

用户侧有限理性下基于主从博弈与电热需求响应的 综合能源微网优化运行

帅轩越,王秀丽,吴 雄

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:随着综合能源微网内各利益体竞争现象日益显著,研究多利益体背景下的微网优化运行具有重要意义。首先,建立了以微网运营商为领导者、电动汽车用户为跟随者的主从博弈模型,综合考虑分时电价、电热需求响应、电动汽车以及微网运营商运行模式等构建了微网框架。其次,针对微网运营商工作于传统“以热定电”模式存在的缺陷,分析了“以电定热”模式的优势,进而提出了2种运行模式下微网运营商的收益模型。然后,综合考虑用户侧电制热设备、电动汽车以及电热需求响应等,提出了用户侧有限理性下的购能选择模型,在此基础上构建了用户侧收益模型。将主从博弈框架嵌入所提出的模型,并证明了Stackelberg均衡解的存在性与唯一性。最后,利用遗传算法与CPLEX求解器进行了仿真分析。结果表明:在用户侧有限理性的背景下,“以电定热”模式能协同提高微网运营商与用户侧的收益,同时所提出的购能选择模型有效遏制了微网运营商侧“定价垄断”的现象。

关键词:综合能源微网;主从博弈;有限理性;电动汽车;需求响应;优化运行

中图分类号:TM 732;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109017

0 引言

传统的能源系统中多种能源通常相互独立,各类能源之间无法相互耦合互补,导致能源利用率低,综合能源微网能将微网内各类能源统一协调,为这一问题提供了有效的解决方案^[1-2]。微网技术能够实现分布式可再生能源灵活并网,同时保证电力系统安全、可靠、经济运行^[3]。随着综合能源微网中多利益体竞争现象的日益凸显,传统的集中式优化难以反映不同利益体间的博弈关系^[4],如售电商与购电方之间的定价问题——主从博弈^[5]、不同园区间购电竞争的问题——经典静态非合作博弈^[6]、处于能源共享下微电网群之间的利益分配问题——合作博弈^[7]以及用户群与售电公司之间交易匹配的动态演化问题——演化博弈^[8]等。博弈论^[9]的引入能有效解决微网内多利益体竞争的问题,其中主从博弈^[10]作为非合作博弈中的动态博弈,在解决参与者决策存在先后顺序、地位不一致的问题方面得到了广泛应用。如文献[5]中微网运营商MO(Microgrid Operator)作为领导层需先制定电价决策,用户才能根据MO制定的电价做出回应。

迄今为止,已有诸多学者针对主从博弈框架下的综合能源微网优化运行问题进行了研究。文献[5]构建了社区运营商-产消者群的主从博弈模型,为社区运营商与产消者群的收益最大化提供了参考

方案。但该文献中未考虑储能装置对交易的影响,同时供热侧未参与博弈。文献[11]考虑综合能源销售商电价、热价均可变的情景,建立了综合能源系统分布式协调优化模型,但尚未考虑储能装置。文献[12]引入储能运营商,为能量枢纽运营商与用户群提供储能服务,建立了基于能量枢纽的多能互补微网系统的多主体主从博弈模型。文献[13]计及储能装置的调度控制,对电网运营商与发电商之间的主从博弈决策进行了研究。文献[14]考虑下层用户中电动汽车参与博弈决策,通过电动汽车充放电进一步优化了用户的决策。但以上文献中供电侧的热电联产装置均工作于“以热定电”模式,显然不能灵活地适用于所有场景。另外,针对有限理性背景下的主从博弈决策研究才刚刚起步。此外,目前已有较多关于燃气轮机的运行模式分析、电动汽车参与调节负荷以及有限理性策略的研究:文献[15]对燃气轮机冷热电联供的运行方式进行了优化选择,解决了冷热电供需不平衡的问题;文献[16]建立了智能小区代理商-电动汽车车主的主从博弈模型,为电动汽车参与需求响应提供参考方案;文献[17]针对发电商处于有限理性决策背景下的竞价决策问题,对有限理性决策进行了较为深入的研究。

总之,目前研究仍存在以下不足:①MO侧热电联产机组工作于传统的“以热定电”模式,运行模式的灵活性有待提高;②现有文献大多以完全理性的框架对用户侧进行建模,但是用户通常只具备有限的信息获取与决策能力,无法达到理性的决策模式,因此有关有限理性的研究有待展开;③大多研究中未考虑储能装置与电动汽车;④用户侧模型通常设

收稿日期:2020-12-25;修回日期:2021-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807149)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807149)

定为单方面被动接受运营商的供电与供热,仅有需求响应或储能这一类主动调节负荷的方式,对用户侧供能选择的灵活性考虑不足,事实上用户也能通过电制热设备灵活产热。

在目前研究工作的基础上,本文综合考虑MO运行模式、用户侧电热需求响应、用户侧电制热设备、用户侧电动汽车参与负荷调节等,提出用户侧有限理性下基于主从博弈与电热需求响应的综合能源微网优化模型,并通过实例分析了MO工作于“以热定电”与“以电定热”这2种模式下对运营商与电动汽车用户侧策略、收益的影响。

