及用户用电舒适度。从而提出基于 Stackelberg 博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化模型, 采用基于遗传算法的逆向归纳法求解, 研究由 3 个不同响应类型的微网和供电公司共同参与的 1- n 型 Stackelberg 博弈达到均衡时, 各自策略及对应收益情况, 探讨不同类型微网价格响应特征。

1 供电公司-微网 1- n 型 Stackelberg 博弈

1.1 供电公司-微网 1- n 型 Stackelberg 博弈基本假设

微网在并入主网运行过程中, 依托其内部结构和可再生能源供电特征, 可灵活调整负荷, 对主网而言是一种需求响应资源。在我国电力市场环境下, 供电公司处在自然领导地位, 需求响应过程中, 首先供电公司根据自身运行效益及市场预测出清电价从电力市场竞价购得电能, 然后根据微网用户跟随响应习惯制定合理电价, 最大化公司自身收益。从智能电表接受到用电价格信息后, 微网用户一般只能基于该价格以及用电习惯作出最大化自身用电效益的响应行为。因此该过程实质上是一种双方由于市场地位不对称而导致先后决策的动态博弈行为, 其中供电公司为领导者, 微网为跟随者。Stackelberg 博弈模型用以描述这种不对称博弈行为, 领导者知道跟随者会对其方案作出反应, 因而它在制定方案时考虑了跟随者的响应。亦称为“主导企业模型”。

基于上述市场背景中需求响应过程反映的博弈本质, 建立以供电公司为领导者以及 n 个并入主网的微网为跟随者的 1- n 型 Stackelberg 博弈模型, 来描述与评估微网的响应行为和制定供电公司的分时电价策略, 其中微网效用函数综合考虑微网并入

主网时的用电成本和其用户的用电舒适度。

设立如下基本假设: 1) 博弈参与者均是理性, 即合理追求自身效益最大化; 2) 智能电表作为供电公司与微网间动态博弈工具, 促使双方信息透明, 供电公司能及时获取各微网用电历史估计其效用函数, 各微网也能根据供电公司历史电价等信息估计供电公司效用函数, 故假设所提 Stackelberg 博弈是完全且完美信息动态博弈。

1.2 供电公司-微网 1- n 型 Stackelberg 博弈均衡

对于 1 个供电公司, n 个响应微网的 Stackelberg 博弈, 设微网集为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 微网 n 的用户集为 $K_n = \{1, 2, \dots, k_n\}$, 时间区间为 $T = \{1, 2, \dots, t\}$, 一般考虑 $t = 24$ 。供电公司制定的时序电价集为 $P = [p^1, p^2, \dots, p^t]$, 其中 p^t 表示为 t 小时的电价。

博弈规则为: 一个领导者(供电公司)首先从其策略空间 S_L 内制定和发布其策略 s_L (如电价), 其他称为跟随者的 n 个博弈者(各微网)观测到 s_L , 然后从其策略空间 S_{F_i} ($i = 1, 2, \dots, n$) 选择其最优响应(如用电量) s_{F_i} ($i = 1, 2, \dots, n$)。假设跟随者目的在于最小化效用函数 $U_{F_i}(s_L, s_{F_i})$ ($i = 1, 2, \dots, n$) (如用电成本), 领导者在于最大化效用函数 $U_L(s_L, s_{F_1}, \dots, s_{F_n})$ (如目标收益)。

通过逆向归纳法求解其子博弈精炼纳什均衡: 首先分析在领导者选择 s_L 的条件下跟随者的最优决策, 即由跟随者的决策问题 $\min U_{F_i}(s_L, s_{F_i})$ 得最优响应 $s_{F_i} = R_i(s_L)$ ($i = 1, 2, \dots, n$); 由于领导者可预测到跟随者将作出前述策略 s_{F_i} , 则其决策问题为 $\max U_L(s_L, R_1(s_L), \dots, R_n(s_L))$, 从而可解得 $s_L^* = \arg \max U_L(s_L, R_1(s_L), \dots, R_n(s_L))$, 并获取 s_L^* 下跟随者的响应行动 $s_{F_i}^* = R_i(s_L^*)$ 。至此获得 Stackelberg 博弈均衡结果 $(s_L^*, s_{F_i}^*)$ 。

