

能量-备用多品种电力交易下空调负荷聚合商竞价策略

吴心弘¹, 潘玲玲², 王泽荣¹, 周 竞², 王 勇²

(1. 国网浙江综合能源服务有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 双侧电力市场的开放为公共楼宇暖通空调负荷作为需求侧资源参与电力市场提供了新的机遇。为了挖掘用电高峰时段空调负荷的调控潜力, 根据暖通空调的运行原理, 基于能量守恒定律、热力学原理、质量守恒原理等, 建立了公共楼宇暖通空调的物理模型, 提出了暖通空调的柔性控制策略。考虑空调用户在负荷聚合商的统一协调下参与能量和备用市场, 构建了能量-备用多品种电力交易下负荷聚合商的双层竞价模型, 其中上层为负荷聚合商竞价模型, 下层为电力市场出清模型, 并基于KKT条件及对偶理论将双层优化问题转化为带平衡约束的单层优化模型, 实现模型的高效求解。算例分析结果验证了所提竞价模型的有效性。

关键词: 空调负荷; 负荷聚合商; 多品种电力交易; 能量市场; 备用市场

中图分类号: TM 925.12; F 416.61

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202204075

0 引言

近年来, 随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 人们对公共楼宇的依赖程度不断提升。楼宇负荷逐渐成为夏季尖端负荷的主要部分, 其中空调负荷尤为突出^[1]。据统计, 夏季空调负荷在尖端负荷的平均占比为30%~40%, 在北京、上海等一线城市, 该占比高达50%^[2]。另一方面, 对于未来高比例新能源渗透的新型电力系统而言^[3], 传统电源侧的调节资源难以提供充裕的灵活性支撑, 因此亟需挖掘需求侧的调控潜力。

公共楼宇暖通空调(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)负荷分布广、占比大且可控性高, 是优质的需求侧资源, 蕴含巨大的调控潜力。目前, 国内外的空调负荷模型主要包括基于电路模拟的等效热参数(equivalent thermal parameter, ETP)模型^[4-6]以及基于冷热负荷的建筑模型^[7-8]2种。虽然ETP模型可以根据室内温度的变化对空调的运行状态进行调控, 但操作要求较高; 而基于冷热负荷的建筑模型具有较强的泛化能力, 但需要调用的参数较多, 难以测量。且上述2种方法仅考虑了楼宇的储热特性, 并未具体分析空调的电热转换过程。而在控制策略方面, 当前广泛采用的空调控制方式主要为直接负荷控制, 又可归纳为启停控制^[1]、档位控

制^[9]及周期性轮停控制^[10-12]3类, 但大多为刚性控制策略, 难以实现空调负荷的精准调控, 且需要频繁地启停空调, 进而会影响空调性能及使用寿命。基于上述考虑, 本文从暖通空调系统的运行原理出发, 充分考虑空调系统各部件的拓扑连接以及调控变量, 构建了暖通空调系统的柔性控制模型。

在供需双侧开放的电力市场下, 以空调负荷为代表的的需求侧灵活资源可在负荷聚合商(即需求响应资源的整合者)的代理下参与能量市场及辅助服务市场, 负荷聚合商通过对空调负荷进行统一管理和集中控制, 从而形成可靠性高、响应速度快的调度模式^[9, 13-15]。文献[16-17]研究了负荷聚合商代理可中断负荷参与辅助服务交易, 但关于给定中标量下的具体负荷控制策略未展开论述; 文献[18]考虑了负荷聚合商对各类负荷的调控策略, 但是对于空调等负荷的建模则统一采用了较为模糊的温控负荷模型。

值得注意的是, 在市场主体选择以及市场交易机制方面, 已有研究侧重于负荷聚合商与负荷用户之间或多个负荷聚合商之间的单一信息交互关系。例如: 文献[19-21]构建了计及负荷聚合商-能源消费者交互的动态定价模型; 文献[22]构建了多个负荷聚合商之间的非合作博弈模型。然而, 鲜有研究同时计及电力市场出清、负荷聚合商以及负荷用户等多市场主体之间的协同互动。此外, 在负荷聚合商投标市场品种的选择方面, 目前大多文献研究的是单一的能量市场或单一的辅助服务市场, 例如: 文献[18-21]考虑了负荷聚合商参与能量市场; 文献[16-17]考虑了负荷聚合商参与辅助服务市场。

综上所述, 为了挖掘用电高峰时段空调负荷的调控潜力, 本文提出了能量-备用多品种电力交易下空调负荷聚合商的竞标策略。首先, 基于能量守恒定律以及热力学原理, 建立了公共楼宇暖通空调的

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-03-01

在线出版日期: 2022-04-26

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(面向零售和综合能源服务市场主体的多品种电力交易技术研究)(5108-202119052A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(Research on Multi Variety Electricity Trading Technology for Retail and Integrated Energy Service Market Players)(5108-202119052A-0-0-00)

物理模型,提出了基于暖通空调各部件工作原理和拓扑连接的全局优化控制模型;然后,考虑空调用户在负荷聚合商的统一协调下参与能量-备用多品种电力市场,构建了包含上层负荷聚合商参与能量-备用市场竞标、下层多品种电力市场出清模型在内的双层优化模型,从而实现多个市场主体之间的经济效益最优;并基于KKT条件及对偶理论将双层优化模型转化为带平衡约束的单层优化模型,实现双层优化模型的高效求解。

1 空调负荷聚合商参与电力交易框架

近年来,得益于智能电网中高级测量体系的高速发展,负荷聚合商业务逐渐兴起。负荷聚合商通过专业技术评估用户的需求响应潜力,整合分散的需求响应资源来参与电力系统运营。不同于售电公司,负荷聚合商本身呈现一种大型的负荷资源,可以提供一定的负荷削减容量参与辅助服务。因此,空调负荷聚合商可以通过楼宇量测系统中的温湿度传感器、新风系统计量装置、分项智能电表等终端设备对楼宇的运行状态进行监控,并基于信息网络与通信技术获得楼宇内暖通空调部分设备的控制权。

考虑负荷聚合商同时参与能量市场和备用市场2种市场,在提高决策灵活性的同时,可获得更大的利益。本文以15 min为一个优化决策周期。设定负荷聚合商在日前参与峰荷时段的竞标,系统架构如图1所示,主要交易流程分为以下4个步骤。

1) 资源聚合。

各负荷聚合商聚合管辖范围内的楼宇负荷资源,整理各幢楼宇的建筑信息、空调参数及用户需求,建立楼宇空调模型。根据历史数据、天气情况预测空调负荷可调度量,即虚拟发电资源发电量。