1 微网运行框架

假定综合能源微网利益方主要由MO与电动汽车用户群EVUs(Electric Vehicle Users)组成,具体场景见图1。

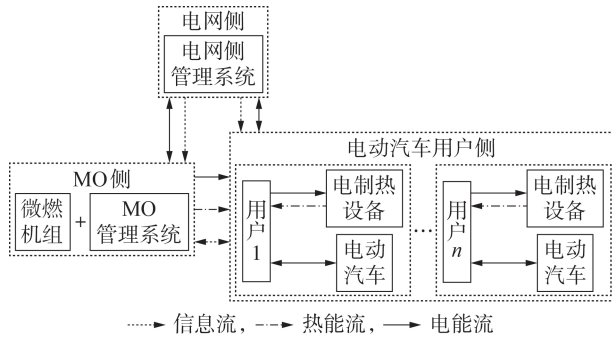


图1 综合能源微网运行框架图

Fig.1 Operation framework diagram of integrated energy microgrid

电动汽车用户侧主要由用户管理系统、用户负荷、电制热设备以及电动汽车组成。用户管理系统为用户提供MO侧电、热价与电网侧电价等信息,负责用户购电与购热方案的规划,与MO管理系统互联;用户负荷主要由电、热负荷组成,为了防止MO侧出现“定价垄断”,电负荷由电网与MO供应,热负荷由MO与电制热设备供应,用户通过制定优化策略对供能来源进行选择,并能调节一天内用电与用热的时间;电制热设备能将电能转换为热能,当MO售热价超过一定阈值时,用户通过购买电能进行电制热转换;电动汽车不仅是用户出行的交通工具,同时也参与用户电能平衡的负荷调整,灵活调整用户一天内电负荷分布。

MO侧主要由MO管理系统与微燃机组组成。MO管理系统通过用户侧管理系统提供的购电量与购热量,制定微网售电价与购电价;微燃机组通过燃烧天然气,为用户侧提供电能与热能。MO作为电网侧与用户侧的中间商,在赚取电能交易差价的同时,也面临着用户选择功能方、用户侧需求响应以及供需不平衡的挑战。因此,传统的“以热定电”模式对

MO而言可能不是最优策略,MO可依据次日供电与供热的关系,对“以热定电”与“以电定热”2种运行模式进行选择,从而达到收益最大化。

2 MO侧模型

2.1 定价模型

设一天被分为 T 个时段,电网侧所提供的次日电网电价采用分时电价^[18],购电价与售电价向量可分别表示为:

$$\lambda_{gb} = [\lambda_{gb}^1, \lambda_{gb}^2, \dots, \lambda_{gb}^k, \dots, \lambda_{gb}^T] \quad (1)$$

$$\lambda_{gs} = [\lambda_{gs}^1, \lambda_{gs}^2, \dots, \lambda_{gs}^k, \dots, \lambda_{gs}^T] \quad (2)$$

式中: λ_{gb}^k 、 λ_{gs}^k 分别为电网所提供的购电价和售电价,且 $k \in \{1, 2, \dots, T\}$,表示一天内第 k 个时段,后同。

设MO所提供的日前购电价、售电价以及售热价向量分别表示为:

$$\lambda_{mb} = [\lambda_{mb}^1, \lambda_{mb}^2, \dots, \lambda_{mb}^k, \dots, \lambda_{mb}^T] \quad (3)$$

$$\lambda_{ms} = [\lambda_{ms}^1, \lambda_{ms}^2, \dots, \lambda_{ms}^k, \dots, \lambda_{ms}^T] \quad (4)$$

$$\lambda_{mh} = [\lambda_{mh}^1, \lambda_{mh}^2, \dots, \lambda_{mh}^k, \dots, \lambda_{mh}^T] \quad (5)$$

式中: λ_{mb}^k 、 λ_{ms}^k 和 λ_{mh}^k 分别为MO所提供的购电价、售电价和售热价。

由于用户侧未考虑光伏装置,一天内用户侧净电负荷均为正,即用户始终扮演购电方的角色,则MO的电价优化变量仅为微网售电价,即:

$$\lambda_{mb} = \lambda_{gb} \quad (6)$$

为了保证MO定价的合理性,对于售电价与售热价分别约束如下:

$$\lambda_{gb}^k \leq \lambda_{ms}^k \leq \lambda_{gs}^k \quad (7)$$

$$\lambda_{mh}^{\min} \leq \lambda_{mh}^k \leq \lambda_{mh}^{\max} \quad (8)$$

式中: $\lambda_{mh}^{\max}$ 、 $\lambda_{mh}^{\min}$ 分别为MO售热价的上限和下限。

2.2 收益模型

MO主要通过为EVUs供热、制定售电价获取收益,但存在以下4种降低收益的风险:①当对EVUs供电不足时,需从电网侧购电;②当对EVUs供热不足时,需承担EVUs舒适度降低的惩罚费用;③当产生的电能过剩时,需出售给电网侧;④当产生的热能过剩时,需承担弃热成本。MO收益结构分析如图2所示。

综上,MO一天内第 k 个时段的收益可表示为:

$$E_{MO}^k = E_{MO,h}^k + E_{MO,e}^k + E_{EG,e}^k - \Delta E_{MO,h}^k - E_{MT}^k \quad (9)$$

