第 35 卷第 5 期
2018 年 5 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 35 No. 5
May 2018

DOI: 10.7641/CTA.2018.70669

考虑节点边际价格的热电联产机组主从博弈竞价策略

方宇娟, 魏 韡, 梅生伟†, 刘 锋

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室; 清华大学 电机系, 北京100084)

摘要: 本文构建了以热电联产机组(combined heat and power unit, CHP)、电力市场和热力市场为参与者的主从博弈模型, 并基于电力市场中节点边际电价(locational marginal electricity price, LMEP)的概念, 提出了节点边际热价(locational marginal heat price, LMHP)的概念. 在节点边际电价的求解中, 采用了支路潮流(branch power flow, BPF)模型, 考虑了配电网中的网络损耗从而可以得到更精确的计算结果. 在节点边际热价的求解中, 考虑了管道热损耗, 并基于管道损耗方程分析了节点边际热价的分布规律. 在此基础上, 采用变步长迭代寻优算法求解热电联产机组、电力市场、热力市场各自最优出力和最优报价策略. 最后, 通过一个6节点电网–4节点热网的算例对所构建的主从博弈模型及热电联产机组的竞价策略进行了验证.

关键词: 热电耦合市场; 节点边际热价; 节点边际电价; 主从博弈; 热电联产机组

引用格式: 方宇娟, 魏韡, 梅生伟, 等. 考虑节点边际价格的热电联产机组主从博弈竞价策略. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 682 – 687

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Stackelberg game strategy for combined heat power unit considering locational marginal prices

FANG Yu-juan, WEI Wei, MEI Sheng-wei†, LIU Feng

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments;
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the concept of locational marginal electricity price (LMEP) in the electricity market, this paper proposes locational marginal heat price (LMHP). Then stackelberg game, whose participants are combined heat and power unit (CHP), electricity market and heat market, is established to solve the optimal bidding strategy of CHP in the combined heat and electricity market. Branch power flow (BPF) model is applied to obtain LMEPs. The power loss is considered in the district electricity network to calculate LMEPs accurately. Meanwhile, the heat loss is regarded in the solution of LMHPs. And the distribution law of LMHPs are analyzed based on the pipe heat loss functions. In this paper, a variable-step iterative optimization algorithm is introduced to solve the optimal generation and optimal bidding strategies for CHP, electricity market and heat market. Finally, a 6-node electrical 4-node heat network is presented in the case study to verify the stackelburg models and optimal bidding prices for CHPs.

Key words: combined heat and electricity market; locational marginal heat price; locational marginal electricity price; Stackelberg game; combined heat and power unit

Citation: FANG Yujuan, WEI Wei, MEI Shengwei, et al. Stackelberg game strategy for combined heat power unit considering locational marginal prices. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 682 – 687

1 引言(Introduction)

热电联产机组(combined heat and power unit, CHP)作为一种高效清洁的产电供暖设备, 在我国北方城市供暖中具有重要作用[1]. 热电联产机组不仅可以大量节约能源, 而且可以改善环境条件, 提高居民生活水平, 缓解供电紧张局面[2]. 目前区域电力交易中心在分配市场发电份额时, 对热电联产企业的重视不够, 因此研究热电联产机组的竞价上网策略, 主动参与到我国的电力市场改革中, 对于热电联产企业利益最大化具有重要意义.

在电力市场中, 节点边际电价(locational marginal electricity price, LMEP)的概念已有广泛应用. Sotkiewicz 等最早提出了配电网中的 LMEP 的计算模型[3], 但没有考虑网损和阻塞的影响. 在输电网中, 若不考

收稿日期: 2017−09−15; 录用日期: 2018−03−26.
†通信作者. E-mail: meishengwei@mail.tsinghua.edu.cn.
本文责任编委: 陈皓勇.
国家自然科学基金项目(U1766203, 51621065)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1766203, 51621065).

虑输电网损, 仅仅基于直流线性潮流模型计算LMEP, 得到各节点的电价是相同的; 在配电网中, 电压等级较低, 阻抗和电抗的比值较高, 故网损不可忽略[4]. 为此Steven H. Low提出了辐射状电网的支路潮流(branch power flow, BPF)模型[5–6], 利用交流、非线性潮流模型计算LMEP, 考虑了网损且较传统交流潮流模型更易求解, 故本文基于BPF模型将非线性潮流约束转化为二阶锥形式求解LMEP.