2) 负荷聚合商投标。

负荷聚合商根据预测的虚拟发电资源发电量,以类似于常规机组投标的方式,遵从利益最大化原则,向电力市场提交自身的发电量和报价策略。

3) 电力市场竞价。

电力交易中心根据购电成本最小原则选择低报价的负荷聚合商来满足需求,并将出清价格和竞标结果发送给负荷聚合商。

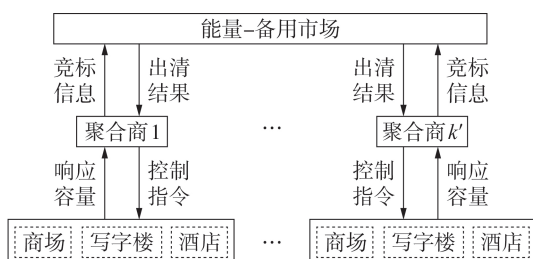


图1 基于聚合商业务的系统架构

Fig.1 System framework based on aggregator business

4) 利益分配。

在确定竞标结果和出清价格后,负荷聚合商对各楼宇用户因参与聚合商业务所产生的经济损失进行补偿。

2 公共楼宇暖通空调模型

相比于居民和小型工厂内的分散式空调,大型公共楼宇内的暖通空调更为集中,负荷容量大,可调性能好,调节时对电网运行的影响相对较小。1幢公共楼宇的暖通空调系统主要由冷冻水、冷却水以及制冷剂3个循环系统组成,包括1台或多台制冷机组,相应数量的冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔,以及冷水机组、风机盘管或新风机组等末端设备^[23]。暖通空调系统示意图如图2所示。

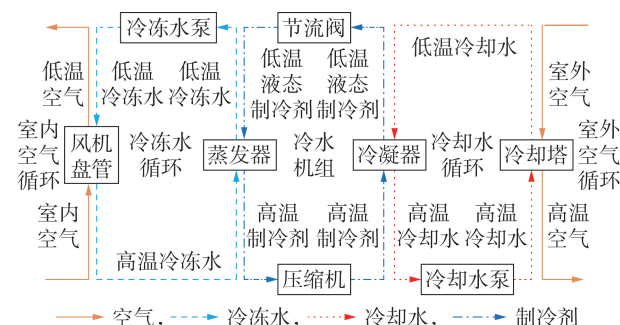


图2 暖通空调系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of HVAC system

对于一个包含 N_1 台冷水机组、 N_2 台冷冻水泵、 N_3 台风机盘管、 N_4 台冷却水泵以及 N_5 台冷却塔的暖通空调系统而言,其能耗模型可表示为:

$$P_{HVAC} = \sum_{i=1}^{N_1} P_{chiller,i} + \sum_{j=1}^{N_2} P_{chwpump,j} + \sum_{k=1}^{N_3} P_{coil,k} + \sum_{m=1}^{N_4} P_{cwpump,m} + \sum_{n=1}^{N_5} P_{tower,n} \quad (1)$$

式中: P_{HVAC} 为暖通空调的能耗; $P_{chiller,i}$ 为第 i 台冷水机组的能耗; $P_{chwpump,j}$ 为第 j 台冷冻水泵的能耗; $P_{coil,k}$ 为第 k 台风机盘管的能耗; $P_{cwpump,m}$ 为第 m 台冷却水泵的能耗; $P_{tower,n}$ 为第 n 台冷却塔的能耗。

2.1 冷水机组模型

对于多冷水机组空调系统而言,冷水机组的能耗取决于能效比,其模型可表示为:

$$P_{chiller} = Q_e / \gamma_{COP} \quad (2)$$

式中: $P_{chiller}$ 为冷水机组的能耗; Q_e 为冷冻水循环侧的冷负荷; γ_{COP} 为冷水机组的能效比,其与冷水机组的蒸发温度、冷凝温度及负载率相关,如式(3)所示。

$$\gamma_{COP} = \frac{r}{\left(\frac{T_c + 273.15}{T_e + 273.15} - 1 \right) r + a_1 \frac{T_c + 273.15}{T_e + 273.15} - a_2} \quad (3)$$

$$T_e = T_{\text{chwr}} - \frac{Q_e}{F_{\text{chw}}(m_{\text{chw}})} \quad (4)$$

$$T_c = T_{\text{cws}} + \frac{Q_c}{F_{\text{cw}}(m_{\text{cw}})} \quad (5)$$

式中: r 为冷水机组的负载率,为冷负荷 Q_e 与额定负荷 Q_{nom} 的比值,即 $r=Q_e/Q_{\text{nom}}$; a_1 、 a_2 为损耗系数,其取值由冷水机组的测试数据决定; T_e 为蒸发温度; T_c 为冷凝温度; T_{chwr} 和 T_{cws} 分别为冷冻水的回水温度和冷凝水的供水温度; Q_c 为冷凝水循环侧的负荷; $F_{\text{chw}}(m_{\text{chw}})$ 、 $F_{\text{cw}}(m_{\text{cw}})$ 分别为关于冷冻水流量 m_{chw} 、冷却水流量 m_{cw} 的经验公式。

2.2 变频水泵模型

暖通空调系统中的水泵主要包括冷冻水泵和冷却水泵,主要为水系统循环提供动力。目前,大多楼宇空调系统中的水泵均以额定功率运行,运行效率偏低。本文假设所有水泵均加装了变频控制系统,以便于控制流量,减小能耗。变频水泵的功率取决于水流量,可表示为:

$$P_{\text{chwpump/cwpump}} = \frac{k_p X_w}{(1 - e^{-A_p X_w}) \eta_{\text{var}}(X_w)} \quad (6)$$

$$X_w = \frac{m_{\text{chw/cw}}}{m_{\text{chw,nom/cw,nom}}} \quad (7)$$

$$\eta_{\text{var}}(X_w) = \chi_0 + \chi_1 X_w + \chi_2 X_w^2 + \chi_3 X_w^3 \quad (8)$$

式中: $P_{\text{chwpump/cwpump}}$ 为冷冻/冷却水泵的功率; $m_{\text{chw,nom/cw,nom}}$ 为冷冻/冷却水流量额定值; k_p 和 A_p 为相关系数; X_w 为水泵水流量比; $\eta_{\text{var}}(X_w)$ 为水泵的机械效率; χ_0 、 χ_1 、 χ_2 、 χ_3 为参数。

2.3 风机盘管模型

风机盘管是暖通空调系统的末端装置,盘管中的冷冻水与室内空气进行热交换,以达到降温的目的。风机盘管的换热过程可表示为:

$$Q_{\text{room},k} = \frac{c_{e,1,k} m_{\text{sa},k}^{c_{e,3,k}}}{1 + c_{e,2,k} (m_{\text{sa},k}/m_{\text{chw},k})^{c_{e,3,k}}} (T_{\text{ma},k} - T_{\text{chws}}) \quad (9)$$

式中: $Q_{\text{room},k}$ 为第 k 台风机盘管对应区域的冷负荷; $m_{\text{sa},k}$ 、 $m_{\text{chw},k}$ 分别为第 k 台风机盘管的风速、盘管内冷冻水流量; T_{chws} 为冷冻水的供水温度; $T_{\text{ma},k}$ 为第 k 台风机盘管风箱内室外空气温度 T^{out} 和室内空气温度 T_k^{in} 的混合温度,可以表示为 $T_{\text{ma},k} = 0.25T^{\text{out}} + 0.75T_k^{\text{in}}$; $c_{e,1,k}$ 、 $c_{e,2,k}$ 、 $c_{e,3,k}$ 为第 k 台风机盘管的参数。盘管内冷冻水流量之和与系统中冷冻水的总流量相等,即满足:

$$\sum_{j=1}^{N_2} m_{\text{chw},j} = \sum_{k=1}^{N_3} m_{\text{chw},k} \quad (10)$$