$$E_{MO,h}^k = \lambda_{mh}^k L_{MO,h}^k \quad (10)$$

$$E_{MO,e}^k = \lambda_{ms}^k L_{MO,e}^k \quad (11)$$

$$E_{EG,e}^k = -\lambda_{gs}^k \max(L_{MO,e}^k - P_{MT,e}^k, 0) -$$

$$\lambda_{gb}^k \min(L_{MO,e}^k - P_{MT,e}^k, 0) \quad (12)$$

$$\Delta E_{MO,h}^k = \lambda_p \max(L_{MO,h}^k - P_{MT,h}^k, 0) \quad (13)$$

$$E_{MT}^k = \frac{\lambda_{gs} P_{MT,e}^k}{Q_L \eta_{MT,e}} \quad (14)$$

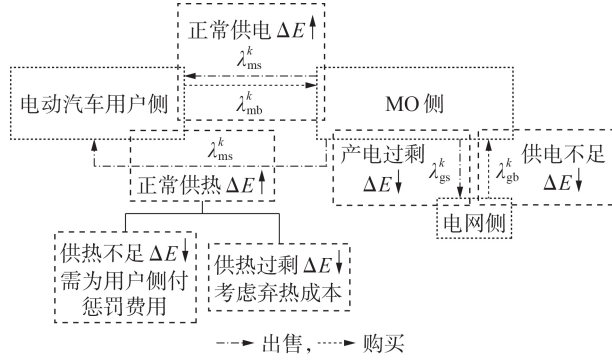


图2 MO收益结构分析图

Fig.2 Revenue structure analysis diagram of MO

式中： $E_{MO,h}^k$ 为MO正常供热的收益； $E_{MO,e}^k$ 为MO正常供电的收益； $E_{EG,e}^k$ 为MO因供电不足或产电过剩与电网侧电力交易的收益； $\Delta E_{MO,h}^k$ 为MO供热不足需向用户侧支付的惩罚费用； E_{MT}^k 为微燃机组的产能成本； $L_{MO,e}^k$ 、 $L_{MO,h}^k$ 分别为MO对EVUs的供电量和供热热量； $P_{MT,e}^k$ 、 $P_{MT,h}^k$ 分别为MO的产电量和产热量； λ_p 为单位热能的惩罚费用； λ_{gas} 为天然气单价； Q_L 为天然气低热值； $\eta_{MT,e}$ 为微燃机组的产电效率。

微燃机组通过燃烧天然气产生电能的同时，也能将烟气通过溴冷机冷却进行制热，则微燃机组一天内第 k 个时段的产热量可表示为：

$$P_{MT,h}^k = \frac{1 - \eta_{MT,e} - \eta_{MT,loss}}{\eta_{MT,e}} P_{MT,e}^k \quad (15)$$

式中： $\eta_{MT,loss}$ 为微燃机组的散热效率。

2.3 运行模式选择

当EVUs电、热负荷较小时，采用传统的“以热定电”模式将造成大量电能盈余，MO与电网侧进行电力交易时由于“价格套利”收益严重亏损；当EVUs电热负荷比较大时，采用“以热定电”模式可能会使MO从电网侧大量购入电能，导致收益亏损。若此时供热不足的惩罚费用相对较少，MO可选择采用“以电定热”的运行模式以提高收益。因此，为使MO实现收益最大化，可灵活选择运行模式。

在“以热定电”模式下，应满足：

$$\Delta E_{MO,h}^k = 0, P_{MT,h}^k = L_{MO,h}^k \quad (16)$$

在“以电定热”模式下，应满足：

$$\Delta E_{EG,e}^k = 0, P_{MT,e}^k = L_{MO,e}^k \quad (17)$$

MO综合考虑一天内EVUs的电热负荷比、微燃机组热电比、供热不足惩罚费用、弃热以及电网侧“价格套利”等因素，选择最佳运行模式。

3 电动汽车用户聚合商侧模型

3.1 负荷模型

EVUs的负荷主要包括电负荷与热负荷，设微网内共有 m 个电动汽车用户，对于用户 i 一天内电负荷与热负荷向量可分别表示为：

$$L_{i,e} = [L_{i,e}^1, L_{i,e}^2, \dots, L_{i,e}^k, \dots, L_{i,e}^T] \quad (18)$$

$$L_{i,h} = [L_{i,h}^1, L_{i,h}^2, \dots, L_{i,h}^k, \dots, L_{i,h}^T] \quad (19)$$

式中： $L_{i,e}$ 、 $L_{i,h}$ 分别为用户 i 的电负荷和热负荷。

综合考虑EVUs的电、热负荷需求响应，设 $\Delta L_{i,e} = [\Delta L_{i,e}^1, \Delta L_{i,e}^2, \dots, \Delta L_{i,e}^k, \dots, \Delta L_{i,e}^T]$ 、 $\Delta L_{i,h} = [\Delta L_{i,h}^1, \Delta L_{i,h}^2, \dots, \Delta L_{i,h}^k, \dots, \Delta L_{i,h}^T]$ 分别为用户 i 一天内电负荷与热负荷调整量所组成的向量，则调整后的电负荷与热负荷向量分别定义为：

$$\bar{L}_{i,e} = L_{i,e} + \Delta L_{i,e} \quad (20)$$

$$\bar{L}_{i,h} = L_{i,h} + \Delta L_{i,h} \quad (21)$$

设电、热负荷中任一时段最大允许调整比例分别为 ε_e 与 ε_h ，调整总量占比分别为 γ_e 与 γ_h ，则在一天内第 k 个时段对于任一用户 i （ $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ）而言，应满足如下约束：

$$\left| \frac{\Delta L_{i,e}^k}{L_{i,e}^k} \right| \leq \varepsilon_e, \left| \frac{\Delta L_{i,h}^k}{L_{i,h}^k} \right| \leq \varepsilon_h \quad (22)$$

$$\frac{\sum_{k=1}^T |\Delta L_{i,e}^k|}{\sum_{k=1}^T L_{i,e}^k} = \gamma_e, \frac{\sum_{k=1}^T |\Delta L_{i,h}^k|}{\sum_{k=1}^T L_{i,h}^k} = \gamma_h \quad (23)$$

3.2 电动汽车参与负荷调整模型

与储能电池类似，EVUs也能利用电动汽车电池在非行驶时段参与调整用户电负荷。采用文献[17]中集中式充电站的思路，每个EVUs的电动汽车均通过公用充电站进行充放电，可共享储备的电能。假定充电桩数目足够多，即不考虑EVUs等候充电服务的时间。设充电站初始容量为 C_{ES}^1 ，则在一天内第 $k+1$ 个时段的容量可表示为：

$$C_{ES}^{k+1} = C_{ES}^k + \sum_{j=1}^n P_{j,d}^k \eta_d^{ES} \Delta t \quad C_{ES}^{\min} \leq C_{ES}^k \leq C_{ES}^{\max} \quad (24)$$

式中： n 为微网内电动汽车的数量； $P_{j,d}^k$ 为电动汽车 j 的充放电功率，取值为正、负时分别表示放电和充电； η_d^{ES} 为充电站的充放电效率； $C_{ES}^{\max}$ 、 $C_{ES}^{\min}$ 分别为微网内充电站的上限和下限； Δt 为时间间隔。

