第36卷 第4期
2020年4月

电网与清洁能源
Power System and Clean Energy

Vol.36 No.4
Apr. 2020

文章编号:1674-3814(2020)04-0014-09 中图分类号:TM76 文献标志码:A

基于改进精简爆炸烟花的区域商业楼宇日前电能交易

张世斌[1],李敬光[1],陈威洪[1],张鑫[1],赖伟坚[1],张志义[2],余涛[2]
(1.广东电网有限责任公司 东莞供电局,广东 东莞 523000;
2.苏州华天国科电力科技有限公司,江苏 苏州 215000)

Day-Ahead Energy Transaction for Commercial Buildings Based on Improved Bare Bones Fireworks Algorithm

ZHANG Shibin[1], LI Jingguang[1], CHEN Weihong[1], ZHANG Xin[1], LAI Weijian[1], ZHANG Zhiyi[2], YU Tao[2]
(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China;
2. Suzhou Huatian National Science and Technology Power Technology Company, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

ABSTRACT: At present, an increasing number of commercial buildings are equipped with distributed controllable resources such as energy storage and micro-gas turbine, which can transfer load, reduce load and even generate electricity on-grid according to the demand, making it possible to trade electricity in a small area. For this kind of energy trade, this paper sets up an electric energy trading model considering the integrator and the commercial building. Among them, the integrator adjusts the time-and-use electricity price according to the electricity consumption strategies of the commercial building to increase the income while the commercial building changes its electricity consumption strategy to reduce the cost. And for the privacy existing between the integrator and the commercial building, the paper proposes an alternate solution method based on improved bare bones fireworks algorithm (IBBFWA) to realize the solution of the model. Finally, the effectiveness of the improved bare bones fireworks algorithm and the effectiveness of the model in reducing buildings operating costs and improving integrator's revenue are verified by the results of an example.

KEY WORDS: commercial building; distributed controllable resources; integrator; regional energy transaction; IBBFWA

摘要:由于现在越来越多的商业楼宇配备了储能和微型燃气轮机等分布式可控资源,能够根据需求转移负荷、减少负荷甚至发电上网,具备了小范围区域电能交易的可能。针对小范围区域电能交易问题,该文搭建了考虑集成商和商业楼宇的电能交易模型进行研究。其中,集成商根据楼宇用电策略改变分时电价提高收益,商业楼宇根据电价改变用电策略降低成本;同时,针对集成商与商业楼宇之间存在隐私问题,该文提出了一种基于改进精简烟花算法(improved bare bones fireworks algorithm,IBBFWA)的交替求解方法,实现模型的求解。通过算例结果验证模型对降低商业楼宇运行成本的有效性和算法的高效性。

关键词:商业楼宇;分布式可控资源;集成商;区域电能交易;改进精简爆炸烟花

随着国家的不断发展,化石能源的巨大消耗带来的温室气体排放和空气污染问题日趋严重[1]。为了减少对化石能源的依赖,光伏等分布式发电设备的渗透率日益提高,尤其以商业楼宇微网最为显著[2-6]。配备有分布式发电设备的商业楼宇微网能就近利用清洁能源资源,能源生产和消费就近完成,具有能源利用率高,污染排放低等优点。目前,分布式发电已取得较大进展,但仍受到市场化程度低、公共服务滞后、管理体系不健全等因素的制约。为加快推进分布式能源发展,2017年,国家能源局发布了《关于开展分布式发电市场化试点的通知》,鼓励配电网分布式发电设备所有者与就近电力用户进行电力交易。可以预见,商业楼宇之间通过区域电能交易满足部分用能需求,以实现用电成本降低将成为发展趋势。

当前针对商业楼宇的研究有很多。文献[7]提出了一种需求侧虚拟储能系统深度融合的楼宇微网

基金项目:国家自然科学基金项目(51777078);广东电网有限责任公司科技项目(031900KK52170132)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51777078); Science and Technology Program of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (031900KK52170132).

冷热电联供的调度方法；文献[8]针对办公型建筑和宾馆型建筑的夏季负荷需求，引入碳税和碳交易机制，搭建多种以运行费用最小为目标的分布式能源微网系统模型，并对各模型展开综合对比，从而制定最优供能策略。

然而以上文章均是从商业楼宇自身能量管理优化的角度进行研究，对区域商业楼宇电能交易的内容研究较少。随着分布式设备效率的提高，将会有越来越多的不同主体的商业楼宇配备分布式能源设备，楼宇将具备一定的发电潜力[2]；电力交易的逐渐放开[9]势必会对该区域商业楼宇的分布式设备出力产生影响，楼宇间的电能交易将成为可能。因此，研究区域商业楼宇日前电能交易很有意义。

基于上述考虑，本文搭建了由集成商和多主体商业楼宇组成的区域电能交易模型，实现了小范围区域内多主体楼宇之间的电能交易，并提出了一种改进的精简烟花算法实现该模型的交替求解，通过与其他算法进行比较，验证了该算法的有效性。