2 基于 1- n 型 Stackelberg 博弈的微网价格响应与供电价格优化模型

2.1 供电公司效用函数

采用供电公司竞价决策模型^[16]作为供电公司制定电价策略的效用函数, 其 t 时段决策模型为

$$\max U_L^t = \max \left(\sum_{t \in T} p^t \times \sum_{n \in N} \sum_{k_n \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} x_{k_n, a}^t - \sum_{t \in T} C_c^t - \sum_{t \in T} p_M^t \times \sum_{n \in N} \sum_{k_n \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} x_{k_n, a}^t \right) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } C_c = a_c \cdot \left(\sum_{n \in N} \sum_{k \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} x_{k_n, a}^t \right)^2 + b_c \cdot \sum_{n \in N} \sum_{k \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} x_{k_n, a}^t + d_c \quad (2)$$

$$\bar{\lambda} \leq p^t \leq \lambda_{\max} \quad (3)$$

$$p^{\min} \leq p^t \leq p^{\max} \quad (4)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{k_n \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} x_{k_n,a}^t \leq E_t^{\max}, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} p^t \times \sum_{n \in N} \sum_{k_n \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} x_{k_n,a}^t \leq R^{\max} \quad (6)$$

其中, 式(1)右部分括号内即为供电公司的效用函数。 $x_{k_n,a}^t$ 为 t 时段用户 k_n 的 a 设备用电量; A_{k_n} 为用户 k_n 的设备集; a_c, b_c, d_c 为供电公司的运营成本系数; p^t 为 t 时段市场预测出清电价; $\bar{\lambda}$ 为市场出清下网电价; p^{\max} 和 p^{\min} 为供电电价上下限; E_t^{\max} 为 t 时段最大供电量; R^{\max} 表示利润上限。

2.2 微网效用函数

1) 微网用户用电舒适度建模

以实际用电负荷与名义用电需求之差的函数表征用电舒适度^[17-18]。对于微网用户 k_n 的满意度函数 $s_{k_n}(l_{k_n}, d_{k_n})$ 有如下特点。

(1) 若实际负荷小于名义需求即 $l_{k_n} < d_{k_n}$ 时, 满意度函数值为正, 表征微网用户不满意, 函数值随实际负荷减少而更快增加, 表示为

$$s_{k_n}(l_{k_n}, d_{k_n}) > 0, \frac{\partial s_{k_n}}{\partial l_{k_n}} < 0, \frac{\partial^2 s_{k_n}}{\partial l_{k_n}^2} > 0$$

(2) 当实际负荷大于名义需求即 $l_{k_n} > d_{k_n}$ 时, 满意度函数值为负, 表征微网用户满意, 且随实际负荷增加而缓慢降低, 表示为

$$s_{k_n}(l_{k_n}, d_{k_n}) < 0, \frac{\partial s_{k_n}}{\partial l_{k_n}} < 0, \frac{\partial^2 s_{k_n}}{\partial l_{k_n}^2} > 0$$

(3) 当实际负荷等于名义需求即 $l_{k_n} = d_{k_n}$ 时, $s_{k_n}(l_{k_n}, d_{k_n}) = 0$ 。

本文选取微网用户舒适度模型为

$$s_{k_n}(l_{k_n}, d_{k_n}) = d_{k_n} \beta_{k_n} \left[\left(\frac{l_{k_n}}{d_{k_n}} \right)^{\alpha_{k_n}} - 1 \right] \quad (7)$$

式中, $\alpha_{k_n} < 1$ 和 $\alpha_{k_n} \beta_{k_n} < 0$, 不同 α_{k_n} 和 β_{k_n} 用以区分不同微网用户舒适度 s_{k_n} 。扩展得到 t 时段下微网用户 k_n 所用设备 a 的用电舒适度^[17]为

$$s'_{k_n,a}(l_{k_n,a}^t, d_{k_n,a}^t) = d_{k_n,a}^t \beta_{k_n,a}^t \left[\left(\frac{l_{k_n,a}^t}{d_{k_n,a}^t} \right)^{\alpha_{k_n,a}^t} - 1 \right], a \in A_{k_n} \quad (8)$$

2) 设备用电成本效用函数建模

将微网设备集 A_{k_n} 分为不可转移设备集合 NTE_{k_n} , 可转移设备集合(包含可中断设备集 IE_{k_n} , 不可中断设备集 NIE_{k_n})以及可削减设备集 CE_{k_n} 。