与电力市场不同, 在现有的研究中, 鲜有对热力市场的讨论. 对热网的出力计算, 大多数研究采用基于能量中心(energy hub)的出力模型, 该模型最早由M. Geidl和G. Andersson提出[7], 他们将电能、热能、天然气等能源的转化、存储、运输视为一个功能单元[8], 没有细化热网的拓扑结构, 而是作为一个单一节点处理. 文献[9]考虑了热网的拓扑结构, 但没有考虑节点价格机制. 本文在考虑热网拓扑基础上, 分析热网节点价格差异, 提出了节点边际热价(locational marginal heat price, LMHP). 基于LMHP, 热力市场可最小化市场成本对热力市场出清. 在得到 LMHP 后, 进一步分析LMHP的特征对建立热力市场交易机制具有重要意义. 与电力网络不同, 热力网络中同时存在供水网络和回水网络两套系统. 在这种情况下, 节点边际热价是否会呈现与节点边际电价类似的分布规律是值得研究的重要问题.

在热电耦合综合能源系统中引入价格的调节机制, 其优化决策问题本质上属于博弈论范畴. 工程博弈论为解决多参与者利益分配问题提供了一种有效的解决思路[10–11]. 目前对于热电市场的博弈理论研究较少, 文献[12]用非合作博弈理论和演化博弈理论分析了热电联产企业上网竞价策略. 文献[13–14]基于合作博弈理论分析了热电机组之间调峰费用分摊问题. 以上对热电耦合市场的博弈研究多以合作博弈和非合作博弈为主, 且未考虑热网特征和热力市场. 本文充分考虑网络结构特征, 构建了热电耦合市场主从博弈模型, 求解热电联产机组的最优竞价策略.

2　模型建立(Establish models)

2.1　主从博弈模型(Master-slave models)

电力市场和热力市场中电量需求和热量需求总量固定, 故热电联产机组与电力网络中的发电设备和热力网络中的供热设备存在竞争关系, CHP分别参与独立的电力市场和独立的热力市场. 本文采用主从博弈模型将实际问题建模为一个双层优化问题: CHP作为上层决策者, 电力市场和热力市场作为下层决策者. 每层内部同时决策, 形成Nash竞争; 上下层之间顺次决策, 形成Stackelberg竞争. 该主从博弈竞价模型的基本框架如图1所示. 在电力网络和热力网络中均考虑了网络损耗. 在连接关系上, 发电设备与CHP通过电力网络向电负荷提供电能, 供热设备与CHP通过热力网络向热负荷提供热能.

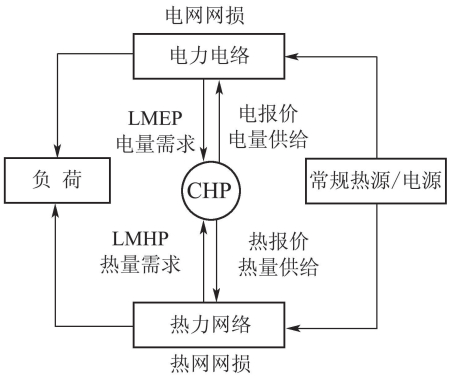

图 1　热电耦合市场主从策略研究框架图

Fig. 1　The diagram of stackelberg game strategy investigation in combined heat and electricity market

LMHP和LMEP作为市场信息, 可以调节电网和热网需要CHP提供的电量和热量. 其中, LMEP是在保证系统安全的前提下, 当一个节点增大一个单位电负荷时系统所增加的最小成本, 其数学表达是线路有功功率平衡方程的对偶变量. 类似的, 定义LMHP为在保证系统安全的前提下, 当一个节点增大一个单位热负荷时系统所增加的最小成本, 其数学表达是热功率平衡方程的对偶变量.

在电网侧, CHP向电力市场提供电力价格(竞价), 通过最小化电力市场成本出清电力市场, 进而确定电力市场LMEP以及电网需要CHP提供的电量. 同理, 在热网侧, CHP向热力市场提供热力价格(竞价), 通过最小化热力市场成本出清热力市场, 进而确定热力市场LMHP以及热网需要CHP提供的热量. 该博弈模型中存在3个参与者, 分别是CHP, 电力市场和热力市场. 其中: 参与者1(CHP)的博弈策略为其报价, 即CHP的电报价和热报价; 参与者2(电力市场)的博弈策略为从CHP处买电量; 参与者3(热力市场)的博弈策略为从CHP处的买热量. 报价高, 则相应的需求量减少, 反之亦然. 各参与者的支付为其收益减去成本. 相应的博弈顺序为, 以CHP的最优报价为主问题, 以电力市场和热力市场出清为从问题, 博弈中存在信息交互.