1 区域电能交易模型

本文以冬季为研究背景，研究区域电能交易情况。区域电能交易模型由多商业楼宇、集成商和配电网组成。集成商根据商业楼宇的用电策略制定电价并发布，从而引导各楼宇用户对其用电策略的更新。各楼宇用户根据集成商的电价策略重新制定用电计划，并将新的用电策略信息返送回集成商。集成商再根据楼宇重新制定的用电策略更新电价。如此循环往复，直到双方不再修改各自的策略信息。

1.1 集成商数学模型

1.1.1 目标函数

集成商负责商业楼宇与配电网之间的电能交互，通过向配电网购买或者出售电能，以此平衡区域商业楼宇缺少或多余的电能。在这个过程中，集成商制定与商业楼宇交互电能的电价以最大化自身收益 e，即

$$\max e=\sum_{t}^{T}\left[C_{\text{grid}}(t)+\sum_{i}^{I}\left[\lambda_{o.\text{buy}}(t)P_{i.\text{buy}}(t)-\lambda_{o.\text{sold}}(t)P_{i.\text{sold}}(t)\right]\right] \tag{1}$$

$$C_{\text{grid}}(t)=\begin{cases}P_{\text{grid}}(t)\times\lambda_{\text{buy}}(t), \sum_{i}^{I}P_{i.\text{buy}}(t)\geqslant\sum_{i}^{I}P_{i.\text{sold}}(t)\\ P_{\text{grid}}(t)\times\lambda_{\text{sold}}(t), \sum_{i}^{I}P_{i.\text{buy}}(t)<\sum_{i}^{I}P_{i.\text{sold}}(t)\end{cases} \tag{2}$$

式中：t 表示调度时刻；T 表示调度周期；i 表示商业楼宇编号；I 为商业楼宇的总个数；$C_{\text{grid}}(t)$为集成商与配电网交易电能产生的费用；$P_{\text{i.buy}}(t)$和 $P_{\text{i.sold}}(t)$分别表示楼宇 i 购买和出售的电能；$\lambda_{\text{o.buy}}(t)$和$\lambda_{\text{o.sold}}(t)$分别为集成商的售电价和购电价；$P_{\text{grid}}$ 为集成商与配电网交互的电能；$\lambda_{\text{buy}}(t)$和$\lambda_{\text{sold}}(t)$则分别表示配电网的购电价和售电价。

1.1.2 约束条件

1）电能平衡：集成商需要负责区域商业楼宇的电能平衡。在与商业楼宇交互后，该区域商业楼宇不足或者多余的电能将通过与配电网交互的方式实现平衡。

$$P_{\text{grid}}(t)=\sum_{i}^{I}P_{i.\text{buy}}(t)-\sum_{i}^{I}P_{i.\text{sold}}(t) \tag{3}$$

2）电价约束：本文假设集成商能够在配电网售电价和购电价的范围之外对自身的购电价和售电价进行一定调整，使得集成商拥有一定的获利空间，从而保证集成商能够正常运营。

$$\alpha\times\lambda_{\text{sold}}(t)\leqslant\lambda_{o.\text{buy}}(t)\leqslant\beta\times\lambda_{\text{buy}}(t) \tag{4}$$

$$\alpha\times\lambda_{\text{sold}}(t)\leqslant\lambda_{o.\text{sold}}(t)\leqslant\beta\times\lambda_{\text{buy}}(t) \tag{5}$$

式中：α，β为电价调整指数。

为了限制集成商的市场力，保障商业楼宇的利益，需要对集成商的购电价和售电价进行约束。

$$\sum_{t}^{T}\lambda_{o.b}(t)\leqslant\sum_{t}^{T}\lambda_{b}(t) \tag{6}$$

3）商业楼宇与集成商交互电能费用约束：与不进行区域电能交易，即只与配电网交易电能相比，商业楼宇在参与交易的过程中，相应的用电成本应该得到降低，否则，商业楼宇没有动力参与区域电能交易

$$f(i)\leqslant f_0(i) \tag{7}$$

式中：$f(i)$为第 i 栋楼参与区域电能交易后的用电成本；$f_0(i)$为第 i 栋楼不参与区域电能交易后的用电成本。

1.2 商业楼宇数学模型

不同的商业楼宇配备有不同的分布式设备，如蓄电池、热电联供系统（combined heating and power，CHP）、电锅炉等等，通过不同设备之间的配合，降低商业楼宇的用能成本，同时满足对室内温度的要求。

1.2.1 设备模型

1）蓄电池：蓄电池是一种储能设备，通过充电和放电，将峰时段的用电负荷转移到平时段或者谷

时段,降低用电成本[5]。

$$E_i(t)=E_i(t-1)(1-\delta_i)+\Delta T\left(P_{i,\mathrm{ch}}(t)\eta_{i,\mathrm{ch}}-\frac{P_{i,\mathrm{dis}}(t)}{\eta_{i,\mathrm{dis}}}\right) \quad (8)$$