(1) 不可转移用电设备 NTE_{k_n} : 该负荷不会根据小时电价调整电量消耗, 故固定时段内不可转移用

电设备的耗电曲线及电量固定, 且用电满意度为 1。

(2) 可中断设备 IE_{k_n} : 对于每个可中断设备 $a \in IE_{k_n}$, 在调度周期内 $T = \{1, 2, \dots, t_{\text{END}}\}$ 的能量消耗向量 $\mathbf{x}_{k_n,a} = [x_{k_n,a}^1, \dots, x_{k_n,a}^t, \dots, x_{k_n,a}^{t_{\text{END}}}]$ 。调度周期内所有设备 $a \in I_{k_n}$ 的总消耗电量为 $E_{k_n,a}$, 每个设备 a 的调度窗口为每个微网用户根据其喜好定义为 $T_{k_n,a} = \{\alpha_{k_n,a}, \alpha_{k_n,a} + 1, \dots, \beta_{k_n,a}\}$ 。由于窗口 $T_{k_n,a}$ 为连续, 需要明确调度起始时间 $\alpha_{k_n,a} \in T$ 以及 $\beta_{k_n,a} \in T$ 。故该可中断设备用电成本最小化问题建模如下。

$$\min C_{I_{k_n,a}} = \min_{x_{k_n,a}^t} \sum_{t=1}^{t_{\text{END}}} p^t \times x_{k_n,a}^t \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=\alpha_{k_n,a}}^{\beta_{k_n,a}} x_{k_n,a}^t = E_{k_n,a} \quad (10)$$

$$x_{k_n,a}^t = 0, \forall t \in T \setminus T_{k_n,a} \quad (11)$$

$$\gamma_{k_n,a}^{\min} \leq x_{k_n,a}^t \leq \gamma_{k_n,a}^{\max}, \forall t \in T_{k_n,a} \quad (12)$$

其中: 式(10)表示设备 a 在调度时间内的运行电量需求; 式(11)表示在调度窗口外时段内没有运行需求; 式(12)表示每个设备 a 在小时 $t \in T_{k_n,a}$ 的电量消耗约束, 其中 $\gamma_{k_n,a}^{\min}$ 与 $\gamma_{k_n,a}^{\max}$ 为用电水平下限和上限。

(3) 不可中断设备 NIE_{k_n} : 对于不可中断设备 $a \in NIE_{k_n}$ 要求其在调度周期内完成, 但需要在某些时段连续运行, 定义运行时间长度为 $L_{k_n,a}$ 。每位微网用户需在调度窗口 $T_{k_n,a} = \{\alpha_{k_n,a}, \alpha_{k_n,a} + 1, \dots, \beta_{k_n,a}\}$ 内明确设备运行起始时间 $s_{k_n,a}$ 和终止时间 $s_{k_n,a} + L_{k_n,a}$ 。故该问题需找到最优起始时间以最小化用户不可中断设备的用电成本。

$$\min C_{NIE_{k_n,a}} = \min_{s_{k_n,a}} \left\{ \min_{x_{k_n,a}^t} \sum_{t=s_{k_n,a}}^{s_{k_n,a} + L_{k_n,a}} p^t \times x_{k_n,a}^t \right\} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=s_{k_n,a}}^{s_{k_n,a} + L_{k_n,a}} x_{k_n,a}^t = E_{k_n,a} \quad (14)$$

$$\alpha_{k_n,a} \leq s_{k_n,a} \leq \beta_{k_n,a} - L_{k_n,a} \quad (15)$$

$$x_{k_n,a}^t = 0, \forall t \in T \setminus T_{k_n,a} \quad (16)$$

$$\gamma_{k_n,a}^{\min} \leq x_{k_n,a}^t \leq \gamma_{k_n,a}^{\max}, \forall t \in T_{k_n,a} \quad (17)$$

其中: 式(14)表示对于每个设备 a 满足完成任务所需电量; 约束公式(16)、式(17)同式(11)、式(12)。

(4) 可削减设备 CE_{k_n} : 假设每个可削减设备 $a \in CE_{k_n}$, 微网用户 k_n 需选择开始时间 $\alpha_{k_n,a} \in T$ 和终止时间 $\beta_{k_n,a} \in T$ 。定义每个可削减设备在 t 时段的电量消耗 $x_{k_n,a}^t$, 微网最小可接受能量消费水平 $\underline{u}_{k_n,a}^t$ 和最大允许消费水平 $\bar{u}_{k_n,a}^t$ 不同。一般情况下, $\gamma_{k_n,a}^{\min} \leq \underline{u}_{k_n,a}^t$ 和 $\bar{u}_{k_n,a}^t \leq \gamma_{k_n,a}^{\max}$, 最终有 $\underline{u}_{k_n,a}^t \leq x_{k_n,a}^t \leq \bar{u}_{k_n,a}^t$ 。