考虑每个EVUs仅能在非行驶时段参与负荷调整，需满足如下约束：

$$P_{j,d}^k = 0 \quad k \notin \varphi; j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (25)$$

式中： φ 为电动汽车允许充放电时段，本文取 $\varphi = \{00:00-08:00, 18:00-24:00\}$ 。

为保证充电站的可靠性，设置如下约束：

$$C_{ES}^k = C_{ES}^{k+T} \quad (26)$$

并对电动汽车充放电功率限制如下：

$$-P_{j,c}^{\max} \leq P_{j,d}^k \leq P_{j,d}^{\max} \quad j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (27)$$

式中： $P_{j,d}^{\max}$ 、 $P_{j,c}^{\max}$ 分别为电动汽车 j 放电功率和充电功率允许的最大值。

3.3 供能选择模型

当参与者处于“完全理性”时,参与者将选择对参与者有利的策略;而当参与者处于“有限理性”时,参与者将有一定概率选择有利的策略,其概率随着有利程度增加而增加。本文认为电动汽车用户处于“有限理性”下,即其具有一定概率选择最优策略。

对于EVUs的电负荷,认为其主要来源于MO与电网,提出利用降价比反映选择概率,即EVUs在第 k 个时段选择MO和电网作为供电方的概率 $p_{MO,e}^k$ 和 $p_{EG,e}^k$ 分别为:

$$p_{MO,e}^k = (\lambda_{gs}^k - \lambda_{ms}^k) / (\lambda_{gs}^k - \lambda_{gb}^k) \quad (28)$$

$$p_{EG,e}^k = (\lambda_{ms}^k - \lambda_{gb}^k) / (\lambda_{gs}^k - \lambda_{gb}^k) \quad (29)$$

对于EVUs的热负荷,传统的微网运行模式认为EVUs仅由MO供热。假定热负荷不仅来源于MO,也可通过电制热设备制取,进而提出用户供热选择模型。

由于用户对热价的接受存在心理阈值,设用户的热价阈值 λ_{thr} 为:

$$\lambda_{thr} = \lambda_{mh}^{\min} + \mu(\lambda_{mh}^{\max} - \lambda_{mh}^{\min}) \quad (30)$$

式中: μ 为热价阈值参数,其决定阈值的大小。

当售热价超过该阈值时,用户将不再购热;当低于该阈值时,MO制定的热价越低,选取MO作为供热来源的概率越大。基于此,提出用户供热来源选择模型。设一天内第 k 个时段选择MO和电制热设备作为供热来源的概率 $p_{MO,h}^k$ 和 $p_{s,h}^k$ 分别为:

$$p_{MO,h}^k = \frac{\max(\lambda_{thr} - \lambda_{mh}^k, 0)}{\lambda_{thr} - \lambda_{mh}^{\min}} \quad (31)$$

$$p_{s,h}^k = 1 - p_{MO,h}^k \quad (32)$$

3.4 收益模型

综上,用户 i 在一天内第 k 个时段的收益可以表示为:

$$E_i^k = -E_{i,h}^k - E_{i,e}^k - E_{i,s}^k - E_{i,EG}^k + E_{i,eu}^k + E_{i,hu}^k - E_{i,loss}^k \quad (33)$$

$$E_{i,h}^k = \lambda_{mh}^k p_{MO,h}^k \bar{L}_{i,e}^k \quad (34)$$

$$E_{i,e}^k = \lambda_{ms}^k p_{MO,e}^k \bar{L}_{i,e}^k \quad (35)$$

$$E_{i,s}^k = \lambda_{gs}^k \frac{p_{s,e}^k}{\eta_h} \bar{L}_{i,h}^k \quad (36)$$

$$E_{i,EG}^k = \lambda_{gs}^k p_{EG,e}^k \bar{L}_{i,e}^k \quad (37)$$

$$E_{i,eu}^k = a_{i,e}(\bar{L}_{i,e}^k + P_{i,d}^k)^2 + b_{i,e}(\bar{L}_{i,e}^k + P_{i,d}^k) + c_{i,e} \quad (38)$$

$$P_{i,d}^k = \sum_{j=1}^{q_i} P_{j,d}^k \quad (39)$$

$$E_{i,hu}^k = a_{i,h}(\bar{L}_{i,h}^k)^2 + b_{i,h}\bar{L}_{i,h}^k + c_{i,h} \quad (40)$$

$$E_{i,loss}^k = \lambda_c |P_{i,d}^k| \quad (41)$$

式中: $E_{i,h}^k$ 、 $E_{i,e}^k$ 分别为用户 i 由MO供热和供电的成本; $E_{i,s}^k$ 、 $E_{i,EG}^k$ 分别为用户 i 电制热、由电网购电的成本; $E_{i,eu}^k$ 、 $E_{i,hu}^k$ 和 $E_{i,loss}^k$ 分别为用户 i 的用电效用、用热效用和电动汽车电能损耗惩罚费用; η_h 为电制热设

备的效率; q_i 为用户 i 配有的电动汽车数量; λ_c 为单位电能的惩罚费用; $a_{i,e}$ 、 $b_{i,e}$ 和 $c_{i,e}$ 为用户 i 用电效用函数的系数; $a_{i,h}$ 、 $b_{i,h}$ 和 $c_{i,h}$ 为用户 i 用热效用函数的系数; $\bar{L}_{i,e}^k$ 、 $\bar{L}_{i,h}^k$ 分别为用户 i 调整后的电负荷、热负荷。