式中:$E_i(t)$为蓄电池容量;δ_i为自放电率;ΔT表示调度周期间隔;$P_{i,\mathrm{ch}}(t)$、$P_{i,\mathrm{dis}}(t)$分别为蓄电池的充电和放电功率;$\eta_{i,\mathrm{ch}}$和$\eta_{i,\mathrm{dis}}$分别为充电效率和放电效率。

2) CHP:CHP 包含燃气锅炉和溴冷机。燃气锅炉通过消耗天然气,将化石能源转换为烟气余热$Q_{i,\mathrm{mt}}(t)$和电能$P_{i,\mathrm{mt}}(t)$[10-12]。

$$C_{i,\mathrm{fuel}}(t)=\frac{\Delta T C_{\mathrm{ng}}P_{i,\mathrm{mt}}(t)}{Q_{\mathrm{LHV}}\eta_{i,\mathrm{mt}}(t)} \quad (9)$$

$$Q_{i,\mathrm{mt}}(t)=\frac{\left(1-\eta_{i,L}-\eta_{i,\mathrm{mt}}(t)\right)P_{i,\mathrm{mt}}(t)}{\eta_{i,\mathrm{mt}}(t)} \quad (10)$$

式中:$C_{i,\mathrm{fuel}}(t)$为燃气轮机 t 时段的燃料费用;C_{ng}为天然气价格;$P_{i,\mathrm{mt}}(\mathrm{t})$为燃气轮机的出力;$Q_{\mathrm{LHV}}$为天然气的低热量值;$\eta_{i,\mathrm{mt}}(t)$为发电效率;$\eta_{i,\mathrm{L}}$为散热损失率。

由于燃气锅炉产生的烟气余热不能直接利用,需要经过溴冷机回收转化热能$Q_{i,\mathrm{mt-h}}(t)$才可使用。

$$Q_{i,\mathrm{mt}-h}(t)=Q_{i,\mathrm{mt}}(t)\eta_{i,h}C_{i,\mathrm{OPh}} \quad (11)$$

式中:$\eta_{i,\mathrm{h}}$和$C_{i,\mathrm{OPh}}$分别为溴冷机的烟气回收率和制热系数。

3) 电锅炉:为了弥补 CHP 产热的不足,部分商业楼宇还配备有电锅炉,通过消耗电能生产热能$Q_{\mathrm{eb}}(t)$。

$$Q_{i,\mathrm{eb}}(t)=P_{i,\mathrm{eb}}(t)\eta_{i,\mathrm{eb}} \quad (12)$$

式中:$P_{i,\mathrm{eb}}(t)$为电锅炉的用电功率;$\eta_{i,\mathrm{eb}}$为电热转换效率。

4) 室温:室温的变化和制热设备的发热功率相关,也与建筑自身和外界温度相关[10]。

$$T_i(t+1)=T_i(t)\exp(-(RC)^{-1})+Q_{\mathrm{H}}(t)R\left[1-\exp(-(RC)^{-1})\right]+T_{\mathrm{out}}(t)\left[1-\exp(-(RC)^{-1})\right] \quad (13)$$

式中:$T_i(t)$为楼宇的室内温度;R 和 C 表示建筑的热阻和热容量;$Q_{\mathrm{H}}(t)$为用于调节室温的热能;$T_{\mathrm{out}}(t)$表示建筑外界的温度。

1.2.2 目标函数

单栋楼宇以在运行周期 T 内的总运行成本最低为目标。

$$\min f(i)=\sum_t^T\left[C_{i,\mathrm{fuel}}(t)+C_{i,g}(t)\right] \quad (14)$$

$$C_{i,g}(t)=\lambda_{o.\mathrm{buy}}(t)\times P_{i,\mathrm{buy}}(t)-\lambda_{o.\mathrm{sold}}(t)\times P_{i,\mathrm{sold}}(t) \quad (15)$$

式中:$C_{i,\mathrm{g}}(t)$表示在 t 时刻楼宇向集成商买卖电能的成本。

1.2.3 约束条件

1) 电功率平衡约束:

$$P_{i.\mathrm{sold}}(t)-P_{i.\mathrm{buy}}(t)=P_{i,\mathrm{mt}}(t)+P_{i,\mathrm{dis}}(t)-P_{i,\mathrm{ch}}(t)-P_{i,\mathrm{eb}}(t) \quad (16)$$

2) 热平衡约束:楼宇的热功率平衡表示的是楼宇自身的散热以及设备产热的平衡,使得楼宇的室温得以维持在一个人体感觉比较舒适的温度范围内。

$$Q_{\mathrm{eb}}(t)+Q_{\mathrm{mt}-h}(t)=Q_{\mathrm{H}}(t) \quad (17)$$

$$T_{i,\min}\leqslant T_i(t)\leqslant T_{i,\max} \quad (18)$$

式中:$T_{i,\max}$和$T_{i,\min}$表示室温的上下限。

3) 功率交互约束:

$$P_{\mathrm{line.min}}\leqslant P_{i.\mathrm{sold}}(t)-P_{i.\mathrm{buy}}(t)\leqslant P_{\mathrm{line.max}} \quad (19)$$