3) 基于模糊最大满意度的微网综合效用函数建模

不同微网用户对于价格和用户用电舒适度的偏好不同, 针对此多目标优化问题, 采用最大满意度法^[19]可得到微网 n 在时段 t 的综合效用函数 U_n^t 为

$$U_n^t = \sum_{k \in K_n} \sum_{a \in A_{k_n}} \left(\frac{\mu_{C_{k_n,a}}^t + \mu_{S_{k_n,a}}^t}{2} \right) \quad (18)$$

式中, $\mu_{C_{k_n,a}}^t$, $\mu_{S_{k_n,a}}^t$ 分别为 t 时段中微网用户 k_n 所用设备 a 的用电成本和用电舒适度的满意度。微网用户用电成本隶属度函数选取偏小型梯形函数^[20], 如式(19)所示, 微网用户舒适度模型的隶属度函数如式(20)所示, 且满足式(21)、式(22)约束。

$$\mu_{C_{k_n,a}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq C_{k_n,a} \leq C_{\min} \\ \frac{C_{\max} - C_{k_n,a}}{C_{\max} - C_{\min}}, & C_{\min} \leq f_m \leq C_{\max} \\ 0, & C_{k_n,a} \geq C_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_{S_{k_n,a}} = \begin{cases} 1, & S_{2,\max} \leq S_{k_n,a} \leq S_{1,\min} \\ \frac{S_{1,\max} - S_{k_n,a}}{S_{1,\max} - S_{1,\min}}, & S_{1,\min} \leq S_{k_n,a} \leq S_{1,\max} \\ \frac{S_{2,\min} - S_{k_n,a}}{S_{2,\min} - S_{2,\max}}, & S_{2,\min} \leq S_{k_n,a} \leq S_{2,\max} \\ 0, & S_{k_n,a} \geq S_{1,\max} \text{ OR } S_{k_n,a} \leq S_{2,\min} \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{s.t. } |S_{2,\max}| > S_{1,\min} \quad (21)$$

$$|S_{2,\min} - S_{2,\max}| > S_{1,\max} - S_{1,\min} \quad (22)$$

3 基于 1- n 型 Stackelberg 博弈的微网价格响应与供电价格优化模型求解

逆向归纳法为求解子博弈精炼纳什均衡的一般方法^[21], 由于博弈各方效用函数非线性且强扩展性, 故考虑鲁棒性较高、收敛性较强的遗传算法优化博弈双方各自决策, 即采用基于遗传算法迭代的逆向归纳法求解 1- n 型 Stackelberg 博弈。计算流程如图 1 所示。

首先供电公司根据市场预测出清电价和预测电量优化其效用函数制定最优电价决策, 各微网则基于供电公司制定的价格曲线来最大化自身效用函数, 作出电量响应, 继而基于各微网最优响应电量, 供电公司优化修正开始制定的最优电价, 得到修正最优电价策略, 从而达到 Stackelberg 博弈均衡。以上博弈均衡求解过程采用遗传算法编码求解。然后获取均衡对应下的各微网具体响应电量及其效用函数值。至此, 供电公司的最优电价以及微网的最优响应电量构成 Stackelberg 博弈均衡结果, 称为 Stackelberg 博弈的逆向归纳解^[21]。

