

一种应用于智能电网的建筑电力负荷互动管理策略

薛 雪^{1,2}, 石文星¹, 孙 天², 袁宜峰²

(1. 清华大学 建筑学院 建筑技术科学系, 北京 100083; 2. 深圳达实智能股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要:电力供需失衡是电网运营面临的一个严峻问题,电力的供给侧和需求侧通过有效管控均能舒缓和解决该问题。采用电力动态定价和建筑热质蓄能量化的思路,提出一种智能电网与建筑进行信息交互的电力负荷管理框架及策略,为智能电网实现“移峰填谷”及提升负荷系数提供新的参考模式。应用简化的建筑热物理模型和若干建筑室内温度控制策略快速评估建筑电力需求响应能力。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:建筑;智能电网;负荷管理;需求响应;动态定价;电力成本节省

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.015

0 引言

近年来,人们在智能电网领域进行了大量研究,尤其在电气设备及系统、传感和测量技术、信息和通信技术、决策支持系统和自动控制策略等方面做出了较大的贡献^[1-12]。但上述研究多数仅关注智能电网的电力供给侧层面,少有关电力需求侧层面,例如,建筑作为用电大户在电力供需失衡方面可发挥的正面作用及其与电力供给之间存在的博弈关系。实际上,建筑作为电力需求侧的主要用户,在帮助电网“移峰填谷”缓解电力失衡方面具有巨大潜力。

随着智能电表的应用和普及,如今住宅建筑也能参与智能电网的深度整合和优化^[13]。与住宅建筑相比,商业建筑在建筑类别总用电量占比较大,该比例在市区尤为明显(例如,香港的商业建筑用电量占比超过建筑总电量的65%^[14])。关于商业建筑与电网的大量研究目前主要仍是集中在各类主动蓄能(如冰蓄冷)及被动蓄能(如建筑热质蓄能^[15-16])应用等方面。

商业建筑的电力负荷管理通常主要关注其中央空调系统的电力负荷管理,原因有二:中央空调系统用电量在商业建筑总电量占比超过45%^[17];中央空调系统的电力负荷管理可通过楼宇自控系统BAS(Building Automation System)进行灵活、有效的调控。以往关于中央空调系统需求侧响应控制策略的研究多数是基于特定电价进行的运营成本优化^[18],但这类建筑电力负荷管理策略的研究是在一种单向、被动的电价环境下进行的,缺乏考虑电价及用户响应能力变化的互动。商业建筑电力负荷管理与智能电网电价博弈方面的研究更加少见。电网的实际运行规划仍是依据终端电力用户的历史用电数据汇总后进行电力预测,并加上一定比率的冗余备用电力进行实际运作,这种传统方法很可能造成电网电力资源的极大浪费。

为了实现建筑在电力需求侧舒缓电网供需失

衡,并协助电网提前了解终端用户的用电需求及其在动态电价下的用电“弹性”,本文通过电力动态定价和建筑热质蓄能量化,提出了一种智能电网与建筑进行信息交互的电力负荷管理框架及策略。利用建筑的用能信息(如单体建筑电力负荷的“移峰填谷”潜力、群体建筑电力负荷的集总曲线等数据)为智能电网的发电安排、调度安排、降低冗余备用电力比率以及动态定价提供参考。值得一提的是,建筑的用能信息可通过楼宇自控系统获取,同时楼宇自控系统又能成为商业建筑融入智能电网的对接基础平台,该平台为电网供需两侧的实时互动提供了可行的技术基础。

1 建筑热物理模型与负荷管理

商业建筑的电力负荷通常由建筑中的各类机电系统及设备负荷(如空调、照明、电机、电梯等)组成。照明及其他机电设备的电力需求通常为即时性的“刚性需求”,其所需求的负荷不具有可变的“弹性”或“滞后性”特征。由于建筑热质(如建筑混凝土结构及建筑材料等)具备一定的蓄冷蓄热能力以及空调系统用能具有较大滞后性的运行特点,相较于其他机电系统,空调系统的电力负荷则具有更多的非即时性的用电“弹性”,因此,建筑热质的热物理特性(例如热阻和热容)对于热能存储和空调负荷曲线管理而言尤为重要^[19]。由于建筑热质广泛存在于既有建筑和新建建筑,本文针对建筑热质的蓄热能力及其特性进行研究。