式中:$\mathrm{P_{line.max}}$、$\mathrm{P_{line.min}}$分别表示联络线的电能传输上限和下限。

4) 可控机组约束:

本文考虑的可控机组有电锅炉、燃气轮机,对应约束为

$$P_{k.\min}\leqslant P_k(t)\leqslant P_{k.\max} \quad (20)$$

式中:$P_k(t)$为可控机组 k 在 t 时刻出力;$P_{k.\min}$和$P_{k.\max}$分别为可控机组 k 出力的上下限。

5) 蓄电池约束:蓄电池需要满足其容量约束、充放电上下限约束。

$$E_{\min}\leqslant E(t)\leqslant E_{\max} \quad (21)$$

$$P_{v.\min}\leqslant P_v(t)\leqslant P_{v.\max} \quad (22)$$

式中:$P_v(t)$为蓄电池在 t 时刻充电或者放电的功率;$P_{v.\max}$和$P_{v.\min}$为蓄电池充放电功率的上下限;$E(t)$为蓄电池在 t 时刻的储电容量;$E_{\min}$和$E_{\max}$为蓄电池容量的上下限。

2 改进精简烟花算法

集成商和商业楼宇分别属于不同的利益群体。不同利益群体之间存在隐私问题,无法实现信息共享,只能交互特定的且有限的信息,这导致集成商和商业楼宇之间存在信息隔阂,用传统的解析方法处理难度较大,故本文采用启发式算法实现模型求解。相比其他传统启发式算法,精简烟花算法具有代码简单容易理解、对运行环境要求低和收敛速度快等特点[11],故本文采用精简烟花算法实现模型求解。

精简烟花算法(the bare bones fireworks algorithm，BBFWA)是由谭营教授等人提出[11]，是对烟花算法进行简化得到的算法。然而在每次迭代中，如果找不到更优解，爆炸范围会越来越小，这么做虽然可以显著提高局部搜索能力，但却容易陷入局部最优。由于BBFWA的火花是烟花爆炸后在一定范围内随机产生的，该次烟花爆炸和上次烟花爆炸除了爆炸范围的大小上有一定联系之外，无其他联系。因此，本文在BBFWA的基础上引入变异火花和学习因子，提出IBBFWA。通过变异火花，保证算法在迭代后期仍具有一定的全局搜索能力；通过将该次爆炸烟花和下次爆炸烟花进行对比，利用两者的变化趋势得到学习因子，并以此更新火花的位置，从而提高算法的寻优效果。

2.1　变异火花

首先在火花种群中随机选择一定数量的火花，进行高斯变异。火花 $x_{i,k}$ 表示为烟花 x_i 产生的第 k 朵火花，假设该火花被选择为待变异火花，则变异烟花 $x^*_{i,k}$ 可以表示为

$$x^*_{i,k}=l+(u-l)r \tag{23}$$

式中：l、u 表示初始化解的下限和上限；r 表示[0，1]中的随机数。

2.2　学习因子

烟花产生的所有火花通过对上次爆炸烟花与该次爆炸烟花的位置上的差别进行学习。

$$x^*_{i+1,k}=x_{i+1,k}+b\times\left(x_{i+1,k}-x_{i,k}\right) \tag{24}$$

式中：$x^*_{i+1,k}$ 表示学习因子更新完后的火花；b 代表学习算子，表示火花对烟花变化趋势的学习程度。

IBBFWA具体包括如下步骤：

1）在可行域的范围内按照预先设置生成一朵烟花，每一朵烟花代表一个可行解。

2）烟花在一定的范围内随机爆炸产生一定数量的火花，每朵火花代表一个可行解。

3）对部分火花进行变异操作。

4）对所有火花进行学习操作。

5）计算烟花和所有火花的适应度值，以此判断烟花和所有火花质量的好坏，记录其中适应度最好的烟花或者火花，替代原有烟花，成为下一朵爆炸烟花，同时计算该新烟花的爆炸范围。

6）判断是否满足终止条件。如果满足则停止搜索，输出适应度最好的烟花。如果还没有满足终止条件，则回到2)步继续循环。

3　基于改进精简烟花算法的区域电能交易模型求解

本文采用IBBFWA和GAMS中的CONOPT求解器相结合的方法来实现模型的交替求解。集成商在计算其收益时需要用到商业楼宇的购电功率 $P_{i,\mathrm{buy}}(t)$ 或者售电功率 $P_{i,\mathrm{sold}}(t)$，即商业楼宇的用电策略；商业楼宇在计算自身运行的成本时，需要知道集成商发布的售电价 $\lambda_{\mathrm{o,buy}}(t)$ 和购电价 $\lambda_{\mathrm{o,sold}}(t)$，即集成商的价格策略。两者的求解相互影响，优化目标不一致。本文选用基于IBBFWA的交替求解方法来求解集成商和楼宇群的交易模型。求解的整体流程如图1所示。