式中: $m_{\text{chw},j}$ 为第 j 台冷冻水泵内的冷冻水流量。

2.4 冷却塔模型

冷却塔是暖通空调系统的排热装置,通过冷却水循环将室内空气的热量吸收排放至大气中。冷却塔的散热过程可表示为:

$$\sum_{i=1}^{N_1} Q_{e,i} = \sum_{n=1}^{N_5} \frac{c_{e,1,n} m_{\text{ta},n}^{c_{e,3,n}}}{1 + c_{e,2,n} (m_{\text{ta},n}/m_{\text{cw},n})^{c_{e,3,n}}} (T_{\text{cwr}} - T_{\text{wb}}) \quad (11)$$

式中: $Q_{e,i}$ 为第 i 台冷水机组冷却水循环中的冷负荷; $m_{\text{ta},n}$ 、 $m_{\text{cw},n}$ 分别为第 n 台冷却塔中的风速、冷却水流量; T_{cwr} 、 T_{wb} 分别为冷却水的回水温度、冷却塔的湿球温度; $c_{e,1,n}$ 、 $c_{e,2,n}$ 、 $c_{e,3,n}$ 为第 n 台冷却塔的参数。此外,空调系统中冷却水总流量保持不变,即满足:

$$\sum_{m=1}^{N_4} m_{\text{cw},m} = \sum_{n=1}^{N_5} m_{\text{cw},n} \quad (12)$$

式中: $m_{\text{cw},m}$ 为第 m 台冷却水泵内的冷却水流量。

风机盘管和冷却塔的能耗均源自风机,其能耗模型与变频水泵相似,可表示为:

$$P_{\text{coil/tower}} = \frac{k_f X_a}{(1 - e^{-A_f X_a}) \eta_{\text{var}}(X_a)} \quad (13)$$

$$X_a = \frac{m_{\text{sa/ta}}}{m_{\text{sa,nom/ta,nom}}} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{coil/tower}}$ 为风机盘管/冷却塔的能耗; $m_{\text{sa/ta}}$ 为风机盘管/冷却塔的风速; $m_{\text{sa,nom/ta,nom}}$ 为风机盘管/冷却塔的风速额定值; X_a 为风机的风速比; $\eta_{\text{var}}(X_a)$ 为风机的机械效率。

2.5 约束条件

暖通空调系统的约束条件主要包括设备之间的相互作用约束以及变量的物理约束。其中,冷水机组和冷冻水、冷却水循环之间的相互作用约束可分别表示为:

$$\sum_{i=1}^{N_1} Q_{e,i} = \left(\sum_{j=1}^{N_2} m_{\text{chw},j} \right) c_w (T_{\text{chwr}} - T_{\text{chws}}) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} Q_{e,i} = \left(\sum_{m=1}^{N_4} m_{\text{cw},m} \right) c_w (T_{\text{cwr}} - T_{\text{cws}}) \quad (16)$$

式中: $Q_{e,i}$ 为第 i 台冷水机组冷冻水循环中的冷负荷; c_w 为水的比热容。式(16)中,冷却水基于能量平衡原理消除冷却水侧热量,包括压缩机产生的热量以及冷冻水循环侧经蒸发器传输到冷凝器的热量,因此冷却水循环中的冷负荷 $Q_{e,i} = Q_{e,i} + P_{\text{chiller},i}$ 。

为了保障暖通空调系统的运行性能,各控制变量需维持在可接受的范围内,即需满足:

$$T_{\text{chws},\min} \leq T_{\text{chws}} \leq T_{\text{chws},\max} \quad (17)$$

$$T_{\text{cws},\min} \leq T_{\text{cws}} \leq T_{\text{cws},\max} \quad (18)$$

$$m_{\text{chw},j,\min} \leq m_{\text{chw},j} \leq m_{\text{chw},j,\max} \quad (19)$$

$$m_{\text{cw},m,\min} \leq m_{\text{cw},m} \leq m_{\text{cw},m,\max} \quad (20)$$

$$m_{\text{sa},k,\min} \leq m_{\text{sa},k} \leq m_{\text{sa},k,\max} \quad (21)$$

$$m_{\text{ta},n,\min} \leq m_{\text{ta},n} \leq m_{\text{ta},n,\max} \quad (22)$$

式中:下标中的 $\min$ 、 $\max$ 分别表示相应变量的最小值、最大值。

结合式(1)~(22)以及室内温度约束,可分别求解得到在不同的温度约束下或不同的参考温度下暖通空调系统的最低能耗,从而为后续基线负荷以及

最大可削减负荷的计算提供精确的调控模型。

3 负荷聚合商的双层竞价模型

3.1 上层负荷聚合商竞价模型

3.1.1 目标函数

空调负荷聚合商聚合一定数量的公共楼宇,并拥有聚合范围内公共楼宇暖通空调的部分控制权。上层优化模型以最大化负荷聚合商的收益为目标函数,如式(23)所示,其中负荷聚合商的收益主要涉及参与能量市场所获利润、参与备用市场所获利润以及改变空调用户用电行为所需补偿成本3个部分。

$$\max \sum_{t=1}^T \left(C_{l,t}^{\text{EM}} + C_{l,t}^{\text{SRM}} - \sum_{y=1}^Y U_{l,y,t} \right) \quad (23)$$

$$C_{l,t}^{\text{EM}} = \pi_{l,t}^{\text{EM}} q_{l,t}^{\text{EM}} \quad (24)$$

$$C_{l,t}^{\text{SRM}} = \pi_{l,t}^{\text{SRM}} q_{l,t}^{\text{SRM}} \quad (25)$$

$$U_{l,y,t} = \sum_{k=1}^{N_y} \varphi_{l,t} (T_{l,y,k,t}^{\text{in}} - T_{l,y,k,t}^{\text{ref}})^2 \quad (26)$$

式中: T 为所有负荷聚合商参与总调度的时段数量; Y 为负荷聚合商 l 内部聚合的楼宇数量; $C_{l,t}^{\text{EM}}$ 、 $C_{l,t}^{\text{SRM}}$ 分别为时段 t 负荷聚合商 l 参与能量市场、备用市场所获利润; $\pi_{l,t}^{\text{EM}}$ 、 $\pi_{l,t}^{\text{SRM}}$ 分别为时段 t 负荷聚合商 l 在能量市场、备用市场的报价; $q_{l,t}^{\text{EM}}$ 、 $q_{l,t}^{\text{SRM}}$ 分别为时段 t 负荷聚合商 l 在能量市场、备用市场的中标容量; $U_{l,y,t}$ 为室内温度的效用函数,本文用其表示因用户舒适度改变导致的损失补偿成本; $T_{l,y,k,t}^{\text{in}}$ 、 $T_{l,y,k,t}^{\text{ref}}$ 分别为时段 t 负荷聚合商 l 管辖范围内楼宇 y 中区域 k 的室内温度、参考温度; $\varphi_{l,t}$ 为量化经济成本相关系数,反映了用户的用电偏好^[24],该系数由用户在节省成本最大值和舒适度最大值之间取值^[25],具体取值方法见附录A。