例如在我国南方的夏季,商业建筑的冷负荷往往与电网的尖峰负荷重叠,因而加剧了夏季电网电力供需失衡,进而造成需要“拉闸限电”的情况。针对电网区域级/城市级的应用,商业建筑的冷负荷及负荷曲线的非即时性“弹性”特征可通过采用简化的建筑热物理模型^[20],结合该建筑空调系统短期(如最近2周内)供冷运行数据进行分析、评估和预测得到^[16]。当建筑及其空调系统的相关参数确定后,未来供冷期(如次日供冷周期)的冷负荷即可快

速而准确地计算出来^[21]。该建筑电力负荷响应能力也可通过比较空调系统不同的控制策略计算得到。

1.1 简化的建筑热物理模型

本文采用一种简化的建筑热物理模型和空调系统短期供冷运行数据对建筑的冷负荷进行预测。本文主要考虑我国南方地区夏季供冷季节中央空调系统在建筑电力负荷互动的情形,暂未考虑建筑热负荷的情形。事实上,建筑热负荷的预测及其相关应用也可采用本文描述的建筑热物理模型和对应方法进行评估。简化的建筑热物理模型如图 1 所示,其主要由 2 个子模块组成:由 3 个热阻和 2 个热容表征的建筑围护结构(如建筑外墙和屋顶)模块(3R2C 模块);由 2 个热阻和 2 个热容表征的建筑内部结构及材料(如内墙、楼板、隔板、家具等)模块(2R2C 模块)。图中, C 和 R 分别为热容和热阻; T 为温度; Q 为传热负荷; t 为时间;下标“ i ”为不同朝向墙体编号,“rf”表示屋顶,“e”表示外墙,“in”表示室内空气,“im”表示建筑内部“热质”,“r”表示热辐射,“conv”表示热对流,“fr”表示新风,“la”表示潜热得热,“act”表示当前冷负荷,“win”表示窗户,“sol”表示太阳辐射,“out”表示室外。

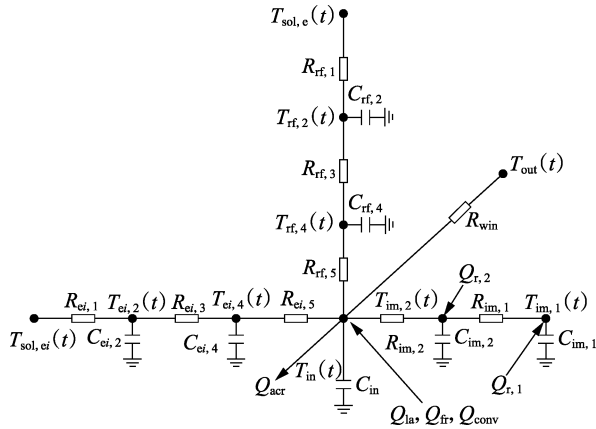


图 1 简化的建筑热物理模型

Fig.1 Simplified thermal physical model of building

根据热平衡原理,建筑的空调负荷可由下列公式计算得到:

$$C_{rf,2} \frac{dT_{rf,2}(t)}{dt} = \frac{T_{sol,rf}(t) - T_{rf,2}(t)}{R_{rf,1}} - \frac{T_{rf,2}(t) - T_{rf,4}(t)}{R_{rf,3}} \quad (1)$$

$$C_{rf,4} \frac{dT_{rf,4}(t)}{dt} = \frac{T_{rf,2}(t) - T_{rf,4}(t)}{R_{rf,3}} - \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} \quad (2)$$

$$C_{ei,2} \frac{dT_{ei,2}(t)}{dt} = \frac{T_{sol,ei}(t) - T_{ei,2}(t)}{R_{ei,1}} - \frac{T_{ei,2}(t) - T_{ei,4}(t)}{R_{ei,3}} \quad (3)$$

$$C_{ei,4} \frac{dT_{ei,4}(t)}{dt} = \frac{T_{ei,2}(t) - T_{ei,4}(t)}{R_{ei,3}} - \frac{T_{ei,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,5}} \quad (4)$$

$$C_{im,1} \frac{dT_{im,1}(t)}{dt} = Q_{r,1} - \frac{T_{im,1}(t) - T_{im,2}(t)}{R_{im,1}} \quad (5)$$