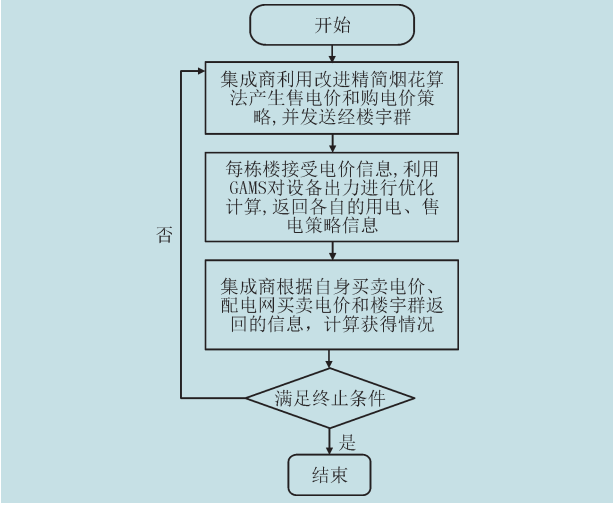


图1　计算流程图

Fig.1　Flow chart of computing

此外，商业楼宇的优化调度模型是线性问题，本文利用CONOPT求解器求解该问题。集成商制定电价策略，并对各楼宇进行策略性引导。集成商与各商业楼宇之间仅通过电价和用电等少量信息进行交互，楼宇信息的私密性得到充分保障。

4　算例分析

4.1　算例设置

该算例系统以冬季为背景，包括10栋1.2节所述单主体商业楼宇。

配电网售电价和购电价设置见表1，天然气价格为3.1元/m^3，其低热值为9.7 kW·h/m^3，相关数据来自参考文献[5]。不同商业楼宇的参数见附录A表A1和图A1[4-5,12-13]。室外温度变化如附录图A2所示。

表1 配电网电价表
Table 1 Table of distribution network electricity prices

时段	所属时段	售价/(元/kW·h)	购价/(元/kW·h)
0:00—07:00	谷时段	0.17	0.13
07:00—10:00	平时段	0.49	0.38
10:00—15:00	峰时段	0.83	0.65
15:00—18:00	平时段	0.49	0.38
18:00—21:00	峰时段	0.83	0.65
21:00—23:00	平时段	0.49	0.38
23:00—24:00	谷时段	0.17	0.13

4.2 集成商对楼宇的影响

1)成本对比:通过求解第1节所述区域电能交易模型,可得优化前和优化后的电价如表2所示。

表2 电价
Table 2 Price of electricity

时刻	售电价/元		购电价/元	
	优化前	优化后	优化前	优化后
01:00	0.170 0	0.154 0	0.130 0	0.134 5
02:00	0.170 0	0.204 0	0.130 0	0.150 0
03:00	0.170 0	0.195 1	0.130 0	0.158 8
04:00	0.170 0	0.199 9	0.130 0	0.179 0
05:00	0.170 0	0.162 8	0.130 0	0.154 4
06:00	0.170 0	0.168 4	0.130 0	0.160 4
07:00	0.170 0	0.189 6	0.130 0	0.160 6
08:00	0.490 0	0.412 1	0.380 0	0.404 9
09:00	0.490 0	0.443 3	0.380 0	0.463 1
10:00	0.490 0	0.445 4	0.380 0	0.490 2
11:00	0.830 0	0.637 5	0.650 0	0.620 7
12:00	0.830 0	0.697 3	0.650 0	0.661 1
13:00	0.830 0	0.629 5	0.650 0	0.910 6
14:00	0.830 0	0.982 3	0.650 0	0.620 6
15:00	0.830 0	0.873 8	0.650 0	0.668 5
16:00	0.490 0	0.541 6	0.380 0	0.334 7
17:00	0.490 0	0.502 6	0.380 0	0.333 7
18:00	0.490 0	0.507 1	0.380 0	0.506 8
19:00	0.830 0	0.745 9	0.650 0	0.707 6
20:00	0.830 0	0.745 4	0.650 0	0.866 3
21:00	0.830 0	0.737 5	0.650 0	0.943 6
22:00	0.490 0	0.531 2	0.380 0	0.496 0
23:00	0.490 0	0.525 9	0.380 0	0.399 1
24:00	0.170 0	0.160 5	0.130 0	0.177 5

从表3可以看出:在参与区域电能交易之后,各栋商业楼宇的运行成本均实现了降低,降低幅度达0.29%~131.16%,以此保证了商业楼宇将会充分参与区域电能交易过程。表中成本为负表示楼宇用户在交易中盈利。

表3 计算结果比较
Table 3 Comparison of calculation results

楼宇序号	成本/元	
	未参与区域电能交易	参与区域电能交易
楼宇1	86.073 8	−27.228 1
楼宇2	−411.444 2	−540.890 4
楼宇3	−411.444 2	−540.890 4
楼宇4	−599.771 7	−739.544 4
楼宇5	985.085 2	978.103 6
楼宇6	911.767 5	907.103 6
楼宇7	849.189 1	846.542 4
楼宇8	1 034.046 1	1021.507 7
楼宇9	923.164 9	920.496 2
楼宇10	770.233 4	731.142 2