2.2　节点边际电价分析(Analysis of LMEP)

2.2.1　电网最优潮流模型(Optimal power flow models)

传统交流潮流模型含有带三角函数的非线性约束条件, 给优化问题求解带来了困难, 而传统直流潮流模型由于不计网损, 在不发生阻塞时各节点边际电价相等, 在电力市场中起不到调节信号的作用. 因此本文采用基于BPF模型描述配电网交流潮流. 电网的运行成本如式(1)所示, 主要由发电机出力和CHP的发电成本决定, 其中: $a_{0,i}, a_{1,i}, a_{2,i}$分别为发电机$i$的价格系数, $S_{\rm gen}$为发电机下标集合, $S_{e\rm CHP}$为CHP与电网相

连的节点的集合, $\alpha_{\mathrm{p},m}$为CHP对电网m节点的报电价, $p_{\mathrm{chp},m}$为m节点的电源对CHP的电量需求.

$$F=\sum_{i\in S_{\mathrm{gen}}}\{a_{2,i}(p_i^{\mathrm{g}})^2+a_{1,i}(p_i^{\mathrm{g}})+a_{0,i}\}+\sum_{m\in S_{e\mathrm{CHP}}}\alpha_{\mathrm{p},m}p_{\mathrm{chp},m}. \tag{1}$$

根据BPF模型, 式(2)为从节点i到节点j的线路l的有功功率平衡方程, 其中: P_{ij}^l即线路l的有功潮流, p_j^{g}和p_j^{load}分别是发电机有功出力和节点负荷; r_{ij}^l为线路l的电阻, i_{ij}^l为l上流过电流, P_{jk}^l是j和k之间的有功潮流; S_j^- 是从j发出线路的收点下标集合. 同理, 式(3)为无功功率平衡方程, 式(4)为电压平衡方程, u_i, u_j分别为节点i, j处的电压, 式(5)为复功率方程. Q_{ij}^l是线路l的无功潮流, q_j^{g}和q_j^{load}分别是无功出力和节点无功负荷. x_{ij}^l为线路l的电抗.

$$P_{ij}^l+p_j^{\mathrm{g}}-r_{ij}^l(i_{ij}^l)^2=\sum_{k\in S_j^-}P_{jk}^l+p_j^{\mathrm{load}}:\lambda_{\mathrm{p},j}, \tag{2}$$

$$Q_{ij}^l+q_j^{\mathrm{g}}-x_{ij}^l(i_{ij}^l)^2=\sum_{k\in S_j^-}Q_{jk}^l+q_j^{\mathrm{load}}, \tag{3}$$

$$(u_j)^2=(u_i)^2-2(r_{ij}^lP_{ij}^l+x_{ij}^lQ_{ij}^l)+(z_{ij}^l)^2(i_{ij}^l)^2, \tag{4}$$

$$(i_{ij}^l)^2(u_i)^2=(P_{ij}^l)^2+(Q_{ij}^l)^2, \tag{5}$$

式中$(i_{ij}^l)^2$和$(u_i)^2, (u_j)^2$为二次平方项, 从而上述方程皆为非线性方程, 本文令

$$I_{ij}^l=(i_{ij}^l)^2, \tag{6}$$

$$V_i=(u_i)^2,\ V_j=(u_j)^2. \tag{7}$$

将式(6)–(7)代入方程(2)–(5), 则非线性方程可转化为线性方程. 综上, 配电网的交流最优潮流问题可表示为

$$\min\ F,$$

$$\text{s.t. } P_{ij}^l+p_j^{\mathrm{g}}-r_{ij}^lI_{ij}^l=\sum_{k\in S_j^-}P_{jk}^l+p_j^{\mathrm{load}}:\lambda_{\mathrm{p},j}, \tag{8}$$

$$Q_{ij}^l+q_j^{\mathrm{g}}-x_{ij}^lI_{ij}^l=\sum_{k\in S_j^-}Q_{jk}^l+q_j^{\mathrm{load}}, \tag{9}$$

$$V_j=V_i-2(r_{ij}^lP_{ij}^l+x_{ij}^lQ_{ij}^l)+(z_{ij}^l)^2I_{ij}^l, \tag{10}$$

$$\sum_{j\in S_j^-}P_j^l=\sum_l r_{ij}^lI_{ij}^l+\sum_i(p_i^{\mathrm{load}}-p_i^{\mathrm{g}}), \tag{11}$$

$$I_{ij}^lV_i=(P_{ij}^l)^2+(Q_{ij}^l)^2, \tag{12}$$

$$0\leqslant p_i^{\mathrm{g}}\leqslant p_i^{\mathrm{g,max}},\ i\in S_{\mathrm{gen}}, \tag{13}$$