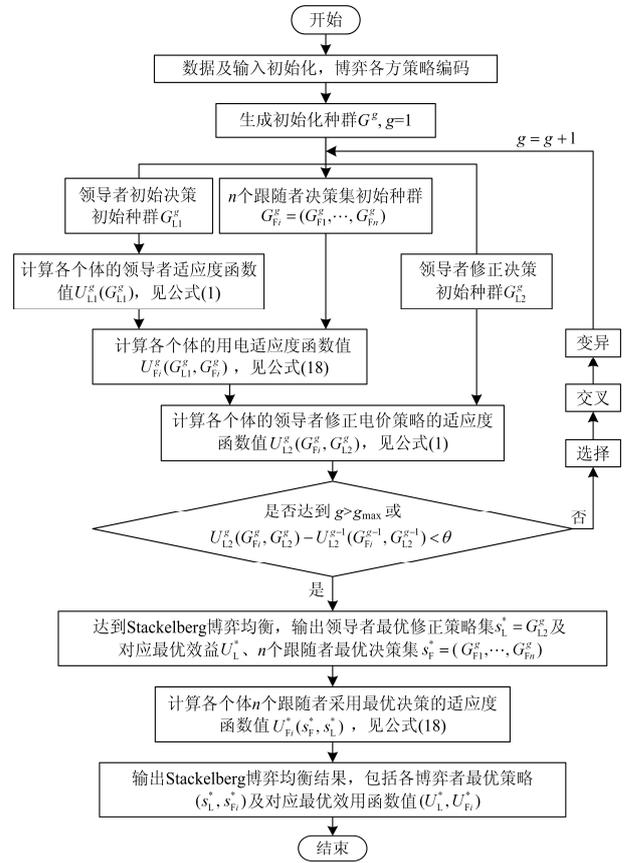


图 1 基于遗传算法的逆向归纳法流程

Fig. 1 Genetic algorithm based backward induction

4 算例分析

4.1 算例参数和假设

供电公司侧数据源于美国 FERC 所提供的市场预测日前电价^[22], 将其作为购电费用。微网侧主要考虑 3 个微网, 代表实际中的 3 类由于自身结构类型不同而需求响应程度不同的微网: 高响应、一般响应、低响应微网, 假定每个微网各 40 用户, 典型设备种类数量及对应用电参数相同, 根据文献 [23-25] 拟定如表 1~表 4。微网在基准固定电价 0.4 元/kWh 下的原始负荷曲线如图 2 所示。3 个微网并入电网运行时其用户对价格和用电舒适度的倾向不同, 图 3、图 4 分别表示 3 个微网中某设备某时段下的用户用电成本和舒适度的隶属度函数, 其中横坐标括号中为相比于初始数值的不同倍数。

表 1 不可转移设备用电参数

Table 1 Parameters for untransferable equipment

设备名称	日用量 E_a / kWh	调度周期 T_a	最小功率 r_a^{\min} / kW	最大功率 r_a^{\max} / kW
冰箱	3.32	0:00-24:00	0.09	150

表 2 可中断设备用电参数

Table 2 Parameters for interruptible equipment

设备名称	日用量 E_a / kWh	调度周期 T_a	最小功率 r_a^{min} / kW	最大功率 r_a^{max} / kW	一般时长/ h
PHEV	9.9	0:00-24:00	0	2	8~10

表 3 不可中断设备用电参数

Table 3 Parameters for uninterruptible equipment

设备名称	日用量 E_a / kWh	调度周期 T_a	最小功率 r_a^{min} / kW	最大功率 r_a^{max} / kW	一般时长/ h
洗衣机	1.94	0:00-24:00	0	1.5	2

表 4 可削减设备用电参数

Table 4 Parameters for curtailable equipment

设备名称	日用量 E_a / kWh	调度周期 T_a	最小功率 r_a^{min} / kW	最大功率 r_a^{max} / kW
空调	1.2~3.5	0:00-24:00	0	4
娱乐设备	1.2~3.5	8:00-24:00	0	0.8
照明	2	19:00-24:00	0	0.8

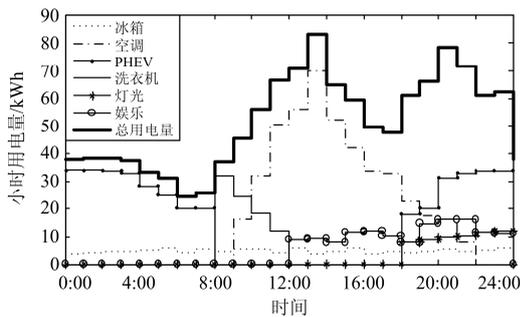


图 2 基准固定价格下的单一微网原始用电量曲线
Fig. 2 Original electricity consumption curve of single micro-grid under basic price

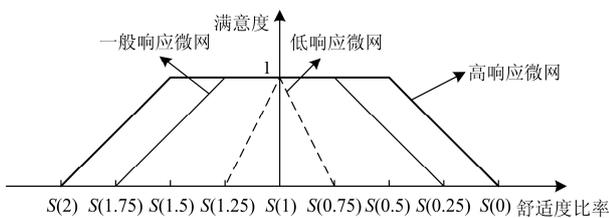


图 3 3 个微网的用户用电舒适度隶属曲线
Fig. 3 Comfort level membership function curves for 3 micro-grids