3.1.2 约束条件

1) 竞标约束。

负荷聚合商根据日前预测的第二天室外温度,将其代入暖通空调模型,并参考楼宇用户的用电偏好设定室内参考温度范围,得到预测的空调负荷,即基线负荷^[26]。将削减的电量作为非生产性发电资源参与能量及备用市场竞标。时段 t 负荷聚合商 l 在能量市场的竞标容量 $Q_{l,t}^{\text{EM}}$ 、在备用市场的竞标容量 $Q_{l,t}^{\text{SRM}}$ 及其报价 $\pi_{l,t}^{\text{EM}}$ 、 $\pi_{l,t}^{\text{SRM}}$ 需满足下述约束条件:

$$Q_{l,t}^{\text{EM}} + Q_{l,t}^{\text{SRM}} \leq P_{l,t}^{\text{base}} - P_{l,t}^{\text{HVAC}} \quad (27)$$

$$Q_{l,\min}^{\text{EM}} \leq Q_{l,t}^{\text{EM}} \leq Q_{l,\max}^{\text{EM}} \quad (28)$$

$$Q_{l,\min}^{\text{SRM}} \leq Q_{l,t}^{\text{SRM}} \leq Q_{l,\max}^{\text{SRM}} \quad (29)$$

$$(Q_{l,t}^{\text{EM}} - Q_{l,t-1}^{\text{EM}})(\pi_{l,t}^{\text{EM}} - \pi_{l,t-1}^{\text{EM}}) \geq 0 \quad (30)$$

$$(Q_{l,t}^{\text{SRM}} - Q_{l,t-1}^{\text{SRM}})(\pi_{l,t}^{\text{SRM}} - \pi_{l,t-1}^{\text{SRM}}) \geq 0 \quad (31)$$

$$\pi_{l,\min}^{\text{EM}} \leq \pi_{l,t}^{\text{EM}} \leq \pi_{l,\max}^{\text{EM}} \quad (32)$$

$$\pi_{l,\min}^{\text{SRM}} \leq \pi_{l,t}^{\text{SRM}} \leq \pi_{l,\max}^{\text{SRM}} \quad (33)$$

式中: $P_{l,t}^{\text{base}}$ 为时段 t 负荷聚合商 l 的基线负荷; $P_{l,t}^{\text{HVAC}}$

为时段 t 负荷聚合商 l 的空调最低能耗; $Q_{l,\max}^{\text{EM}}$ 、 $Q_{l,\min}^{\text{EM}}$ 和 $Q_{l,\max}^{\text{SRM}}$ 、 $Q_{l,\min}^{\text{SRM}}$ 分别为负荷聚合商 l 经评估后在能量市场和备用市场竞标容量的上、下限,与可削减负荷的上、下限相关,能量市场和备用市场的竞标容量上限之间存在耦合,上限之和不大于可削减负荷的上限,能量市场和备用市场的竞标容量下限之和不小于可削减负荷的下限,同时需满足市场准入条件; $\pi_{l,\max}^{\text{EM}}$ 、 $\pi_{l,\min}^{\text{EM}}$ 和 $\pi_{l,\max}^{\text{SRM}}$ 、 $\pi_{l,\min}^{\text{SRM}}$ 分别为能量市场和备用市场报价的上、下限,报价上限为市场出清价格的上限,报价下限为负荷削减成本。式(27)表示负荷聚合商在能量市场、备用市场的总投标有功功率不应超过其最大可削减负荷量。一旦负荷聚合商的投标容量超过最大可削减负荷量,则该次投标为无效投标,这是因为在这种情况下即使中标,受限于用户的舒适度要求,负荷聚合商通过调控空调运行策略也无法完成中标要求的功率削减值,而差额功率又会面临高额的惩罚费用。式(28)和式(29)表示竞标容量需满足市场要求。式(30)和式(31)表示负荷聚合商的报价曲线为非递减函数。

为了确保能量市场及备用市场的平衡,负荷聚合商的最小竞标容量应满足如下约束条件:

$$\sum_{l=1}^J Q_{l,\min}^{\text{EM}} \geq P_t^{\text{E}} \quad (34)$$

$$\sum_{l=1}^J Q_{l,\min}^{\text{SRM}} \geq P_t^{\text{R}} \quad (35)$$

式中: J 为参与市场出清的负荷聚合商数量; P_t^{E} 、 P_t^{R} 分别为时段 t 能量市场、备用市场的需求量。

2) 公共楼宇的舒适度约束。

对于公共楼宇而言,其室内温度受建筑特性的影响,本文采用基于冷热负荷的建筑模型描述室内温度的变化,如式(36)所示。

$$\gamma_y \frac{dT_{l,y,k,t}^{\text{in}}}{dt} + \beta_y T_{l,y,k,t}^{\text{in}} - (\alpha_y - Q_{l,y,k,t}) = 0 \quad (36)$$

式中: α_y 、 β_y 、 γ_y 为描述楼宇 y 储热特性及天气情况的参数,与墙壁、窗户、楼层等建筑特性以及室外温度相关; $Q_{l,y,k,t}$ 为时段 t 负荷聚合商 l 的暖通空调系统在楼宇 y 中区域 k 的对外输出制冷量,忽略了空调系统的热量损耗。

根据式(36),可以推导得到室内温度的时变方程为:

$$T_{l,y,k,t}^{\text{in}} = e^{-\frac{\beta_y \Delta t}{\gamma_y}} T_{l,y,k,t-1}^{\text{in}} + \left(1 - e^{-\frac{\beta_y \Delta t}{\gamma_y}} \right) \left(\frac{\alpha_y}{\beta_y} - \frac{Q_{l,y,k,t}}{\beta_y} \right) \quad (37)$$

式中: Δt 为单位时段时长。

为了保证在夏季人体感觉的舒适度,需控制公共楼宇的室内温度在一定的范围内,即需满足:

$$T_{\min}^{\text{in}} \leq T_{l,y,k,t}^{\text{in}} \leq T_{\max}^{\text{in}} \quad (38)$$

式中: $T_{\min}^{\text{in}}$ 、 $T_{\max}^{\text{in}}$ 分别为用户能接受的最低、最高室内温度。

3.2 下层多品种电力市场出清模型

电力市场的出清模型参考美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰州市场,考虑能量市场和备用市场联合出清,按出清价格执行结算,电力市场出清的目标函数为最小化能量和备用服务购买成本^[27],如式(39)所示。

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^J (\pi_{l,t}^{\text{EM}} q_{l,t}^{\text{EM}} + \pi_{l,t}^{\text{SRM}} q_{l,t}^{\text{SRM}}) \quad (39)$$

需满足的约束条件如下:

$$\sum_{l=1}^J q_{l,t}^{\text{EM}} = P_t^{\text{E}} : \lambda_t^{\text{EM}} \quad (40)$$

$$\sum_{l=1}^J q_{l,t}^{\text{SRM}} = P_t^{\text{R}} : \lambda_t^{\text{SRM}} \quad (41)$$

$$0 \leq q_{l,t}^{\text{EM}} \leq Q_{l,t}^{\text{EM}} : \bar{\mu}_{l,t}^{\text{EM}}, \underline{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} \quad (42)$$

$$0 \leq q_{l,t}^{\text{SRM}} \leq Q_{l,t}^{\text{SRM}} : \bar{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}}, \underline{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} \quad (43)$$