$$q_i^{\mathrm{g,min}}\leqslant q_i^{\mathrm{g}}\leqslant q_i^{\mathrm{g,max}},\ i\in S_{\mathrm{gen}}, \tag{14}$$

$$V_{i,\min}\leqslant V_i\leqslant V_{i,\max},\ i\in S_n, \tag{15}$$

$$P_{ij}^l\geqslant 0,\ Q_{ij}^l\geqslant 0, \tag{16}$$

$$\sqrt{(P_{ij}^l)^2+(Q_{ij}^l)^2}\leqslant S_l, \tag{17}$$

其中: 式(11)为计及网损的全系统有功功率平衡方程; 式(13)–(15)分别为发电机有功出力上下限、无功出力上下限和各节点电压幅值上下限; S_n 为电网网络节点的下标集合; 式(16)为线路l的有功功率和无功功率非负约束; 式(17)为复功率S_l幅值约束.

2.2.2 节点边际电价求解(Solve LMEP)

在电网最优潮流模型的所有约束条件中, 式(12)为二阶非凸等式, 式(17)为二阶锥不等式, 其他各式均为线性约束. 为了将该问题转化一个凸规划问题, 下式对(12)做SOCP凸松弛, 结果如式(18)所示:

$$I_{ij}^lV_i\geqslant(P_{ij}^l)^2+(Q_{ij}^l)^2. \tag{18}$$

通过求解最优潮流问题的最优解, 可以得到各约束条件的对偶变量, 从而求得节点边际电价, 体现在对应于约束条件(8)的对偶变量$\lambda_{\mathrm{p},j}$上. 基于BPF模型求得的任意节点j的节点边际电价LMEP_j^B可表示为

$$\mathrm{LMEP}_j^B=\lambda_{\mathrm{p},j},\ j\in S_n. \tag{19}$$

2.3 节点边际热价分析(Analysis of LMHP)

2.3.1 热网最优潮流模型(Optimal heat flow models)

配网热电耦合系统中假设管道中热水流量为定质量流量, 且不考虑压强损失和热量损失. 热源对热水进行加热并通过管道使热量在整个热网管道系统中流通, 最终供给到用户. 其中: 将热水从热源送达热负荷的网络为进水网络, 将热水从热负荷送回热源的网络为回水网络. 热网运行成本为锅炉运行成本与从CHP获得热量的成本, 由式(20)给出:

$$G=\sum_{i\in S_{\mathrm{bo}}}\{b_{2,i}(h_i^{\mathrm{g}})^2+b_{1,i}(h_i^{\mathrm{g}})+b_{0,i}\}+\sum_{n\in S_{\mathrm{hCHP}}}\alpha_{\mathrm{h},n}h_{\mathrm{chp},n}, \tag{20}$$

热网系统的优化目标为成本最小, 其中: $b_{0,i}, b_{1,i}, b_{2,i}$分别热锅炉 i 的价格系数, S_{bo} 为热锅炉下标集合, S_{hCHP}为CHP与热网相连的节点的集合, $\alpha_{\mathrm{h},n}$为CHP对于热网节点n的报热价, $h_{\mathrm{chp},n}$为节点n的热源对CHP的热量需求. 热网最优潮流模型[4]为

$$\min\ G, \tag{21}$$

$$\text{s.t. } H=cm_{\mathrm{q}}(T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{o}}):\lambda_{\mathrm{h},j}, \tag{22}$$

$$T_{\mathrm{end}}=(T_{\mathrm{start}}-T_{\mathrm{a}})\mathrm{e}^{(-\frac{\alpha L}{cm})}+T_{\mathrm{a}}, \tag{23}$$

$$(\sum m_{\mathrm{out}})T_{\mathrm{out}}=\sum(m_{\mathrm{in}}T_{\mathrm{in}}), \tag{24}$$

$$h^{\mathrm{g,min}}\leqslant h^{\mathrm{g}}\leqslant h^{\mathrm{g,max}}, \tag{25}$$

$$A\sum m=m_{\mathrm{q}}. \tag{26}$$

式(26)为流量平衡方程, 其中: A是热网网络的节点管道关联矩阵, 流进节点则为1, 流出节点则为0; m_{q}为节点处水流的流量; m为管道中水流的流量. 由于本文假设定质量流量, 故该式自然满足. 式(22)为热功率平衡方程, 其中: H为热功率向量(在热源处表示为h^{g},

在热负荷处表示为h^{d}), c为比热容常数4.2 kJ/(kg°C), T_{s}为供水温度, T_{o}为出水温度, 即流出节点且未混合并入回水网络的热水温度. 式(23)为管道温度降落方程, 其中: T_{start}和T_{end}分别为管道始末端温度, T_{a}为环境温度, α为热损耗系数, L为管道长度. 式(24)为节点温度混合方程, 其中: T_{out}为流出节点且混合后的温度, m_{in}和m_{out}分别为流入/出节点的水流流量, T_{in}为流入节点的水流温度. 式(25)为热源出力上下限方程, $h^{\mathrm{g,min}}$和$h^{\mathrm{g,max}}$分别为热源出力最小值和最大值.