2)设备出力对比:由于不同楼宇的设备和建筑材料参数类似,其设备出力变化基本一致,故仅对楼宇1的出力变化进行分析,其他楼宇分析类似。图2所示为不参与区域电能交易时楼宇1设备出力。

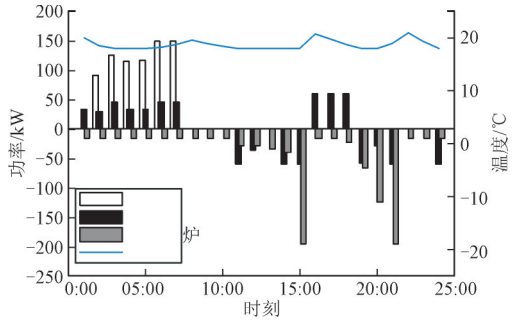


图2 不参与区域电能交易时楼宇1设备出力
Fig.2 Outputs of equipment in Building 1 without an integrator

从图2可知,楼宇1在不参与区域电能交易时,各类设备的出力情况。谷时段的室外温度比较低,室内室外温差比较大,为了满足室温的要求,需要电锅炉提供大量的热能。由于此时配电网的购电价很低,利用CHP来供热不经济,故CHP在谷时段处于功率下限,以减少运行成本。谷时段的配电网电价较低,所以在满足蓄电池的容量和功率的上下限约束下,尽可能充电,为减少其他时段的负荷提供可能。在峰时段,由于室外温度较高,室内室外温差较小,对热能的需求不大,用燃气轮机供热即可满足。且该时段配电网的购电价最高,用燃气轮机产热的同时,还可以利用产热时发的电能减少峰时段的负荷,降低用电成本,故峰时段期间,利用燃气轮机供热更加经济。蓄电池则尽量发电,减少峰时段的用电负荷,进一步降低用电成本。

与图2对比,参与区域电能交易后楼宇1各类设备的出力发生了较为明显的变化,如图3所示。

这是因为在参与区域电能交易后，电价发生了变化，商业楼宇根据变化的电价对自身设备进行了调整，以降低用电成本。在谷时段，由于02:00集成商的售电价最高，故尽可能将电锅炉在该时间的用电转移到其他时间，在保证温度要求的情况下减少用电成本。在峰时段，由于13:00和15:00集成商的购电价相对较高，故燃气锅炉尽可能集中到这些时段发电，可以最大化减少运行成本，有利于商业楼宇的经济运行。至于蓄电池，其在谷时段时尽可能地集中到集成商售电价较低的时候充电，在峰时段时尽可能地集中到集成商购电价较高的时候放电。

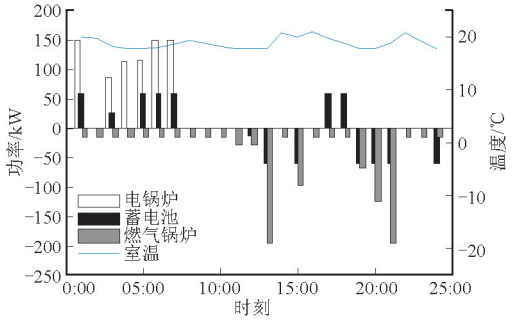


图3　参与区域电能交易时楼宇1设备出力
Fig.3　Outputs of equipment in Building 1 with an integrator

4.3　算法性能对比

分别采用经典的遗传算法(genetic algorithm,GA)[14-17]、粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)[18-21]、BBFWA和IBBFWA对模型进行求解，均求解25次，并对计算结果的均值和极值进行比较。GA、PSO、BBFWA以及IBBFWA的参数设置如表A3所示，各种算法的计算结果如表4和表5所示。

表4　用时比较
Table 4　Comparison of calculation time

算法	平均用时/s	最多用时/s	最少用时/s	标准偏差
GA	4 379.813 0	4 589.353 0	4 089.112 0	123.155 5
PSO	4 309.262 0	4 499.410 0	4 060.845 0	127.294 4
BBFWA	4 280.849 0	4 428.233 0	4 193.331	72.612 1
IBBFWA	4 185.228 0	4 383.328 0	3 890.539 0	125.703 3

表5　计算结果比较
Table 5　Comparison of calculation results

算法	平均收益/元	最多收益/元	最少收益/元	标准偏差
GA	54.523 1	185.697 6	20.608 4	103.155 6
PSO	240.959 0	355.721 0	110.035 0	73.336 6
BBFWA	173.695 0	267.605 7	53.160 0	57.550 0
IBBFWA	283.580 3	376.222 9	137.928 2	59.633 1

从表4可以看出：在优化时间上，IBBFWA明显快于GA、PSO和BBFWA，所用时间均实现了降低，降低幅度达2.2%~4.4%。从表5可以看出：在优化效果上，IBBFWA也优于GA、PSO和BBFWA。其中，GA、PSO、BBFWA和IBBFWA的平均收益分别为54.523 1、240.959 0、173.695 0和283.580 3元，IBBFWA的优化效果最好。从最大值和最小值来看，IBBFWA均为最高，而且，相较于其他算法，其方差为59.633 1，优化效果比较稳定。