式(40)的对偶变量 λ_t^{EM} 、式(41)的对偶变量 λ_t^{SRM} 分别对应于能量市场、备用市场的出清价格。式(42)和式(43)的对偶变量分别为 $\bar{\mu}_{l,t}^{\text{EM}}$ 、 $\underline{\mu}_{l,t}^{\text{EM}}$ 和 $\bar{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}}$ 、 $\underline{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}}$ 。式(42)和式(43)分别表示市场出清需满足能量和备用服务需求,即负荷聚合商在能量市场、备用市场的中标容量不大于其所提交的竞标容量。

考虑到上述建立的下层模型为线性模型,本文采用 KKT 条件将下层模型的目标函数转化为对应的约束条件:

$$\pi_{l,t}^{\text{EM}} + \lambda_t^{\text{EM}} + \bar{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} - \underline{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} = 0 \quad (44)$$

$$\pi_{l,t}^{\text{SRM}} + \lambda_t^{\text{SRM}} + \bar{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} - \underline{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} = 0 \quad (45)$$

$$0 \leq \bar{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} \perp (q_{l,t}^{\text{EM}} - Q_{l,t}^{\text{EM}}) \leq 0 \quad (46)$$

$$0 \leq \underline{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} \perp (0 - q_{l,t}^{\text{EM}}) \leq 0 \quad (47)$$

$$0 \leq \bar{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} \perp (q_{l,t}^{\text{SRM}} - Q_{l,t}^{\text{SRM}}) \leq 0 \quad (48)$$

$$0 \leq \underline{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} \perp (0 - q_{l,t}^{\text{SRM}}) \leq 0 \quad (49)$$

$$\bar{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} \geq 0, \underline{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} \geq 0 \quad (50)$$

$$\bar{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} \geq 0, \underline{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} \geq 0 \quad (51)$$

为了避免引入整数变量,本文采用强对偶理论将下层模型中的互补松弛条件式(46)——(49)用强对偶方程式(52)代替^[28]。

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^J (\pi_{l,t}^{\text{EM}} q_{l,t}^{\text{EM}} + \pi_{l,t}^{\text{SRM}} q_{l,t}^{\text{SRM}}) = - \sum_{t=1}^T (\lambda_t^{\text{EM}} P_t^{\text{E}} + \lambda_t^{\text{SRM}} P_t^{\text{R}}) - \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^J (\bar{\mu}_{l,t}^{\text{EM}} Q_{l,t}^{\text{EM}} + \bar{\mu}_{l,t}^{\text{SRM}} Q_{l,t}^{\text{SRM}}) \quad (52)$$

需要说明的是,由于下层为线性规划模型(即强对偶理论成立),因此上述转化是严格成立的。至此,双层优化模型被转化为单层带平衡约束的数学优化模型,如式(53)所示。

$$\begin{cases} \max \sum_{t=1}^T \left(C_{l,t}^{\text{EM}} + C_{l,t}^{\text{SRM}} - \sum_{y=1}^Y U_{l,y,t} \right) \\ \text{s.t. 式(1)—(22)、(24)—(38)、(44)—(52)} \end{cases} \quad (53)$$

其中,式(1)——(22)为暖通空调物理模型,式(23)——(38)为上层聚合商竞价模型,式(39)——(43)为下层电力市场出清模型。通过 KKT 条件及强对偶理论将下层电力市场出清模型转化为式(44)——(52)。采用 GAMS 软件 BARON 求解器求解问题式(53),得出聚合商收益和竞标策略以及市场出清结果。最后根据式(26),计算聚合商需要支付给各楼宇用户的费用,得出利益分配方案。上述模型的求解流程如附录 B 图 B1 所示。

4 算例分析

4.1 模型参数

本文假设共有 6 个负荷聚合商(聚合商 A—F)参与能量和备用市场竞标。以 15 min 为市场出清时段间隔,分析 6 个负荷聚合商在 11:00—13:15 时段的竞标结果。以聚合商 A 为例,其聚合范围内共有 8 栋楼宇,每栋楼宇的参考温度、楼层数及机组信息见附录 C 表 C1,建筑信息参考文献[8],空调系统的具体参数参考文献[29]。同时,聚合商 A 依据公开信息预测对手聚合商的竞标情况,具体结果见附录 C 表 C2—C6。室外温度曲线见附录 C 图 C1。能量市场与备用市场的预测电价参考文献[30],负荷聚合商的报价信息来源于参考文献[1]。采用 GAMS 软件中的 BARON 求解器求解本文所建非线性模型。

4.2 优化结果分析

4.2.1 市场交易结果

各负荷聚合商的中标结果如图 3 所示。可以看出,由于聚合商 B、C 报价较低,市场首先选择购买聚合商 B、C 提供的电量及备用服务。电力市场按照实际报价结算费用,聚合商 A 的投标功率和报价如表 1 所示。聚合商 A 基于对手的报价预测值,在保证中标的前提下,尽量提高自身的报价。同时,由于能量市场的出清价格明显高于备用服务的市场价格,聚合商 A 首先调用较多的资源参与能量市场,剩余资源参与辅助服务市场。

4.2.2 独立顺序出清机制与联合出清机制对比

将独立顺序出清机制与本文所提多品种市场联合出清机制进行对比,以衡量市场出清机制对负荷聚合商收益的影响。在现有模型的基础上,构建独立顺序出清机制并计算负荷聚合商的收益,首先预留固定的备用容量,在能量市场进行出清,并基于能量市场的出清结果,将剩余容量在备用市场进行出清。

聚合商 A 在独立顺序出清机制下的投标功率和

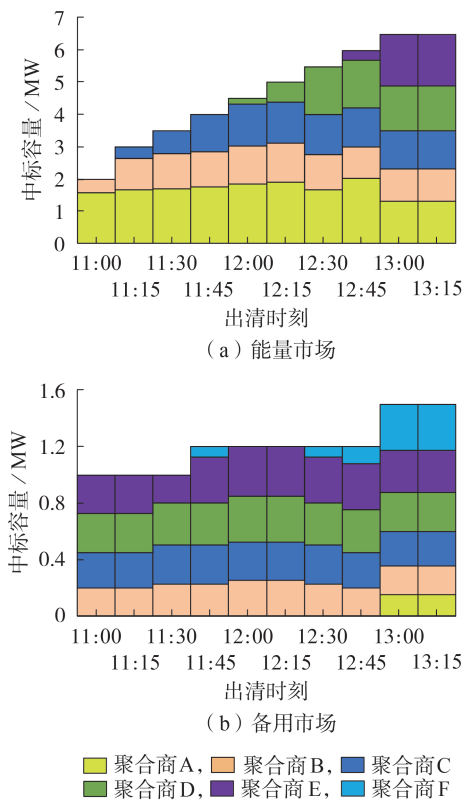


图3 各负荷聚合商的中标结果

Fig.3 Bidding results of each load aggregator

表1 聚合商A的投标功率和报价

Table 1 Bidding power and quotation of Aggregator A

出清时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率 / MW	报价 / [$\$/(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$]	投标功率 / MW	报价 / [$\$/(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$]
11:00	1.574	23.0	0	12.0
11:15	1.654	25.0	0	12.5
11:30	1.692	25.5	0	12.5
11:45	1.756	25.5	0	14.0
12:00	1.830	28.0	0	13.0
12:15	1.904	28.0	0	13.0
12:30	1.650	28.5	0	13.5
12:45	2.006	28.5	0	13.5
13:00	1.300	29.0	0.150	15.0
13:15	1.300	29.0	0.150	15.0