2.3.2　节点边际热价求解(Solve LMHP)

由于热网模型中的约束条件全部为线性约束, 故热网优化问题为一个标准的凸规划问题. 与电网的节点边际电价类似, 通过求解热网最优潮流, 可以得到最优潮流问题的最优解和各约束条件对应的对偶变量, 节点边际热价体现在对应于约束条件(22)的对偶变量$\lambda_{\mathrm{h},j}$上. 综上, 热网中任意节点j的节点边际热价LMHP_j^B可表示为

$$\mathrm{LMHP}_j^B = \lambda_{\mathrm{h},j},\ j \in S_{\mathrm{h}}, \tag{27}$$

其中S_{h}为热网网络节点的下标集合.

2.3.3　节点边际热价特征讨论(Discussions of LMHP)

分析LMHP影响因素可知, LMHP的值与热网网络结构有关, 供水网络和回水网络相当于两套系统, 故存在双向热损耗. 同时, LMHP与节点热负荷大小及运行调节方式有关, 受双向热损耗机制影响而呈现复杂的规律和特性. 管道热损耗方程如下所示:

$$\begin{aligned} H_{\mathrm{loss}} = {} & cm(T_{\mathrm{out}} - T_{\mathrm{in}}) = \\ & cm[T_{\mathrm{a}} + (T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{a}})\mathrm{e}^{\left(-\frac{\alpha L}{cm}\right)} - T_{\mathrm{in}}] = \\ & cm(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{in}})\{1 - \mathrm{e}^{\left(-\frac{\alpha L}{cm}\right)}\}, \end{aligned} \tag{28}$$

其中H_{loss}为管道热损耗向量.

本文假设在定质量流量不定温度的调节模式下, 计及运行管网自行调节范围及一定的热惯性, 分别考虑供水网络中热损耗方程和回水网络中热损耗方程, 可知节点边际热价的分布特性为: 1) 固定负荷节点供水温度的情况下, 若热负荷上升, 则回水温度下降, 且回水管道中损耗下降, 但供水管道损耗不变. 故通过让整体损耗减小以满足负荷需求小范围变化, 此时越靠近热源点的LMHP高, 远离热源点LMHP低; 2) 固定负荷节点的回水温度的情况下, 若热负荷上升, 则供水温度上升, 且供水管道中损耗上升, 但回水管道损耗不变. 则需要增加出力以满足负荷需求小范围变化, 此时越靠近热源点的LMHP低, 远离热源点LMHP高.

3　竞价策略求解(Solve bidding strategy)

对于参与竞价的CHP机组而言, 其优化目标为最大化CHP的收益, 目标函数为

$$\begin{aligned} & \max_{\alpha_{\mathrm{p}},\alpha_{\mathrm{q}}} \\ & W = \sum_{m \in S_{e\mathrm{CHP}}} \lambda_{\mathrm{p},m} p_{\mathrm{chp},m} + \\ & \quad \sum_{m \in S_{\mathrm{hCHP}}} \lambda_{\mathrm{h},n} h_{\mathrm{chp},n} - \sum_{i \in S_{\mathrm{CHP}}} (a_{0,i} + \\ & \quad a_{1,i} p_i + a_{2,i} h_i + a_{3,i} p_i^2 + a_{4,i} h_i^2 + a_{5,i} p_i h_i), \end{aligned} \tag{29}$$

$$\text{s.t.}\ \lambda_{\mathrm{p},m}, p_{\mathrm{chp},m}, p_i \in \arg\min F, \tag{30}$$

$$\lambda_{\mathrm{h},n}, h_{\mathrm{chp},n}, h_i \in \arg\min G, \tag{31}$$

$$p_i = h_i / k_{\mathrm{hp}}, \tag{32}$$

$$p_i^{\min} \leqslant p_i \leqslant p_i^{\max}, \tag{33}$$

其中: $a_{0,i}, a_{1,i}, a_{2,i}, a_{3,i}, a_{4,i}, a_{5,i}$为第$i$台供热机组热电联产机组成本函数的常系数, p_i为CHP机组i的电出力, h_i为CHP机组i的热出力, $a_{5,i} p_i h_i$体现了电热耦合, S_{CHP}为CHP的下标集. k_{hp}为热电比, 实际运行中, 热电机组一般运行在固定热电比模式[15]. $p_i^{\min}$和$p_i^{\max}$分别为机组电出力最小值和最大值.