根据MO与EVUs供需关系,应满足:

$$p_{MO,e}^k \sum_{i=1}^m \bar{L}_{i,e}^k = L_{MO,e}^k \quad (42)$$

$$p_{MO,h}^k \sum_{i=1}^m \bar{L}_{i,h}^k = L_{MO,h}^k \quad (43)$$

4 主从博弈框架与求解流程

4.1 博弈要素

MO先制定售电价与售热价,EVUs接受电价通过概率选择模型优化电热负荷分布、电动汽车充放电功率以及电制热设备出力,并反馈用电量与用热量至MO,MO进一步优化定价决策。由于MO与EVUs的决策存在先后顺序,形成主从博弈的框架,即MO为领导者,EVUs为跟随者。该博弈 G 可表示为:

$$G = \left\{ \text{MO} \cup \text{EVUs}; \lambda_{ms}; \lambda_{mh}; \Delta L_{i,e}; \Delta L_{i,h}; P_{i,d}; \sum_{k=1}^T E_{MO}^k; \sum_{k=1}^T E_i^k \right\} \quad (44)$$

4.2 博弈均衡存在性与唯一性证明

Stackelberg博弈均衡解的存在性与唯一性证明分别见附录A与附录B。

4.3 求解流程

对于领导者MO:求解最优售电价与售热价。

$$\begin{cases} \max \sum_{k=1}^T E_{MO}^k(\lambda_{ms}, \lambda_{mh}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \lambda_{gb}^k \leq \lambda_{ms}^k \leq \lambda_{gs}^k \\ \lambda_{mh}^{\min} \leq \lambda_{mh}^k \leq \lambda_{mh}^{\max} \end{cases} \quad k \in \{1, 2, \dots, T\} \end{cases} \quad (45)$$

对于跟随者EVUs:求解最优电负荷分布、热负荷分布以及电动汽车充放电功率。

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^m E_i^k(\Delta L_{i,e}; \Delta L_{i,h}; P_{i,d}) \quad i \in \{1, 2, \dots, m\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^T |\Delta L_{i,e}^k|}{\sum_{k=1}^T L_{i,e}^k} = \gamma_e, \quad \frac{\sum_{k=1}^T |\Delta L_{i,h}^k|}{\sum_{k=1}^T L_{i,h}^k} = \gamma_h \\ \left| \frac{\Delta L_{i,e}^k}{L_{i,e}^k} \right| \leq \varepsilon_e, \quad \left| \frac{\Delta L_{i,h}^k}{L_{i,h}^k} \right| \leq \varepsilon_h \\ C_{ES}^{\min} \leq C_{ES}^k \leq C_{ES}^{\max} \quad k \in \{1, 2, \dots, T\} \\ \begin{cases} -P_{j,c}^{\max} \leq P_{j,d}^k \leq P_{j,d}^{\max} \\ P_{j,d}^k = 0 \end{cases} \quad j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad k \notin \varphi \end{cases} \end{cases} \quad (46)$$

参考文献[11]中的求解思路,利用遗传算法^[19]更新上层策略,下层采用CPLEX求解器直接求解,

模型求解流程如图3所示。

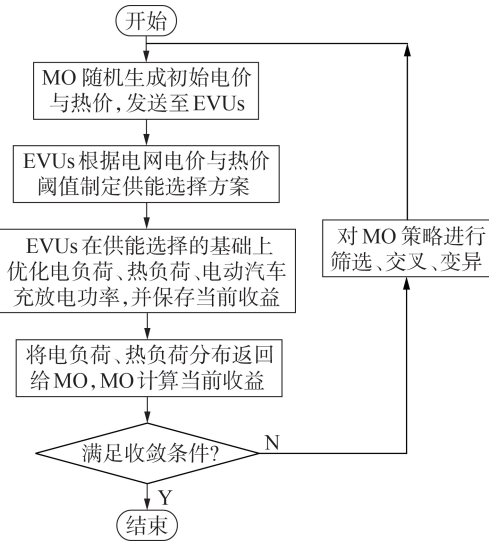


图3 模型求解流程图

Fig.3 Flowchart of model solving

5 算例分析

以含有5个EVUs的社区为例,对所提出的模型进行仿真分析。设一天分为24个时段,MO配有一台微燃机组与一台溴冷机,每个EVUs装配1台电制热设备与2辆电动汽车,假定该微网内每个EVUs的电动汽车型号与参数都相同。电网分时电价、微燃机组以及EVUs的电负荷和热负荷相关参数参考文献[5],电动汽车充放电功率极限、初始容量以及容量上下限等参数参考文献[14]。EVUs初始电热负荷分布和电网分时电价、热价上下限分别如附录C图C1和图C2所示,其余参数如附录D表D1所示。设MO工作于“以热定电”模式为模式1,工作于“以电定热”模式为模式2。为了研究简便,将电动汽车用户等效为一个聚合体,2种模式下MO与EVUs收益、MO售电价以及售热价优化结果如图4所示。

由图4(a)可知,对于传统“以热定电”模式,MO运行于该模式下实现了MO与EVUs收益的协同提高。对于MO,由图4(b)可知模式1下其在与EVUs电力交易、微燃机组发电的过程中,需从电网侧购入大量电能,电力交易方面亏损严重;当选择模式2时,会存在弃热与供热不足两方面的收益亏损,但相对模式1亏损较少。同时结合图4(c)可知,MO在模式2下的售热价优化值高于模式1,提高了MO的热力交易收益。对于EVUs,由图4(b)可知MO在模式2下优化后的电价比模式1低,进一步吸引了EVUs与MO的电力交易,即使与MO热力交易的积极性减弱,但EVUs整体收益得到提高。综上,“以电定热”模式实现了MO与EVUs的双赢。另外,相比于单方面被动接受MO的供能,所提出的用户侧供能选择