报价如表2所示。对比表2和表1可知,在独立顺序出清机制下,聚合商A需预留容量参与备用市场,因此其参与能量市场的投标功率减小,虽然在11:00、11:30、11:45的报价高于联合出清机制的报价,但由于投标功率减小,其在能量市场的总收益小于联合出清机制下能量市场的总收益。在备用市场中,由于其他负荷代理商也将剩余容量投入备用市场进行投标,聚合商A在备用市场的竞争力下降,各时段备用市场的报价均低于联合出清机制,但由于聚合商A预留的备用容量较多,其在备用市场的总收益大于联合出清机制下备用市场的总收益。

2种出清机制下聚合商A的总投标功率和收益

表2 独立顺序出清机制下聚合商A的投标功率和报价
Table 2 Bidding power and quotation of Aggregator A under independent sequential clearing mechanism

出清时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率 / MW	报价 / [$\$/(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$]	投标功率 / MW	报价 / [$\$/(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}$]
11:00	1.000	25.0	0.138	9.0
11:15	1.354	25.0	0	9.0
11:30	1.150	27.5	0.160	11.5
11:45	1.482	27.5	0	11.5
12:00	1.530	28.0	0	12.0
12:15	1.604	28.0	0	12.0
12:30	1.650	28.5	0	12.5
12:45	1.706	28.5	0	12.5
13:00	1.700	28.0	0	13.0
13:15	1.300	28.0	0.323	13.0

对比如表3所示。由表可知,相较于联合出清机制,独立顺序出清机制下聚合商A在能量市场和备用市场的总投标功率均减小,空调负荷削减需求量也减小,因此用户补偿成本更小。对比2种机制的收益可以看出:独立顺序出清机制虽然提高了聚合商A在备用市场的收益,减小了用户补偿成本,但其在能量市场的收益减少,由于能量市场的价格更高,导致其总收益减小;而在联合出清机制下,聚合商A的收益提高了3.33%。可见,相比于独立顺序出清机制,联合出清机制实现了负荷聚合商在能量和备用市场的协调优化,进而提高了负荷聚合商自身的收益。

表3 2种出清机制下聚合商A的总投标功率和收益

Table 3 Total bidding power and earnings of Aggregator A under two clearing mechanisms

出清机制	能量市场 总投标功率 / MW	备用市场 总投标功率 / MW	削减 负荷 需求 / MW	能量 市场 收益 / \$	备用 市场 收益 / \$	用户 补偿 成本 / \$	总收 益 / \$
独立 顺序 出清	14.5	0.6	15.1	99.7	1.8	12.5	88.9
联合 出清	16.7	0.3	17.0	112.4	1.1	21.6	91.9

4.2.3 空调负荷控制策略

负荷聚合商通过改变空调系统的冷却水温度、冷冻水温度、流速、风速等来控制室内温度及空调系统的耗能。以酒店2的暖通空调系统为例,其在11:00—12:00时段的控制策略见表4,聚合商A内部各楼宇的室内温度如图4所示。暖通空调系统主要采用“大温差-小流量”的控制策略,在该策略下,流量及风速均跟踪制冷量的变化趋势,有利于减小水泵能耗。暖通空调系统的能效比接近5.0,明显高于当前大多数暖通空调系统的能效比(system coefficient of performance, SCOP),运行效果得到显著提高。由图4可知,相比于当前采用的启停控制、周期

性轮停等控制策略,本文所提柔性控制策略可以减少室内温度的波动,降低用户体感的不舒适度。

表 4 酒店 2 暖通空调的控制策略

Table 4 Control strategy of HVAC in Hotel 2

出清时刻	控制变量					SCOP ($Q_c/P_{H\text{VAC}}$)
	$T_{\text{chws}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{chwr}}/^\circ\text{C}$	$m_{\text{chw}}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_{\text{sa}}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	Q_c/kW	
11:00	4.33	13.00	32.66	5.04	2 386.51	5.11
11:15	4.45	13.00	34.14	5.24	2 460.88	5.15
11:30	4.43	13.00	33.83	5.13	2 445.37	5.15
11:45	4.17	13.00	30.84	4.54	2 296.61	5.07
12:00	4.00	12.83	29.27	4.09	2 179.69	4.98

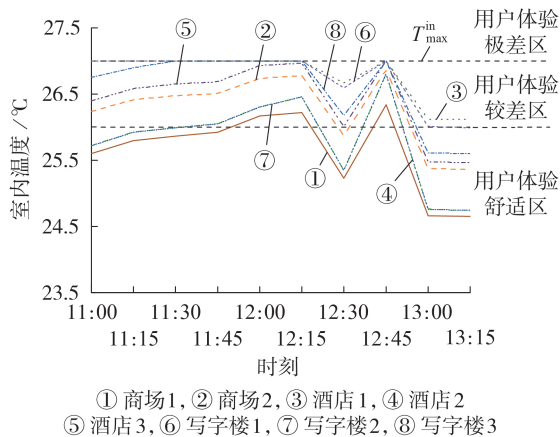


图 4 各楼宇的室内温度

Fig.4 Indoor temperature of each building

4.2.4 不同舒适度范围下空调用户的响应能力分析

空调用户通过调整舒适度范围以改变其参与市场的响应负荷。根据式(26),负荷聚合商向参与聚合的空调用户提供舒适度补偿,以此激励更多的空调用户参与聚合调控,进而提高其参与市场的收益。以聚合商 A 内部的商场 1 为例,其舒适度范围与响应负荷、所获补偿的关系如表 5 所示。由表可知,对于商场 1 而言,扩大舒适度调控范围,其可提供的响应负荷、响应负荷占总调度负荷的比例、所获补偿及其占比均增大。因此,用户通过牺牲舒适度可获得更高的市场收益,此时空调负荷的响应能力与可调控潜力更高。空调用户可根据自身的舒适度与经济性进行衡量,选择合适的温度调整范围以参与负荷调控。

表 5 商场 1 的响应负荷与所获补偿

Table 5 Response load and obtained compensation of Mall 1

舒适度调控范围/ $^\circ\text{C}$	响应负荷/ kW	响应负荷占总调度负荷的比例/ $\%$	所获补偿/ $\text{\$/}$	所获补偿占比/ $\%$
24.0~24.5	405.80	2.40	739.06	3.40
24.0~25.0	587.13	3.45	1 250.34	5.65
24.0~25.5	696.54	4.43	1 735.57	8.98
24.0~26.0	959.81	5.27	2 846.23	10.66

5 结论

本文提出了一种基于暖通空调工作原理的优化模型,并考虑空调用户在负荷聚合商代理下参与能量和备用市场。在负荷聚合商竞价层面,构建了双层竞价模型;在负荷管理层面,根据舒适度变化计算调度空调负荷给用户带来的损失,并对用户进行经济补偿。基于算例仿真结果可得如下结论:

1) 负荷聚合商聚合一定数量的公共楼宇,实现对空调资源的统一管理及调控,形成可靠的需求侧资源参与能量和备用市场,可为电网调控提供灵活性资源支撑,并获取可观的经济利润;

2) 暖通空调的柔性控制策略能准确跟踪负荷,从而提高暖通空调的运行效率,减少设备启停,延长空调寿命;