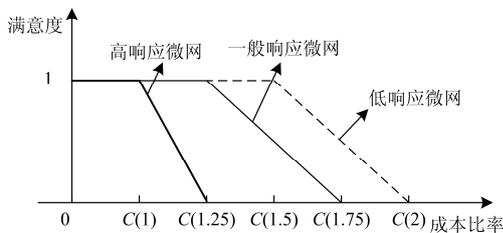


图 4 3 个微网的用户用电成本隶属曲线
Fig. 4 Cost membership function curves for 3 micro-grids

4.2 仿真结果和分析

在一定市场预测出清电价曲线下，达到 Stackelberg 均衡时，供电公司的最优电价策略结果如图 5 所示。下面分析该电价策略下供电公司及各微网行为与效益。

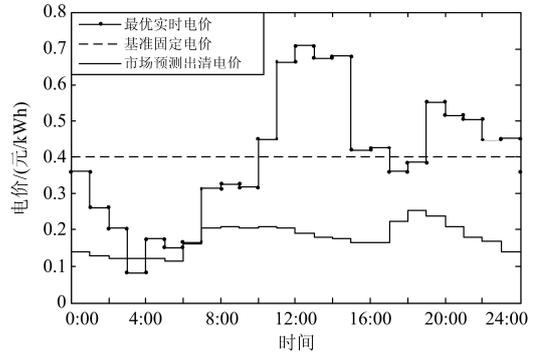


图 5 市场预测出清电价、基准固定电价及达到 Stackelberg 均衡时的最优实时电价

Fig. 5 Market clear price, basic price and optimal price under Stackelberg balance

1) 供电公司

表 5 给出了供电公司在不同电价下的日运行收益比。分析可得，相比于基准固定电价，虽然在最优实时电价策略下供电公司供电总量减少 13.67%，但同时其运行成本也得以降低 26.75%，最终使得总售电利润反而获得 20.22%增加。

表 5 供电公司在不同电价下日运行收益对比

Table 5 Comparison of daily revenues for power supply company under different electricity prices

电价场景	总供电量/ kWh	总运行成本/元	总购电成本/元	总成本/元	总售电利润/元
原基准固定电价	3734.64	641.38	676.45	1317.83	176.02
最优实时电价	3224.24	469.84	544.90	1014.74	220.64

2) 微网 1 — 高响应微网

图 6 为高响应微网最佳响应用电成本曲线。在最优电价策略下，该微网显著降低了大部分时段尤其是夜间峰时段用电成本，提高了夜间凌晨谷时段的用电成本。24 小时平均用电曲线对比显示，最优实时电价下，此灵活微网并入电网时的日均用电成本水平得以显著降低。图 7 为实时电价对应的高响应微网用电量曲线，由图可得该微网为降低用电费用而显著降低和调整自身用电总量，且在低谷电价时段通过可转移设备增加用电，如将电动汽车集中放到午夜后提高功率快速充电，而非整夜低功率慢充，并将洗衣时间移到晚间使用。在高峰电价时段通过减少夜间娱乐用电水平和灯照水平，最终实现用电成本大幅降低。

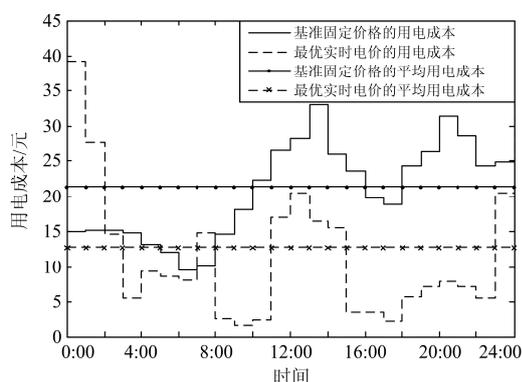


图 6 微网 1 — 高响应微网最佳响应用电成本曲线

Fig. 6 Micro-grid 1 — high response micro-grid's optimal cost curve

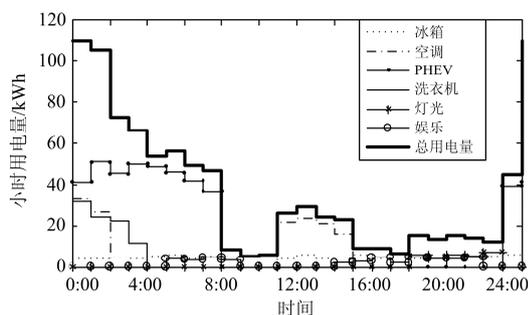


图 7 微网 1 — 高响应微网最佳响应用电量曲线

Fig. 7 Micro-grid 1 — high response micro-grid's optimal electricity consumption curve