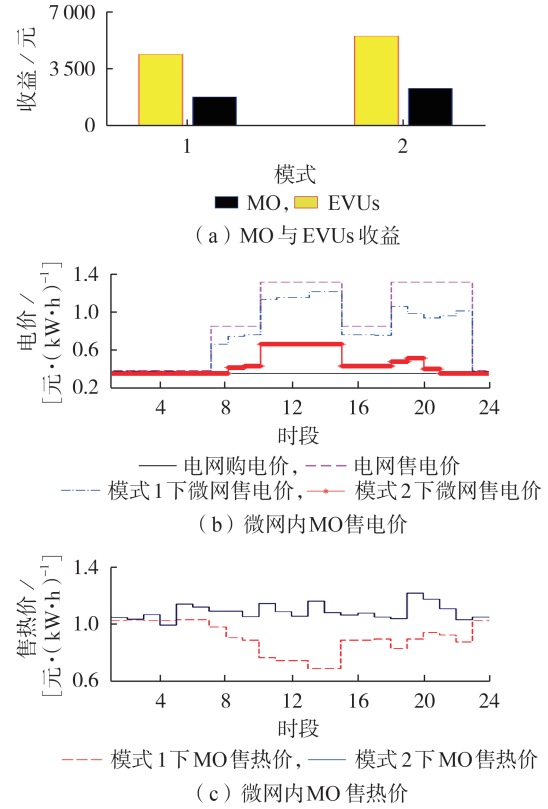
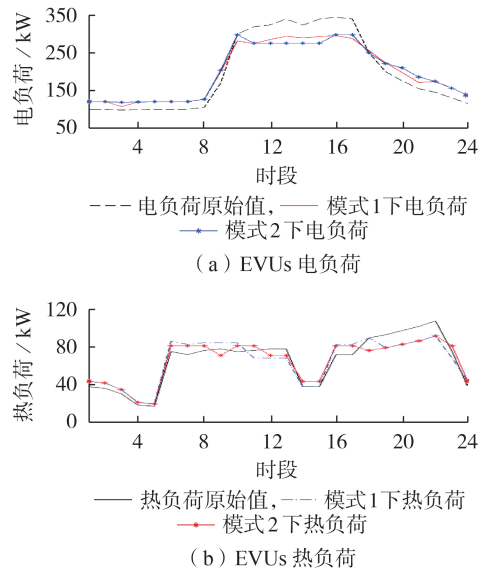


图4 2种模式下MO与EVUs收益、MO售电价以及售热价
Fig.4 Revenues of MO and EVUs, electricity price and heat price of MO under two modes

模型提高了用户侧选择能源的灵活性,有效防止MO侧出现定价过高的现象。

2种模式下微网内EVUs电、热负荷优化结果以及社区内充电站一天内容量变化如图5所示。由图5分析可知,2种模式下用户侧电、热负荷的改变均实现了“削峰填谷”的作用,提高了电网侧运行的可靠性。相比与模式1,模式2下在时段1—7微网内电动汽车充电的积极性更高,这是因为模式2下MO电价优化值较低,用户与MO之间的电力交易量增



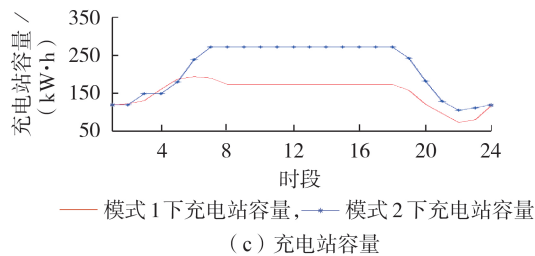


图5 2种模式下微网内EVUs电、热负荷优化结果以及社区内充电站一天内容量

Fig.5 Optimal results of electricity, heat load of EVUs in microgrid and daily capacity of charging station in community under two modes

加,用户希望通过储能装置提高与MO之间的电力交易收益。

模式2下MO在一天内对用户侧供热不足与弃热功率曲线如图6所示。

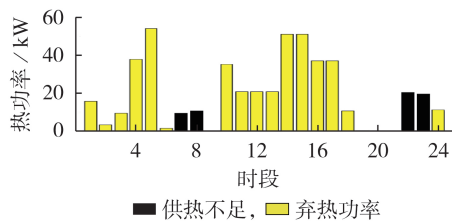


图6 MO供热不足与弃热功率的曲线

Fig.6 Curves of insufficient heat supply and abandoned heat power of MO

由图6分析可知,MO在一天内大多时段处于弃热状态,供热不足仅在时段6—8、21—23出现,这是因为供热不足的单位功率惩罚费用较高,有效维持了微网内对用户供热的可靠性。

6 结论与展望

本文所得主要结论如下:①基于用户有限理性的情景,相比于传统“以热定电”模式,所提出的“以电定热”模式显著减少了与电网侧电力交易的亏损,并能实现运营商与用户侧收益的协同提高;②在考虑用户侧电动汽车参与调节负荷的基础上,提出用户侧有限理性下供能选择模型,用户不再被动单方面接受运营商的供能,从而有效防止MO出现“定价垄断”的现象;④所提出的模型能够兼顾MO与用户侧利益,同时也能发挥电动汽车参与调度与电、热负荷调整的潜能,进一步改善用户负荷特性;⑤采用遗传算法与CPLEX求解器组合求解,保护了MO与用户侧数据的隐私。

之后的研究工作需进一步探究MO在一天内于2种模式之间灵活切换的情景下,电动汽车用户的应对方案。同时本文未考虑电网侧及热网侧的物理网架,这将是下一步研究的内容。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