3) 电力市场多品种能量-备用联合出清机制有助于电网侧更充分地利用需求侧资源,为空调负荷聚合商提供合理的市场价格信息。

需要说明的是,本文所提负荷聚合商投标策略未考虑因不确定性因素带来的风险。在后续研究中,笔者将采用条件风险模型、信息间隙决策等理论量化不确定性对负荷聚合商风险收益的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555. GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [2] 刘萌,梁雯,张岩,等. 计及空调负荷群控制的源-荷协同优化调度模型[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1230-1238. LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Yan, et al. Cooperative generation-load optimal dispatching model considering air-conditioning load group control[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1230-1238.
- [3] 陈胜,卫志农,顾伟,等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革:多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 3-12. CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12.
- [4] 冯小峰,林国营,徐青山,等. 集群空调负荷双层动态优化调度决策方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 29-38. FENG Xiaofeng, LIN Guoying, XU Qingshan, et al. Bi-level dynamic optimization dispatch decision method for cluster air-conditioning loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 29-38.
- [5] 朱宇超,王建学,曹晓宇. 中央空调负荷直接控制策略及其可调度潜力评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 227-234. ZHU Yuchao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Direct control strategy of central air-conditioning load and its schedulable potential evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 227-234.
- [6] 艾欣,赵阅群,周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性

- 研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1596-1603.
- AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1596-1603.
- [7] 辛洁晴, 吴亮. 商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 49-54.
- XIN Jieqing, WU Liang. Hierarchical strategies for duty cycling control of air conditioners in business buildings [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 49-54.
- [8] 徐青山, 杨辰星, 颜庆国. 计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 156-163.
- XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo. Strategy of day-ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large-scale air conditioning loads [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 156-163.
- [9] 程林, 万宇翔, 张放, 等. 基于负荷聚合商业业务的空调服务运作模式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 8-16.
- CHENG Lin, WAN Yuxiang, ZHANG Fang, et al. Operation mode and control strategy for air-conditioning service based on business of load aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 8-16.
- [10] 王永权, 张沛超, 姚姝. 聚合大规模空调负荷的信息物理建模与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6509-6521.
- WANG Yongquan, ZHANG Peichao, YAO Yao. Cyber-physical modeling and control method for aggregating large-scale ACLs [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6509-6521.
- [11] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318-1327.
- [12] 王永权, 张沛超, 姚姝. 空调负荷的混合逻辑动态建模和自治控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 175-181.
- WANG Yongquan, ZHANG Peichao, YAO Yao. Mixed logical dynamic modeling and autonomous control method for ACLs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 175-181.
- [13] 任惠, 陆海涛, 卢锦玲, 等. 考虑信息物理系统耦合和用户响应差异的负荷聚合商需求响应特性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3927-3936.
- REN Hui, LU Haitao, LU Jinling, et al. Analysis of LA demand response characteristics considering cyber physical system coupling and user's response difference [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3927-3936.
- [14] 刘敦楠, 刘明光, 王文, 等. 充电负荷聚合商参与绿色证书交易的运营模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 1-9.
- LIU Dunnan, LIU Mingguang, WANG Wen, et al. Operation mode and key technology of charging load aggregator participating in green certificate trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 1-9.
- [15] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
- GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [16] 许蔚. 考虑可中断负荷的备用辅助服务交易与定价问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- XU Wei. The study of reserve ancillary service trading and pricing considering interruptible load [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [17] YANG H M, ZHANG S M, QIU D, et al. Distributionally robust optimal bidding of controllable load aggregators in the electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1089-1091.
- [18] 贾雨龙, 米增强, 余洋, 等. 计及不确定性的柔性负荷聚合商随机-鲁棒投标决策模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4096-4107.
- JIA Yulong, MI Zengqiang, YU Yang, et al. Stochastic-robust decision-making model for flexible load aggregator considering uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4096-4107.
- [19] MAHDAVI N, BRASLAVSKY J H. Modelling and control of ensembles of variable-speed air conditioning loads for demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4249-4260.
- [20] 孙伟卿, 刘晓楠, 向威, 等. 基于主从博弈的负荷聚合商日前市场最优定价策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 159-167.
- SUN Weiqing, LIU Xiaonan, XIANG Wei, et al. Master-slave game based optimal pricing strategy for load aggregator in day-ahead electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 159-167.
- [21] TAVAKKOLI M, FATTACHEIAN-DEHKORDI S, POURAKBARI-KASMAEI M, et al. Bonus-based demand response using Stackelberg game approach for residential end-users equipped with HVAC system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 234-249.
- [22] 刘晓峰, 高丙团, 罗京, 等. 基于非合作博弈的居民负荷分层调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 54-60.
- LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LUO Jing, et al. Non-cooperative game based hierarchical dispatch model of residential loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 54-60.
- [23] LU L, CAI W J, CHAI Y S, et al. Global optimization for overall HVAC systems-part I: problem formulation and analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(7/8): 999-1014.
- [24] CUI S C, WANG Y W, XIAO J W. Peer-to-peer energy sharing among smart energy buildings by distributed transaction [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6491-6501.
- [25] LI S, ZHANG W, LIAN J, et al. Market-based coordination of thermostatically controlled loads-part I: a mechanism design formulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(2): 1170-1178.
- [26] 杨辰星. 公共楼宇空调负荷参与电网调峰关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- YANG Chenxing. Research on key technologies for peak load shaving by public buildings' air conditioning loads [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [27] KARDAKOS E G, SIMOGLU C K, BAKIRTZIS A G. Optimal offering strategy of a virtual power plant: a stochastic bi-level approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 794-806.
- [28] CHEN S, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Operational equilibria of electric and natural gas systems with limited information interchange [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 662-671.
- [29] YAO Y, CHEN J. Global optimization of a central air-conditioning system using decomposition-coordination method [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(5): 570-583.
- [30] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 等. 能量和旋转备用市场下虚拟电厂热电联合调度鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3118-3128, 3367.
- SUN Guoqiang, ZHOU Yizhou, WEI Zhinong, et al. Thermal and electrical scheduling of a virtual power plant for partici-

pating in energy and spinning reserve markets based on robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3118-3128, 3367.

作者简介:

吴心弘(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事电力市场机制设计方面的研究工作(E-mail: wu_xinhong@zj.sgcc.com.cn);



吴心弘

潘玲玲(1985—),女,高级工程师,硕士,从事综合能源系统运行优化方面的研究工作(E-mail: panlingling@epri.sgcc.com.cn);

王泽荣(1980—),男,高级工程师,硕士,从事综合能源市场机制设计方面的研究工作(E-mail: 65981507@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Bidding strategy of air conditioning load aggregator for energy-reserve multi-variety power trading

WU Xinhong¹, PAN Lingling², WANG Zerong¹, ZHOU Jing², WANG Yong²

(1. State Grid Zhejiang Integrated Energy Service Company, Hangzhou 310014, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The opening of bilateral electricity market provides a new opportunity for the heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) load of public buildings to participate in the electricity market as demand-side resources. In order to explore the regulation potential of air conditioning load in the peak periods of power consumption, according to the operation principle of HVAC and based on the energy conservation law, the thermodynamic principle, the principle of mass conservation, and so on, the physical model of HVAC in public buildings is established and the flexible control strategy of HVAC is put forward. Considering that air conditioning users participate in the energy market and reserve market under the unified coordination of load aggregators, a bi-level bidding model of load aggregators for energy-reserve multi-variety power trading is constructed. The upper level is the bidding model of load aggregators and the lower level is the clearing model of electricity market. Based on KKT condition and duality theory, the bi-level optimization problem is transformed into a single-level optimization model with equilibrium constraints to achieve efficient solution of the model. The simulative results verify the effectiveness of the proposed bidding model.