$$C_{im,2} \frac{dT_{im,2}(t)}{dt} = Q_{r,2} + \frac{T_{im,1}(t) - T_{im,2}(t)}{R_{im,1}} - \frac{T_{im,2}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,2}} \quad (6)$$

$$Q_{est} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{ei,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{ei,5}} + \frac{T_{rf,4}(t) - T_{in}(t)}{R_{rf,5}} + \frac{T_{im,2}(t) - T_{in}(t)}{R_{im,2}} + \frac{T_{out}(t) - T_{in}(t)}{R_{win}} - C_{in} \frac{dT_{in}(t)}{dt} + (Q_{conv} + Q_{fr} + Q_{la}) \quad (7)$$

其中, Q_{est} 为预测冷负荷; $R_{rf,s}$ 为建筑楼顶屋面的热阻; n 为建筑墙体朝向的总数量,本文中 $n=4$ (建筑的 4 个朝向面)。建筑围护结构的热容与热阻通过建筑材料理论频率响应特性曲线的比较来进行验证,并由遗传算法拟合得出。而建筑内部结构及材料的热容与热阻则通过训练及最小化预测冷负荷与实际冷负荷的方差拟合回归得出。

1.2 简化的建筑蓄热模型

由于建筑热力系统的动态特性及室内外条件,中央空调系统的电力需求侧响应能力主要来自制冷及供冷过程(供热过程同样如此)。为了测算建筑蓄热材料转移冷负荷的能力,本文提出了一种简化的建筑蓄热模型以进一步量化建筑热质蓄能能力。

简化的建筑蓄热模型如图 2 所示,假设建筑材料为匀质等温的蓄热材料。本文研究采用等效温度 T_{bui} 来表征建筑材料的热力初始状态。在该建筑蓄热模型中,假设热辐射换热量、对流换热量、显热量和潜热量在采用不同控制策略前后不变。建筑材料的热力特性也可用热容和热阻表征。根据该建筑蓄热模型建立了如式(8)所示的能量平衡方程,对其进行求解可得到建筑蓄热材料的能量状态方程,如式(9)所示。

$$C_{bui} \frac{dT_{bui}(t)}{dt} A_{bui} = \frac{T_{out} - T_{bui}(t)}{R_{bui,o}} A_{bui} + \frac{T_{in} - T_{bui}(t)}{R_{bui,i}} A_{bui} + Q_{rad} \quad (8)$$

$$T_{bui}(t) = T_{ext} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + T_{bui}(0) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

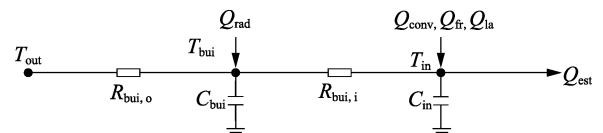


图 2 简化的建筑蓄热模型

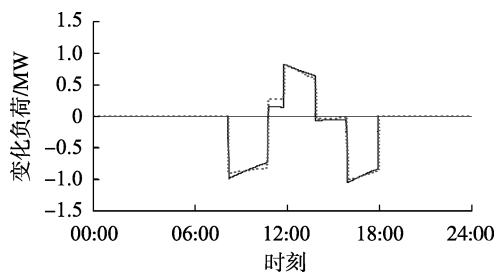
Fig.2 Simplified thermal storage model of building

$$T_{\text{ext}} = \left(\frac{T_{\text{out}}}{R_{\text{bui,o}}} + \frac{T_{\text{in}}}{R_{\text{bui,i}}} + \frac{Q_{\text{rad}}}{A_{\text{bui}}} \right) R_{\text{bui}} \quad (10)$$

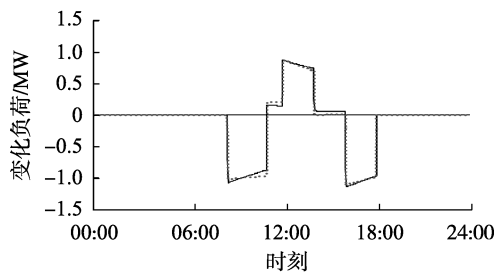
其中, C_{bui} 为建筑的热容; A_{bui} 为建筑的有效换热面积; $T_{\text{bui}}(0)$ 为建筑蓄热材料的初始温度; T_{ext} 为外部热源温度(如室内外空气、室内外热辐射等); Q_{rad} 为建筑内外表面所能吸收的热辐射得热量; R_{bui} 为建筑的热阻, 其定义为 $R_{\text{bui}} = R_{\text{bui,o}} R_{\text{bui,i}} / (R_{\text{bui,o}} + R_{\text{bui,i}})$; τ 为建筑蓄热材料的时间常数, 其定义为 $\tau = R_{\text{bui}} C_{\text{bui}}$ 。