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] 马艺玮,杨苹,王月武,等.微电网典型特征及关键技术[J].电力系统自动化,2015,39(8):168-175.
MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.
- [3] 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):10-14,23.
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, 23.
- [4] 卢明湘.构建基于网售分开的竞争性电力市场研究[J].产业经济研究,2004(1):41-48.
LU Mingxiang. Research on the construction of competitive electricity market based on the separation of network and sales[J]. Industrial Economy Research, 2004(1): 41-48.
- [5] 马丽,刘念,张建华,等.基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J].电网技术,2016,40(12):3655-3662.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Distributed energy management of community energy internet based on leader-follower game[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3655-3662.
- [6] 吴福保,刘晓峰,孙谊娟,等.基于冷热电联供的多园区博弈优化策略[J].电力系统自动化,2018,42(13):68-75.
WU Fubao, LIU Xiaofeng, SUN Yiqian, et al. Game optimization strategy for multiple parks based on combined cooling heating and power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68-75.
- [7] 刘念,赵璟,王杰,等.基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J].电工技术学报,2018,33(8):1903-1910.
LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903-1910.
- [8] 孙云涛,宋依群,姚良忠,等.售电市场环境电力用户选择售电公司行为研究[J].电网技术,2018,42(4):1124-1131.
SUN Yuntao, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Study on power consumers' choices of electricity retailers in electricity selling market[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1124-1131.
- [9] 卢强,陈来军,梅生伟,等.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, et al. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [10] WEI W, LIU F, MEI S, et al. Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1364-1374.
- [11] 王海洋,李珂,张承慧,等.基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5435-5445.
WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5435-5445.
- [12] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3134.
- GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun, et al. Optimized operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3134.
- [13] 康书硕, 李洪强, 蔡博, 等. 冷热电联供系统中“以热定电”与“以电定热”的分析研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(增刊2): 255-259, 265.
- KANG Shushuo, LI Hongqiang, CAI Bo, et al. Analysis and research on “determining electricity by heat” and “determining heat by electricity” in CCHP system[J]. Architecture Science, 2012, 28(Supplement 2): 255-259, 265.
- [14] 魏鞞, 陈玥, 刘锋, 等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 939-945.
- WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 939-945.
- [15] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
- WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [16] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [17] 段睿钦. 智能电网中居民区电动汽车充电控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- DUAN Ruiqin. Research on charging control strategy of residential electric vehicles in smart grid[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [18] 王守相, 张善涛, 王凯, 等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 125-132.
- WANG Shouxiang, ZHANG Shantao, WANG Kai, et al. Multi objective optimal operation of distributed energy storage considering customer demand response under TOU price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 125-132.
- [19] 夏永洪, 吴虹剑, 辛建波, 等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 63-69.
- XIA Yonghong, WU Hongjian, XIN Jianbo, et al. Evaluation of economic operation for microgrid with complementary DGs and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 63-69.
- [20] YU M, HONG S H. A real-time demand-response algorithm for smart grids: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 879-888.

作者简介:



帅轩越

帅轩越(1998—),男,陕西扶风人,硕士研究生,主要研究方向为微电网优化运行(E-mail: sxysxy@stu.xjtu.edu.cn);

王秀丽(1961—),女,陕西西安人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统规划与电力市场等(E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn);

吴雄(1986—),男,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为微电网能量管理与电力市场等(E-mail: wuxiong@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Optimal operation of integrated energy microgrid based on leader-follower game and electricity and heat demand response under user-side limited rationality

SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the increasing competition of various agents in integrated energy microgrid, it is of the great significance to study the optimal operation of microgrid under multi-stakeholders. First of all, a leader-follower game model is presented, in which the microgrid operators act as leaders, while electric vehicle users act as followers. A microgrid framework considering time-of-use electricity prices, electricity and heat demand response, electric vehicles and the operation mode of microgrid operator, is constructed. Secondly, the “power determined by heat” mode is proposed, which can overcome the shortcomings of the traditional “heat determined by power” mode. At the same time, the profit model of microgrid operator under these two modes is proposed. Then, a user-side limited rationality purchase energy selection model is proposed, which considers electric heating equipment, electric vehicles and demand response. Based on this, a user-side profit model is developed. The proposed model is represented by the leader-follower game framework, and the existence and uniqueness of Stackelberg equilibrium solution are proved. Finally, a simulation test is carried out using genetic algorithm and CPLEX solver. Simulative results show that, the “following-electric-load” mode increases the profits of microgrid operator and users simultaneously under the user-side limited rationality model. At the same time, the proposed purchase energy selection model effectively restrains the market power exercised by microgrid operator.

Key words: integrated energy microgrid; leader-follower game; limited rationality; electric vehicles; demand response; optimal operation

附录 A

根据文献[5]可知，要使 Stackelberg 均衡解存在，需满足如下条件：

- 1) MO 的收益为售电价与售热价的连续函数；
- 2) EVU 的收益为电、热负荷调整量以及电动汽车群充放电功率的连续函数；
- 3) EVU 的收益分别关于电、热负荷调整量以及电动汽车群充放电功率拟凸。

证明：对于条件 1) 与 2)，显然成立。对于条件 3)，①若 MO 运行于“以热定电”模式，对于策略 $\Delta L_{i,e}^k$ ，式 (38) 为关于 $\Delta L_{i,e}^k$ 的二次函数，其余项为关于 $\Delta L_{i,e}^k$ 的线性函数，因此 $E_{i,e}^k$ 为关于策略 $\Delta L_{i,e}^k$ 的拟凸函数。对于策略 $\Delta L_{i,h}^k$ ，与策略 $\Delta L_{i,e}^k$ 的类似。对于策略 $P_{i,d}^k$ ，当 $k \in \phi$ 时，式 (38) 为关于 $P_{i,d}^k$ 的二次函数，其余项为关于 $P_{i,d}^k$ 的线性函数，因此 $E_{i,d}^k$ 为关于策略 $P_{i,d}^k$ 的拟凸函数；当 $k \notin \phi$ 时，相当于 EVU 的策略集合仅有 $\Delta L_{i,e}^k$ 与 $\Delta L_{i,h}^k$ ，此时退化为不考虑电动汽车参与电荷调整的问题，上述证明已说明式 (33) 关于 $\Delta L_{i,e}^k$ 与 $\Delta L_{i,h}^k$ 拟凸。②若 MO 运行于“以热定电”模式，EVU 的收益增添 $\lambda_p \max(L_{i,h}^k - P_{MT,h}^k, 0)$ ，仅对关于策略 $\Delta L_{i,h}^k$ 增添或不增一次项 $\lambda_p L_{i,h}^k$ ，其收益函数仍关于 $\Delta L_{i,h}^k$ 拟凸。