Key words: air conditioning load; load aggregators; multi-variety power trading; energy market; reserve market

附录 A

将暖通空调设置 5 个舒适度设置选项，如表 A1 所示，根据 GridWise 演示项目中使用的用户界面（如图 A1 所示）调整用户偏好系数。本文设置的经济成本相关系数参考该表格，在最大舒适度和平衡舒适度两个档位之间取值，即聚合商更偏向于舒适度。

表 A1 舒适度设置

Table A1 Comfort level setting

暖通空调舒适度设置	经济成本相关系数
最大经济性	2.0
平衡经济性	1.5
平衡	1.0
平衡舒适度	0.5
最大舒适度	0



图 A1 GridWise 演示项目中使用的用户界面

Fig.A1 User interface used in GridWise project

附录 B

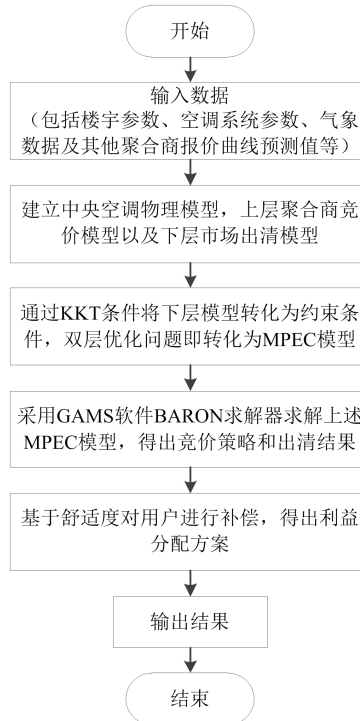


图 B1 模型求解流程

Fig.B1 Flowchart of solving model

附录 C

表 C1 楼宇及其暖通空调设备参数

Table C1 Parameters of buildings and their HVACs

楼宇	参考温度/℃	楼层数	配备机组 (额定功率(kW)×台数)	经济成本量化系数
商场 1	23	12	1230×2	0.0115
商场 2	24	12	1580×2, 1230×1	0.0125
酒店 1	24.5	19	1580×2, 1230×2	0.012
酒店 2	23	13	1580×2, 1230×1	0.011
酒店 3	24	12	1580×1, 1230×1	0.0115
写字楼 1	24.5	19	1580×2, 1230×1	0.012
写字楼 2	23	13	1580×1, 1230×2	0.011
写字楼 3	24	17	1580×1, 1230×2	0.0115

表 C2 聚合商 B 的投标功率和能量报价

Table C2 Bidding capacity and price of Aggregator B

时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率/MW	能量报价/[\$/(MW·h)]	投标功率/MW	备用报价/[\$/(MW·h)]
11:00	1	23	0.2	7
11:15	1	23	0.2	7
11:30	1.1	23.5	0.225	7.5
11:45	1.1	23.5	0.225	7.5
12:00	1.2	24	0.25	8
12:15	1.2	24	0.25	8
12:30	1.1	23.5	0.225	7.5
12:45	1	23	0.2	7
13:00	1	23	0.2	7
13:15	1	23	0.2	7

表 C3 聚合商 C 的投标功率和能量报价

Table C3 Bidding capacity and price of Aggregator C

时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率/MW	能量报价/[\$/(MW·h)]	投标功率/MW	备用报价/[\$/(MW·h)]
11:00	1.2	25	0.25	9
11:15	1.2	25	0.25	9
11:30	1.4	25.5	0.275	9.5
11:45	1.4	25.5	0.275	9.5
12:00	1.4	25.5	0.275	9.5
12:15	1.4	25.5	0.275	9.5
12:30	1.4	25.5	0.275	9.5
12:45	1.2	25	0.25	9
13:00	1.2	25	0.25	9
13:15	1.2	25	0.25	9

表 C4 聚合商 D 的投标功率和能量报价
Table C4 Bidding capacity and price of Aggregator D

时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率/MW	能量报价/[\$/(MW·h)]	投标功率/MW	备用报价/[\$/(MW·h)]
11:00	1.4	27	0.275	11
11:15	1.4	27	0.275	11
11:30	1.5	27.5	0.3	11.5
11:45	1.5	27.5	0.3	11.5
12:00	1.6	28	0.325	12
12:15	1.6	28	0.325	12
12:30	1.5	27.5	0.3	11.5
12:45	1.5	27.5	0.3	11.5
13:00	1.4	27	0.275	11
13:15	1.4	27	0.275	11

表 C5 聚合商 E 的投标功率和能量报价
Table C5 Bidding capacity and price of Aggregator E

时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率/MW	能量报价/[\$/(MW·h)]	投标功率/MW	备用报价/[\$/(MW·h)]
11:00	1.6	28	0.3	12
11:15	1.6	28.5	0.325	12.5
11:30	1.7	28.5	0.325	12.5
11:45	1.7	28.5	0.325	12.5
12:00	1.7	29	0.35	13
12:15	1.7	29	0.35	13
12:30	1.7	28.5	0.325	12.5
12:45	1.7	28.5	0.325	12.5
13:00	1.6	28	0.3	12
13:15	1.6	28	0.3	12

表 C6 聚合商 F 的投标功率和能量报价
Table C6 Bidding capacity and price of Aggregator F

时刻	能量市场		备用市场	
	投标功率/MW	能量报价/[\$/(MW·h)]	投标功率/MW	备用报价/[\$/(MW·h)]
11:00	1.7	29	0.325	13
11:15	1.7	29	0.325	13
11:30	1.8	29.5	0.35	13.5
11:45	1.9	30	0.375	14
12:00	1.9	30	0.375	14
12:15	1.9	30	0.375	14
12:30	1.8	29.5	0.35	13.5
12:45	1.8	29.5	0.35	13.5
13:00	1.7	29	0.325	13
13:15	1.7	29	0.325	13

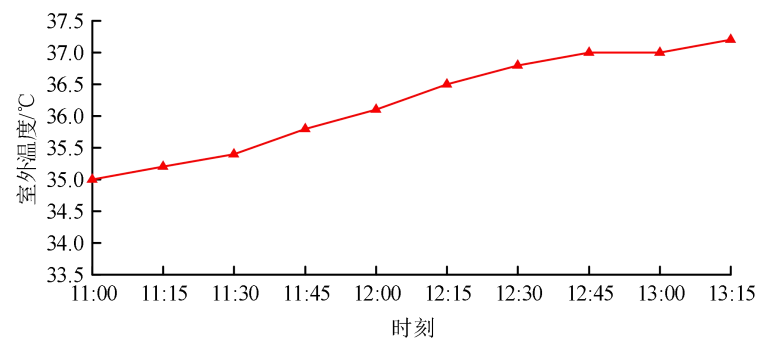


图 C1 室外温度曲线

Fig.C1 Outdoor temperature curve