尽管不同类型的商业建筑(如轻型建筑、中型建筑和重型建筑)有不同的蓄热能力和能效表现, 该储热模型都可以较好地表征它们的热物理特性和潜在供冷减少量。在该蓄热模型中, 建筑的热容 C_{bui} 和热阻 $R_{\text{bui,i}}$ 、 $R_{\text{bui,o}}$ 都可通过建筑空调系统的历史运行数据来标定。

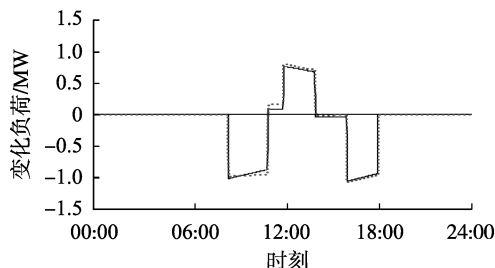
图3为在典型夏日采用室内温度重新设定控制策略的验证结果。在该验证测试中, 08:30—11:00、16:00—18:00, 室内设定温度为 25.5℃; 12:00—14:00, 室内设定温度为 23℃; 其余上班时间段室内设定温度为 24℃。测试结果表明, 该建筑蓄热模型应用于轻型建筑、中型建筑和重型建筑中的平均误差分别



(a) 轻型建筑



(b) 中型建筑



(c) 重型建筑

— 预测变化量, 实际变化量

图3 简化的建筑蓄热模型验证结果

Fig.3 Validation results of simplified thermal storage model of building

为 14.40%、4.88% 以及 6.37%。

1.3 空调系统的负荷管理

商业建筑空调负荷管理的基本原理是其中央空调系统在非办公时间段通过预冷控制提前将冷量存储在建筑热质中, 在办公时间段则通过设定室内温度的控制策略将存储在建筑热质中的冷量再次释放出来, 从而实现空调负荷在时间维度上的转移。中央空调系统的电力负荷因而也伴随着空调负荷的转移实现了建筑总用电维度的“移峰填谷”。

如前所述, 建筑冷负荷是评估电力需求侧响应潜力的前提, 因此非常有必要找出影响建筑冷负荷的关键因素。除建筑热物理特性外, 建筑冷负荷还受室外天气和室内潜热、显热、辐射得热等因素影响。简化的建筑热物理模型中参数可通过空调系统短期供冷运行数据训练得到。室外天气信息通常从当地气象局(台)获取, 室内得热情况则由现场调研获取。为保证室内人员的热舒适性, 在办公时间段室内的温湿度将严格控制在一定的舒适区间内; 但在非办公时间(如夜间)则可不考虑人体热舒适性, 室内温度下调至低于舒适性空调规定值, 从而使得空气中的冷量储存进建筑热质中。中央空调系统的电力负荷峰值时段便可通过冷量存储和释放的过程转移到非峰值时段。

以非办公时间不设定预冷模式为控制策略参考基准(即基准线), 本文就单体建筑分别提出 9 组预冷控制策略。控制策略参考基准设定为: 09:00—18:00 的办公时间段室内温度设定为 23.0℃, 18:00 至次日 09:00 的非办公时间段室内温度设定为 26.5℃。表 1 为冷负荷管理的温度控制策略, 9 组预冷控制策略在办公时间段的室内温度设定值同样为 23.0℃, 在预冷时段则由 3 组不同预冷模式(轻度预冷、中度预冷、深度预冷)和 3 个不同预冷温度设定值(18.5℃、19.5℃、20.5℃)组成。例如, 中度预冷控制策略在 03:00—09:00(即在办公时间开始前的 6 h 预冷)室内空气温度设定值为 19.5℃, 在办公时间段室内空气温度设定值为 23.0℃, 其余时间室内空气温度设定值为 26.5℃。