5　结语

为解决区域电能交易问题，本文在考虑了集成商和商业楼宇群各自的利益后，提出了一种区域电能交易优化模型，并利用IBBFWA和CONOPT相结合的交替优化方法实现求解，仿真算例表明：

1）与GA、PSO和BBFWA相比，IBBFWA在寻优效果上更佳。在计算时间上，IBBFWA所用时间最短，为其他对比算法的95.5%~97.8%；在计算结果方面，IBBFWA的优化效果最好，平均收益最高，为其他对比算法的117.7%~520.1%，同时优化效果比较稳定。

2）集成商发布电价信息，引导各楼宇用户进行用能策略制定，各楼宇用户再将制定的策略信息返回到集成商，为集成商更新电价信息作参考，循环往复，实现电价优化。这样不仅减少了商业楼宇的运营成本，降低幅度达0.29%~131.16%，也提高了集成商的运营收益。

3）本文中未考虑多主体楼宇的拓扑结构，未来笔者将进一步完善智能配电网下的拓扑结构并对多集成商及海量楼宇交易问题进行研究。

参考文献

[1]　赵俊华，文福栓，杨爱民，等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化，2011. 35(14): 2-10.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10.

[2]　LIU Nian, CHEN Qifang, LIU Jie, et al. A heuristic operation strategy for commercial building microgrids containing EVs and PV system[J]. IEEE Transactions on

Industrial Electronics, 2015, 62(4):2560-2570.

[3] 马骁腾,吴江,管晓宏.城市楼宇群风能利用时空关系仿真与分析[J].智慧电力,2017,45(7):37-42.
MA Xiaoteng, WU Jiang, GUAN Xiaohong. Space-time relationship simulation and analysis of wind energy utilization in urban buildings[J]. Smart Power, 2017, 45(7): 37-42.

[4] 吴雄, 王秀丽, 王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):1-8.
WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.

[5] 李正茂, 张峰, 梁军,等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3569-3576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3569-3576.

[6] 颜庆国,阮文骏,陈楚,等.基于并行预测策略的公共楼宇日前空调负荷预测[J].电网与清洁能源,2016,32(11):80-86,90.
YAN Qingguo, RUAN Wenjun, CHEN Chu, et al. Day-ahead air conditioning load forecasting of public building based on parallel prediction strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11):80-86,90.

[7] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰,等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):581-590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):581-590.

[8] 王惠, 赵军, 安青松,等. 不同建筑负荷下分布式能源系统优化与政策激励研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3734-3740.
WANG Hui, ZHAO Jun, AN Qingsong, et al. Study on optimization and policy incentives of distributed energy system under different building loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3734-3740.

[9] 曹伟,叶桂南,周先哲,等.新电改条件下电力市场需求侧响应交易机制分析[J].电网与清洁能源,2019,35(10):50-55.
CAO Wei, YE Guinan, ZHOU Xianzhe, et al. Analysis of demand side response trading mechanism in power market under new electricity reform[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10):50-55.

[10] LU Yuehong, WANG Shengwei, SUN Yongjun, et al. Optimal scheduling of buildings with energy generation and thermal energy storage under dynamic electricity pricing using mixed- integer nonlinear programming[J]. Applied Energy, 2015, 147(6):49-58.

[11] LI Junzhi, TAN Ying. The bare bones fireworks algorithm: a minimalist global optimizer[J]. Applied Soft Computing, 2018, 62(4):454 - 462.

[12] 吕泉, 陈天佑, 王海霞,等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5):79-85.
LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):79-85.

[13] WANG Dezhi, ZHANG Xiaoshun, QU Kaipin, et al. Pareto tribe evolution with equilibrium-based decision for multi- objective optimization of multiple home energy management systems[J]. Energy & Buildings, 2018, 159(8):11-23.

[14] 柏春光, 万杰, 刘娇, 等. 基于遗传算法的抽汽供热机组间的热电负荷分配优化研究[J]. 节能技术, 2014, 32(3): 201-204.
BO Chunguang, WAN Jie, LIU Jiao, et al. Optimization of load distribution between extraction thermoelectric heating unit based on genetic algorithms[J]. Energy Conse Rvation Technology, 2014, 32(3):201-204

[15] 刘伟庭. 基于遗传算法的有机朗肯循环系统参数优化[J]. 节能技术, 2013, 31(2):155-158.
LIU Weiting. Parameters optimization of organic rankine cycle system based on genetic algorithm[J]. Energy Conse Rvation Technology, 2013, 31(2): 155-158.

[16] 杨巧云. 基于遗传算法的锅炉高效低NOx燃烧优化[J]. 节能技术, 2013, 179(3): 75-78.
YANG Qiaoyun. Combustion optimization for high efficiency and low NOx emission of utility boiler based on genetic algorithm[J]. Energy Conse Rvation Technology, 2013, 179(3):75-78.