本文采用变步长迭代寻优算法求解竞价策略, 计算流程如图2所示.

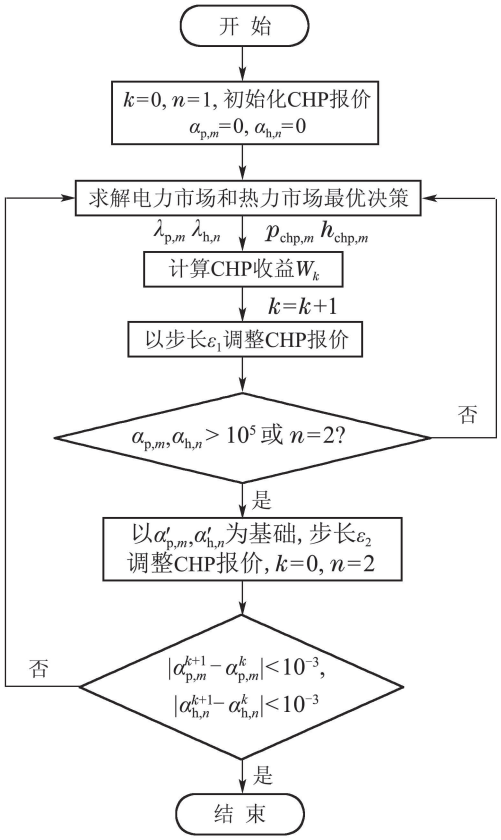

图 2　算法流程图

Fig. 2　The flowchart of the algorithm

分别取步长$\varepsilon_1 = 1$和步长$\varepsilon_2 = 0.01$各进行一轮寻优. k为每轮迭代次数, n为轮数. 第1轮寻优过程为:

CHP报电价和热价分别以步长ε_1为增量做循环, 热价增加为内循环, 电价增加为外循环. 每当电报价或热报价数值变化一次, 则求解一次策略并计算CHP收益, 直到CHP所电报价和热报价达到上限, 则第1轮寻优结束. 比较第1轮中所有CHP收益值, 找到最大值, 标记对应的报价为$\alpha'_{\mathrm{p},m}$, $\alpha'_{\mathrm{h},n}$. 此时以该报价为初值以ε_2为步长进行第2轮寻优. 第2轮寻优中, 以$\alpha'_{\mathrm{p},m}$, $\alpha'_{\mathrm{h},n}$为中心, 先以步长为正增量迭代, 然后以步长为负增量迭代, 与第1轮类似, 进行内外循环, 直到报价策略收敛, 第2轮寻优结束, 并通过比较得到最大的CHP收益对应的报价. 由于(29)–(33)是一个双层优化模型, 是非凸问题, 难以求解, 利用该算法将问题转化为计算式(30)和式(31)两个凸优化问题, 因此降低了求解难度, 但该算法的不足在于不能保证寻优得到的结果为全局最优解. 经过变步长迭代寻优, 可得CHP报价最优策略为

$$\lambda_{\mathrm{p},m} = \alpha_{\mathrm{p},m},\ \lambda_{\mathrm{h},n} = \alpha_{\mathrm{h},n}. \tag{34}$$

4 算例分析(Case studies)

本文中给出了一个6节点电网–4点热网的算例, 其拓扑结构如图3所示. 为求解CHP的最优竞价策略, 首先计算电力网络交流最优潮流和热力网络最优潮流, 从而得到节点边际电价和节点边际热价. LMEP和LMHP由MATLAB 2017a调用YALMIP工具包求解[16]. SOCP调用MOSEK求解[17]. 系统详细参数参考文献 [18], 所有参数取当量值(p.u.).