表 1 冷负荷管理的温度控制策略

Table 1 Temperature control strategies for cooling load management

室内空气预冷 温度设定值/℃	预冷时长/h		
	轻度预冷	中度预冷	深度预冷
20.5	3	6	9
19.5	3	6	9
18.5	3	6	9

建筑中央空调系统不同的预冷控制策略对应不同的冷负荷曲线, 将它们与控制策略参考基准的冷

负荷曲线进行对比,即可评估该建筑的冷负荷需求侧响应能力。下文给出了建筑的冷负荷需求侧响应能力的例子。在典型夏日,通过当地(香港)气象局(台)获取当天的天气信息(如室外干球温度和太阳辐射量等),同时考虑建筑室内得热情况(包括人员、设备、照明、新风等的显热和潜热),该建筑热物理模型参数已通过空调系统短期供冷运行数据的训练和验证得到:建筑热质的热阻分别为 $R_{ei,1}=0.083\ 5\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、 $R_{ei,3}=0.132\ 2\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、 $R_{ei,5}=0.164\ 4\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、 $R_{im,1}=0.299\ 42\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、 $R_{im,2}=0.028\ 18\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$,建筑热质的热容分别为 $C_{ei,2}=253\ 820\ \text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $C_{ei,4}=352\ 850\ \text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $C_{im,1}=1\ 648\ 729\ \text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $C_{im,2}=73\ 793\ \text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

不同控制策略对应的建筑冷负荷曲线因而可提前预估(通常提前一天),假设中央空调系统的整体性能系数 COP(Coefficient Of Performance)为固定值(本文取为 2),中央空调系统的电力负荷也可作对应预估。对比基准线,表 2 列出了建筑在不同预冷情形下的能效情况。

表 2 建筑热质的热物理特性

Table 2 Thermal physical characteristics of building thermal mass

预冷 温度/℃	预冷 时长/h	能量储存 效率/%	能耗增加 比例/%	负荷转移 比例/%
20.5	3	80.66	1.00	3.77
	6	64.32	2.96	4.78
	9	54.38	4.94	5.32
19.5	3	79.60	1.24	4.32
	6	63.43	3.54	5.50
	9	53.70	5.84	6.13
18.5	3	81.05	1.30	5.03
	6	64.51	3.92	6.37
	9	54.52	6.54	7.10

与常规控制策略相比,中央空调系统能耗虽在预冷阶段增加了,但在办公时间段却相应减少了。测试结果表明,建筑实现了办公时间段(09:00—18:00)的电力负荷转移。在上述算例中,轻度预冷模式的蓄能效率最高;在延长预冷时间及降低预冷设定温度的情况下,负荷转移比例随之增高。控制策略对应的蓄能效率越低,则表明其额外能耗增加比例越高。蓄能效率、平均能量储存效率、能耗增加比例、负荷转移比例的定义分别如式(11)—(14)所示。

$$\eta = \frac{E_{\text{dis}}}{E_{\text{ch}}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\eta_{\text{avg}} = \frac{\eta_{3\text{hrs}} + \eta_{6\text{hrs}} + \eta_{9\text{hrs}}}{3} \quad (12)$$

$$r_{\text{incr}} = \frac{L_{\text{pre}} - L_{\text{ref}}}{L_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (13)$$

$$r_{\text{shif}} = \frac{|L_{\text{pre}}^{[09:00,18:00]} - L_{\text{ref}}^{[09:00,18:00]}|}{L_{\text{ref}}^{[00:00,24:00]}} \times 100\% \quad (14)$$

其中, η 、 η_{avg} 、 $\eta_{3\text{hrs}}$ 、 $\eta_{6\text{hrs}}$ 、 $\eta_{9\text{hrs}}$ 分别为建筑热质的蓄能效率、平均能量储存效率、3 h 预冷蓄能效率、6 h 预冷蓄能效率、9 h 预冷蓄能效率; E_{dis} 、 E_{ch} 分别为建筑热质在办公时间释放的冷量及在非办公时间储存的冷量; r_{incr} 为建筑能耗增加比例; L_{pre} 、 L_{ref} 分别为采用预冷控制策略及参考控制策略对应的建筑电力负荷总量; r_{shif} 为建筑负荷迁移比例;上标[09:00,18:00]等表示对应时间段。