[17] 王洪涛, 邹斌, 李晓刚, 等. 基于优化运行仿真的CCHP终端供能系统规划方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 29-36.
WANG Hongtao, ZOU Bin, LI Xiaogang, et al. Planning method for CCHP terminal power supply system based on optimal strategy simulation[J]. Smart Power, 2019, 47(9):

29-36.

[18] 田录林，张沛文，周萌，等. 基于实时电价的商业园区电池储能变功率削峰填谷策略[J]. 西北水电，2019(5): 1-5.
TIAN Lulin, ZHANG Peiwen, ZHOU Meng, et al. Variable power peak load shifting strategy through storage battery system based on real-time electricity price for commercial park[J]. North West Hydropower, 2019(5): 1-5.

[19] 孙向军，黄灵芝. OBGM(1,n)模型在大坝变形预测中的应用[J]. 西北水电，2019(4): 95-99.
SUN Xiangjun, HUANG Lingzhi. Application of OBGM (1,n)model in dam deformation prediction[J]. North West Hydropower, 2019(4): 95-99.

[20] 徐永干，冉恒，苟鑫，等. 基于广义S变换和QPSO-SVM的水电机组振动故障诊断方法[J]. 智慧电力，2020，48(2): 38-44.
XU Yonggan, RAN Heng, GOU Xin, et al. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating unit based on generalized S transform and QPSO-SVM[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 38-44.

[21] 荀 挺，雷胜华，丁晓辰，等. 区域综合能源系统的多目标最优潮流算法研究[J]. 智慧电力，2019，47(9): 19-28.
XUN Ting, LEI Shenghua, DING Xiaochen, et al. Multi-objective optimal power flow algorithms for integrated community energy systems[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 19-28.

收稿日期:2019-11-13。

作者简介:

张世斌(1983—)，男，本科，助理工程师，研究方向为电力系统调度运行；

李敬光(1986—)，男，本科，工程师，研究方向为电网调度运行及管理；

陈威洪(1980—)，男，本科，工程师，研究方向为电网调度运行及管理。

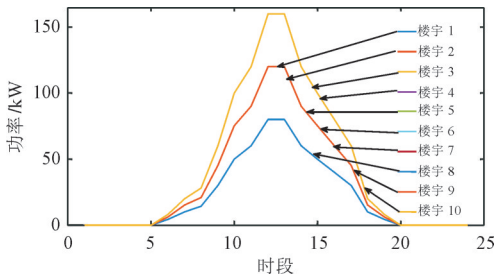
(编辑 徐花荣)

附录

表A1 楼宇相关参数

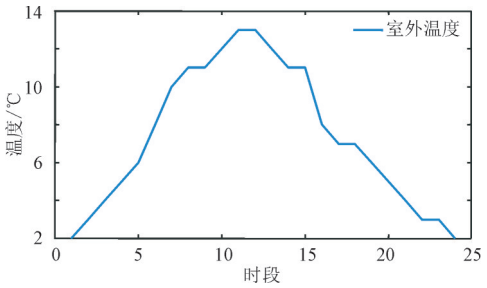
Table A1 Related parameters of buildings

类型	参数	数值(楼宇1/2/3/4/5/6/7/8/9/10)
蓄电池	充放电功率上限/kW	60/80/60/80/60/60/60/60/60/60
	充放电功率下限/kW	0/0/0/0/0/0/0/0/0/0
	蓄电池容量/kWh	300/400/300/400/300/300/300/300/300/300
	自放电率	0
	充电效率	0.9
	放电效率	0.9
	E_{max}	1.0
	E_{min}	0.2
燃气锅炉	发电功率上限/kW	195/0/0/0/0/0/0/0/0/0
	发电功率下限/kW	15/0/0/0/0/0/0/0/0/0
	发电效率	0.3
	散热损失	0.15
电锅炉	用电功率上限/kW	150/200/150/200/150/150/150/150/150/150
	用电功率下限/kW	0/0/0/0/0/0/0/0/0/0
	热电转换效率	1
溴冷机	制热系数	1.2
	烟气回收率	0.9
其它	热阻/(℃·kW^{-1})	18
	热容量/(kWh·℃$^{-1}$)	0.525
	室温上限/℃	22
	室温下限/℃	18
	联络线电能传输上限/kW	1 000
	联络线电能传输下限/kW	1 000



图A1 光伏预测出力

Fig.A1 Forecast of the output of photovoltaic



图A2 室外温度

Fig.A2 Outdoor temperature

表A3 算法的相关参数

Table A3 The related parameters of the algorithm

类型	参数	数值
GA	迭代次数	50
	种群数量	30
	交叉概率	0.8
	变异概率	0.2
PSO	迭代次数	50
	种群数量	30
	最小惯性重量	0.4
	最大惯性重量	0.9
	加速常数c1	2
	加速常数c2	2
BBFWA	迭代次数	50
	爆炸产生火花数	30
	Ca	0.9
	Cr	1.2
IBBFWA	迭代次数	50
	爆炸产生火花数	30
	Ca	0.9
	Cr	1.2
	b	0.1
	变异火花数	3