3) 微网 2 — 一般响应微网

图 8 为一般响应微网最佳响应的用电成本曲线, 可以看出该微网晚间用电成本减少, 早晨成本增加。同样该微网在最优实时电价下的响应用电成本也低于固定价格用电成本, 但降低程度不及微网 1。图 9 给出一般响应微网在实时电价下的具体响应用电情况。由图可得, 凌晨用电大幅增加, 与高响应微网类似, 该微网的用户采取了电动汽车大功率凌晨充电策略, 且将洗衣时间改为凌晨, 并在夜间小幅减少娱乐用电量和照明用电量, 但对于日间空调这类大功率设备用电减少有限。

4) 微网 3 — 低响应微网

图 10 给出低响应微网的用电成本曲线, 表明该微网除在凌晨用电成本小幅降低外, 白天及夜晚高峰时段用电成本明显增加, 总体导致其用电成本相对于前两微网有所提升, 高于基准固定电价下的平均用电水平。图 11 为实时电价下其具体响应用电情况, 用电曲线与原曲线基本一致, 该微网对于

此价格响应不大。上述结果表明, 该微网的用户更关注于用电舒适度而弱化用电成本, 其并未在有利电价下作出大幅调整电量的响应。因此在供电公司综合多微网用户响应行为而制定的统一的分时响应电价下, 该微网用户响应程度最低, 其收获高用电舒适度的同时, 付出了更高用电成本。

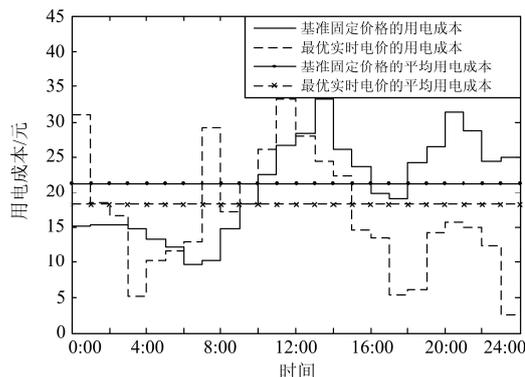


图 8 微网 2 — 一般响应微网最佳响应用电成本

Fig. 8 Micro-grid 2 — general response micro-grid's optimal cost curve

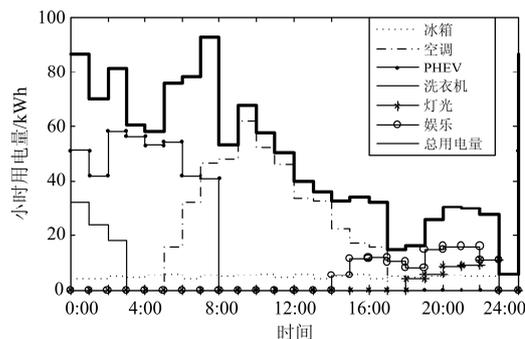


图 9 微网 2 — 一般响应微网最佳响应用电量曲线

Fig. 9 Micro-grid 2 — general response micro-grid's optimal electricity consumption curve

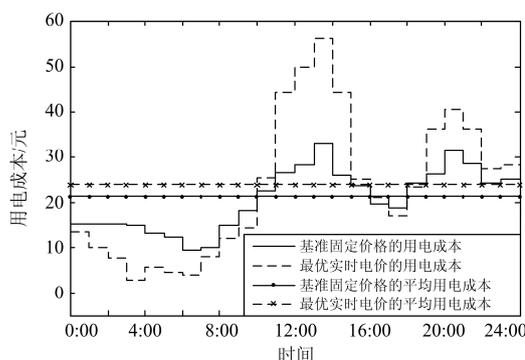


图 10 微网 3 — 低响应微网最佳响应用电成本曲线

Fig. 10 Micro-grid 3 — low response micro-grid's optimal cost curve

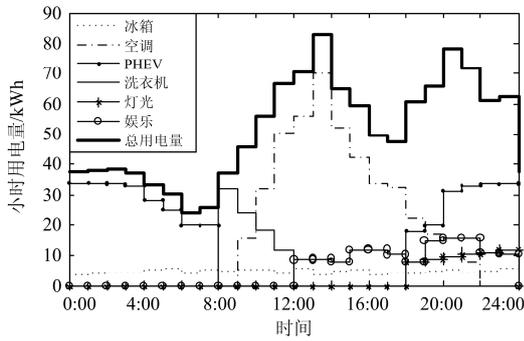


图 11 微网 3 — 低响应微网最佳响应用电量曲线

Fig. 11 Micro-grid 3 — low response micro-grid's optimal electricity consumption curve