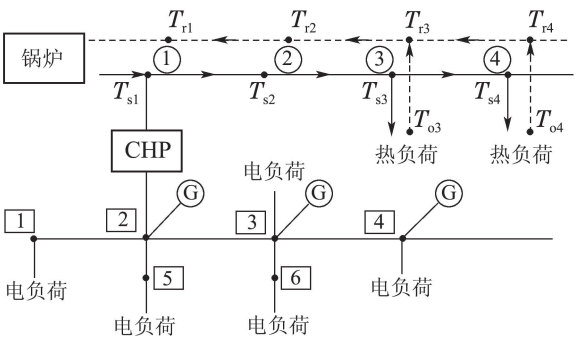

图 3 6节点电网–4节点热网算例结构示意图

Fig. 3 The structure of a six-bus and four-node coupled electrical and heating system

4.1 竞价策略分析(Analysis of bidding strategy)

仿真得到热网节点边际热价为(37.00, 36.10, 35.20, 43.68), 节点边际电价为(7.00, 3.50, 7.80, 7.80, 3.70, 13.80), 此时迭代寻优得CHP最优报价为电价3.50, 热价37.00. CHP热出力和电出力分别为3.13和0.77, CHP收益为93.18. 迭代收敛说明下层模型中电力市场和热力市场博弈均存在Nash均衡. 对比CHP的最优报价与CHP所联结的热网节点1处的节点边际热价和电网节点2处的节点边际电价, 结果对应相等. 若CHP报价高于联结节点处的节点边际电价或热价, 则对应的电需求和热需求则降低. 在电力网络发电设备和热力网络供热设备容量大于负荷时, 对CHP的需求几乎为0. 若CHP报价低于联结节点处的节点边际电价或热价, 则获得的总收益降低. 综上所述, CHP参与热电耦合市场竞价, 存在最优报价, 且CHP最优报价等于所连接的热网和电网节点对应的节点边际热价和节点边际电价.

4.2 节点热价分布规律(Distribution of LMHP)

热电耦合网络节点边际价格分布如图4所示, 实线为节点边际电价, 虚线为节点边际热价. 由于算例中电网存在3个发电机组, 节点边际电价同时受3个电源影响, 不易观察规律. 为了得到节点边际电价的分布图, 只启用节点2处发电机. 节点1为参考节点, 设其节点电价为7.00. 由图4可知, LMEP在电源处最低, 为7.80, 距离电源越远则LMEP越高, 距离最远的节点4处LMHP为9.60. 即随着距离增加, 送电成本上升. 对于LMHP而言, 距离热源越远LMHP不一定升高, 从节点1热源处到节点3, LMHP从37.00下降至35.20, 但从节点3到节点4, LMHP突然升高. 该现象说明节点边际热价的分布规律不随距离增加而增加, LMHP的值与热网网络分布有关, 供水网络和回水网络相当于两套系统, 由前文中介绍的双向热损耗理论可知LMHP不呈现与节点边际电价相同的规律.

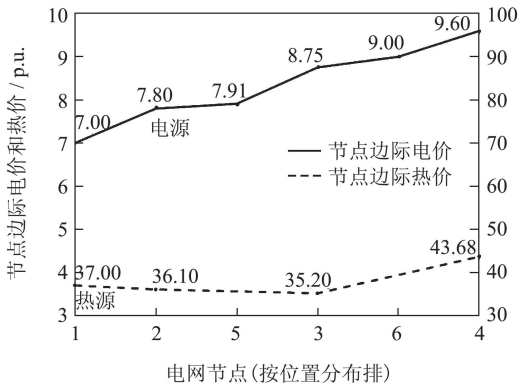

图 4 节点边际价格分布图

Fig. 4 The distribution diagram of LMEPs and LMHPs

热网节点供回水温度分布如图5所示. 由图中可以看出由于热源在节点1处, 故该节点供水温度最高, 为63.64. 由于管道中存在热损耗, 故距离热源越远则供水温度越低, 最远处节点4的供水温度下降至60.13. 回水温度从节点4到节点1不呈现单调降低的趋势, 观察图3可得节点4处的回水和节点3处的回水在回水网络中出现节点温度混合, 从而节点3处温度反而高于节点4, 分别为20.13和20.63. 综上, 算例结果表明由于热网网络中同时存在供水网络和回水网络, 因此呈现比电网网络中更复杂的规律.

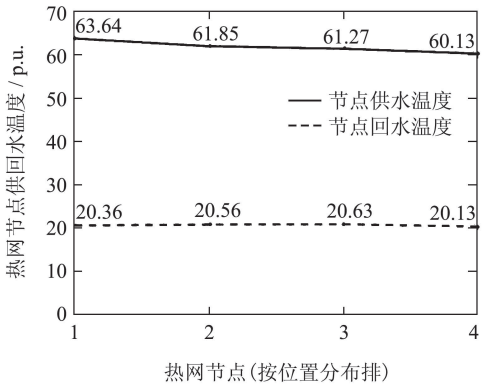

图 5 热网节点供回水温度分布图

Fig. 5 The distribution diagram of supply/return temperatures

节点边际电价和热价分布规律如下: 1) LMEP在电源处最低, 远离电源则LMEP越高; 2) LMHP不随距离增加而增加, LMHP 的值与热网网络分布有关; 3) 热网存在双向热损耗导致LMHP 在不同条件下分布规律不同.