综上，Stackelberg 博弈均衡解存在。

附录 B

根据文献[20]可知，当博弈满足以下条件时，Stackelberg 均衡解唯一：

- 1) 对于 MO 给出的策略，电动汽车用户存在唯一最优策略；
- 2) 对于电动汽车用户给出的策略，MO 存在唯一最优策略。

证明条件 1)：以 $L_{MO,h}^k > P_{MT,h}^k$ 、 $P_{i,d}^k > 0$ 为例，其余情况类似。对 E_i^k 分别求关于 $\Delta L_{i,e}^k$ 、 $\Delta L_{i,h}^k$ 以及 $P_{i,d}^k$ 的一阶偏导得：

$$\frac{\partial E_i^k}{\partial \Delta L_{i,e}^k} = \lambda_{ms}^k + 2a_{i,e}(L_{i,e}^k + P_{i,d}^k + \Delta L_{i,e}^k) + b_{i,e} \quad (B1)$$

$$\frac{\partial E_i^k}{\partial \Delta L_{i,h}^k} = \lambda_{mh}^k + 2a_{i,h}(L_{i,h}^k + \Delta L_{i,h}^k) + b_{i,h} \quad (B2)$$

$$\frac{\partial E_i^k}{\partial P_{i,d}^k} = -\lambda_c^k + 2a_{i,e}(\overline{L_{i,e}^k} + P_{i,d}^k) + b_{i,e} \quad (B3)$$

令一阶偏导等于 0，分别解得：

$$\Delta L_{i,e_o}^k = \frac{-(\lambda_{ms}^k + b_{i,e})}{2a_{i,e}} - k_1 < 0 \quad (B4)$$

$$\Delta L_{i,h_o}^k = \frac{-(\lambda_{mh}^k + b_{i,h})}{2a_{i,h}} - k_2 < 0 \quad (B5)$$

$$P_{i,d_o}^k = \frac{-(b_{i,e} - \lambda_c^k)}{2a_{i,e}} - k_3 < 0 \quad (B6)$$

因此， $\Delta L_{i,e_o}^k$ 、 $\Delta L_{i,h_o}^k$ 以及 P_{i,d_o}^k 分别为 E_i^k 的极大值点，考虑变量定义域的限制，用户 i 的最优策略区间可分别表示为：

$$\Delta L_{i,e_{opt}}^k \in \{\Delta L_{i,e_o}^k, -\varepsilon_e L_{i,e}^k, \varepsilon_e L_{i,e}^k\} \quad (B7)$$

$$\Delta L_{i,h_{opt}}^k \in \{\Delta L_{i,h_o}^k, -\varepsilon_h L_{i,h}^k, \varepsilon_h L_{i,h}^k\} \quad (B8)$$

$$P_{i,d_{opt}}^k \in \{P_{i,d_o}^k, -P_{i,c}^{\max}, P_{i,d}^{\max}\} \quad (B9)$$

证明条件 2): 以 $L_{MO,h}^k > P_{MT,h}^k$ 、 $P_{i,d}^k > 0$ 为例, 其余情况类似。将用户 i 的一组最优解 $\{\Delta L_{i,e}^k, \Delta L_{i,h}^k, P_{i,d}^k\}$ 代入 E_{MO}^k , 求得 MO 的 Hessian 矩阵为:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{p_{MO,e}^k}{a_{i,e}} & 0 \\ 0 & \frac{p_{MO,h}^k}{a_{i,h}} \end{bmatrix} \quad (B10)$$

由于 $a_{i,e}$ 、 $a_{i,h}$ 小于 0, $p_{MO,e}^k$ 、 $p_{MO,h}^k$ 大于 0。综上, 该博弈 Stackelberg 均衡解唯一。

附录 C

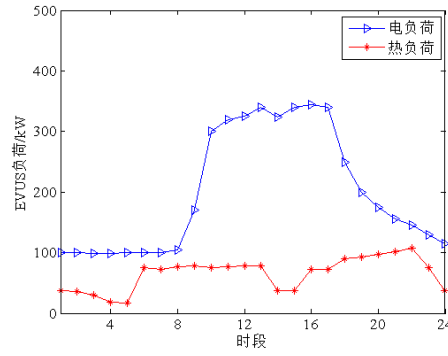


图 C1 EVU 初始电、热负荷分布
Fig.C1 Initial electric load and heat load distribution of EVU

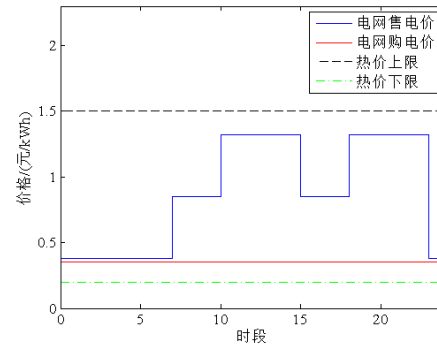


图 C2 电网分时电价与热价上下限
Fig.C2 Time-of-use electricity price of grid and upper and lower restraints of thermal price

附录 D

表 D1 模型其余参数表
Table D1 Other parameters of model

参数	数值
$a_{i,e}$	-0.4
$b_{i,e}$	35
$c_{i,e}$	0
$a_{i,h}$	-1.5
$b_{i,h}$	56
$c_{i,h}$	0
η_h	0.9
γ_e	15%
γ_h	12%
ε_e	0.2
ε_h	0.15
$C_{ES}^{\min}$	300×0.2 kW h
$C_{ES}^{\max}$	300×0.9 kW h
C_{ES}^1	120 kW h
η_c^{ES}	0.9
η_d^{ES}	0.9
λ_p	3 元