5 结论

本文基于模糊最大满意度法，建立综合考虑微网用户用电成本及用电舒适度的微网效用模型，进而提出了基于 Stackelberg 博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化模型，通过基于遗传算法的逆向归纳法求解博弈均衡。算例仿真求取并分析了供电公司与 3 个不同响应程度微网的 Stackelberg 博弈模型均衡点及对应优化响应策略，得到以下主要结论：1) 所提基于 Stackelberg 博弈的价格响应模型能够有效考虑供电公司和微网双方各自效益，提高供电公司运营收益的同时，微网用户用电成本通过各自调整也不同程度变化；2) 灵活响应微网用户对于实施需求响应带给供电公司和本身的效益更好，更有利于供电公司制定特定响应电价；3) 如何考虑微网中分布式清洁能源及储能设备参与博弈过程与优化电网运行水平，以共同提高主网和微网运行经济性和环保性是笔者未来研究方向。

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.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] 黄宜平, 马晓轩. 微电网技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 320-328.
HUANG Yiping, MA Xiaoxuan. Research on microgrid technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 320-328.

[3] 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.

[4] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 基于序列运算的微网经济优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 227-237.
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of micro-grid based on sequence operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 227-237.

[5] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 172-180.
YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Day-ahead scheduling optimization for microgrid with battery life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.

[6] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.

[7] 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.

[8] 李媛, 罗琴, 宋依群, 等. 基于需求响应的居民分时阶梯电价档制定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 65-68, 74.
LI Yuan, LUO Qin, SONG Yiqun, et al. Study on tiered level determination of TOU & tiered pricing for residential electricity based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 65-68, 74.

[9] 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.

[10] 周建中, 李清清, 李超顺, 等. 基于博弈论的发电侧竞价市场均衡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 82-87.
ZHOU Jianzhong, LI Qingqing, LI Chaoshun, et al. Analysis on equilibrium characteristics of supply side bidding market based on game theory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 82-87.

[11] 蒋国华. 基于博弈模型的智能电网需求响应管理及定价策略[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
JIANG Guohua. Game theory model based on demand response management and pricing strategy in smart

- grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [12] SAAD W, HAN Z, POOR H V, et al. Game-theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(5): 86-105.
- [13] KASBEKAR G S, SARKAR S. Pricing games among interconnected microgrids[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, July 22-26, 2012: 1-8.
- [14] SAAD W, HAN Z, POOR H V. Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks[C] // IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), Kyoto, June 5-9, 2011: 1-5.
- [15] 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.
- [16] 陈星莺. 输电网开放模式电力市场交易及供电公司运营策略理论的研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
- CHEN Xingying. Research on the trading of the transmission opening-based market and the running strategy of the district power company[D]. Nanjing: Southeast University, 2002.
- [17] YANG P, TANG G, NEHORAI A. A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 884-892.
- [18] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 40-47.
- HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user profile considering user's satisfaction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 40-47.
- [19] 马瑞, 颜宏文, 贺仁睦, 等. 多目标优化分段竞标电力市场的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 54-58.
- MA Rui, YAN Hongwen, HE Renmu, et al. Research on multi-objective optimal block bidding model for electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 54-58.
- [20] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 75-82.
- ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun, et al. Day-ahead dispatching in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 75-82.
- [21] 李光久. 博弈论基础教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [22] FERC. Electric power markets: midwest (MISO) - MISO daily report: Midwest February 2012[EB/OL]. <http://www.ferc.gov/market-oversight/mkt-electric/midwest/2012/02-2012-elec-miso-dly.pdf>, 2012-02-04.
- [23] MENG F, ZENG X. An optimal real-time pricing for demand-side management: a Stackelberg game and genetic algorithm approach[C] // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Beijing, July 6-11, 2014: 1703-1710.
- [24] LI N, CHEN L, LOW S H. Optimal demand response based on utility maximization in power networks[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, July 24-29, 2011: 1-8.
- [25] Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency. Energy consumption of major household appliances shipped in Canada (trends for 1990 - 2003)[R]. Canada: Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency, 2005.

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-07-13

作者简介:

李 暄(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

马 瑞(1971-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、低碳电力和电力大数据等; E-mail: marui818@126.com

罗 阳(1989-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 葛艳娜)