5 总结与展望(Conclusions and prospects)

本文主要贡献如下: 1) 考虑配电网阻抗、网损, 采用BPF模型, 将大规模非线性计算转化为求解一个SOCP问题, 从而计算配电网交流潮流, 进而求解节点边际电价, 即LMEP; 2) 提出了考虑热网拓扑结构的节点边际热价计算模型, 即LMHP, 在该模型中, 详细考虑了热网各节点温度计算, 以及热网管道损耗并分析总结了节点边际热价的分布规律; 3) 构建了求解热电联产机组最优竞价策略的主从博弈模型, 并采用变步长迭代寻优算法, 得到CHP, 电力市场、热力市场各自优化出力和最优报价策略, 下层存在Nash均衡, 博弈问题存在最优解, 且CHP的最优报价策略即, 即CHP报价等于所连接的热网和电网节点对应的节点边际热价和节点边际电价. 本文的研究结论对热电耦合系统的市场决策具有重要参考意义. 本文所构建的主从博弈模型考虑单时段问题, 在实际应用中多考虑多时段问题, 在接下来的研究中将重点分析多时段下的博弈策略.

参考文献(References):

[1] CHEN X. *The modeling and analysis of the integrated power and heat system for the wind power accommodation* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.

[2] ZHAO F. *The bidding strategy of integrated heat and power system based on the game theory* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[3] SOTKIEWICZ P M, VIGNOLO J M. Nodal pricing for distribution networks: efficient pricing for efficiency enhancing DG [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2006, 21(2): 1013 – 1014.

[4] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. *Applied Energy*, 2016, 162(5): 1238 – 1250.

[5] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: Relaxations and convexification-Part I [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2013, 28(3): 2554 – 2564.

[6] SOTKIEWICZ P M, VIGNOLO J M. Towards a cost causation-based tariff for distribution networks with DG [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2007, 22(3): 1051 – 1060.

[7] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2007, 22(1): 145 – 155.

[8] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(5): 2302 – 2312.

[9] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 12 – 23.

[10] LIU Bin, CHEN Laijun, WANG Yuchen, et al. Allocating reserve cost for hedging against wind generation uncertainty: a coalitional-game-theoretic approach [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(4): 437 – 445.
(刘斌, 陈来军, 汪雨辰, 等. 应对风电出力不确定性的备用成本分摊: 联盟博弈方法 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(4): 437 – 445.)

[11] 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.
(卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论方法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.)

[12] ZHAO Fei, ZHOU Yuhui. The noncooperative game in the bidding of integrated power and heat system[J]. *Electric Power Construction*, 2011, 32(6): 74 – 78.
(赵飞, 周渝慧. 非合作博弈在热电联产竞价中的应用 [J]. 电力建设, 2011, 32(6): 74 – 78.)

[13] HU Jia, HU Linxian. Apportionment of peak compensation cost of thermal power units using improved Sharpley value method [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2015, 27(3): 65 – 70.
(胡佳, 胡林献. 改进夏普利值法的热电机组调峰补偿费用分摊 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 65 – 70.)

[14] XU Y. *The design of game thoery models and the evaluation analysis of the thermal power plants participating in the wind power heating* [D]. Changsha: Xiangtan University, 2016.

[15] VASEBI A, FESANGHARY M, BATHAEE S M T. Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2007, 29(10): 713 – 719.

[16] LÖFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB [C] //*IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*. Taipei: IEEE, 2004, 284 – 289.

[17] MOSEK A P S. *The MOSEK optimization software* [EB/OL]. http://www. mosek.com, 2010, 54(2/1): 5.

[18] FANG Y. *Data for case studies* [EB/OL]. https://sites.google.com/site/coheatele/, 2018.

作者简介:

方宇娟 (1996–), 女, 博士, 研究方向为多能源系统优化、工程博弈论, E-mail: fyj16@mails.tsinghua.edu.cn;

魏　韡 (1987–), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为多能源系统优化、工程博弈论, E-mail: wei-wei04@mails.tsinghua.edu.cn;

梅生伟 (1964–), 男, 博士, 教授, 长江学者, 研究方向为系统优化与控制、工程博弈论, E-mail: meishengwei@mail.tsinghua.edu.cn;

刘　锋 (1977–), 男, 博士, 副教授, 研究方向为系统优化调度、工程博弈论, E-mail: lfeng@tsinghua.edu.cn.