如上文所述,单体建筑的电力负荷曲线及电力需求侧响应能力可以提前预测和评估,因此凡是配备中央空调系统的建筑,都可以根据不同预冷控制策略及不同电价政策预先绘制一张有多个选项的电力负荷曲线图,进而用于实现电力运营成本的优化。与此同时,这些电力负荷曲线和电力需求侧响应能力对于智能电网的优化调度及决策也起着非常重要的作用。

2 博弈机制

本文针对动态电价提出了一种建筑电力运营成本的优化方法。同时,根据群体建筑电力负荷特征曲线提出了一种简化的动态电价博弈机制。依据该机制,电力供给侧和需求侧的最佳匹配结果最终可由动态电价与动态负荷管理博弈确定。

2.1 运营成本核算

相较于定价方式(如分时电价),动态电价(又称实时电价)可更加合理地呈现电力的边际成本,其已成为智能电网电力定价机制趋势。本文提出了一种依据动态电价的电力运营成本函数(仅考虑用电量费用),如式(15)所示。

$$c_{\text{opn}} = \sum_{i=1}^N \alpha_i q_i \quad (15)$$

其中, c_{opn} 为建筑某天 24 h 的电力运营成本; α_i 为动态电价第 i 时段的单价; q_i 为第 i 时段的用电量; N 为一天 24 h 内的时间节点数。在既定的电价下,可快速预估建筑在不同控制策略下的电力负荷曲线及相应的电力运营成本,进而便可确定最低电力运营成本的中央空调系统预冷控制策略。群体建筑的电力负荷曲线信息集总之后也可传输给智能电网作为电力动态定价信息参考。

2.2 动态定价机制

动态电价机制的基本原理为:电力用户在一定的时间间隔内(如 15 min 或 1 h),根据其所需的电力负荷比例分摊总电力成本,如式(16)、(17)所示。其中,电力负荷比例定义为某个时间间隔内的实际电力负荷值 q_i 与全天平均电力负荷值 q_{avg} 的比值。本文采用的动态电价时间间隔为 0.5 h(即每天 48

个时段)。动态电价定价机制有一个前提条件,即最终的供电收入(含因“移峰填谷”带来的运营成本节省费用)不低于最初的供电收入;另外一个重要的限制条件则是 2 个相邻时间段的电价变化率。上述 2 个条件可分别用式(18)和式(19)表示。

$$\alpha_i = \left(\frac{q_i}{q_{\text{avg}}} \right)^{\theta} c_{\text{mar}} \quad (16)$$

$$q_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{N} \quad (17)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_{i,\text{fin}} q_{i,\text{fin}} + c_{\text{sav}}}{\sum_{i=1}^N \alpha_{i,\text{int}} q_{i,\text{int}}} \geq 1 \quad (18)$$

$$a = (1+r)^{N-1} \geq \frac{\max(\alpha_i)}{\min(\alpha_i)} \quad (19)$$

其中, $\alpha_{i,\text{int}}$ 、 $\alpha_{i,\text{fin}}$ 分别为博弈前、后动态电价第 i 时段的单价; $q_{i,\text{int}}$ 、 $q_{i,\text{fin}}$ 分别为第 i 时段博弈前、后用电量; q_{avg} 为全天平均用电量; θ 为控制参数, 其值在 0~1 之间; c_{mar} 为单位电量的边际成本; c_{sav} 为博弈后与博弈前可节省的用电成本; a 为一天中最高电价与最低电价差值的限制参数; r 为电力用户可接受的电价变化率; N 为一天 24 小时内的电力定价时间段数, 本文中 $N=48$ 。

2.3 动态负荷管理

尽管许多国家已应用动态电价机制, 但几乎所有的电力定价方案都是由电力供给方单方面决定的, 而电力用户只能被动接受电价并根据电价调整其用电策略。如果电力定价方案考虑电力用户的动态需求和负荷管理潜力, 那么具备博弈机制的电力动态定价就能更加合理。

图 4 展示了智能电网动态电价定价与建筑负荷预测及其管理的博弈流程, 图中 α 为最终能源单价, α' 为试验能源单价, P_i 为第 i 次博弈循环建筑参考负荷预测结果, P'_i 为第 i 次博弈循环建筑变负荷预

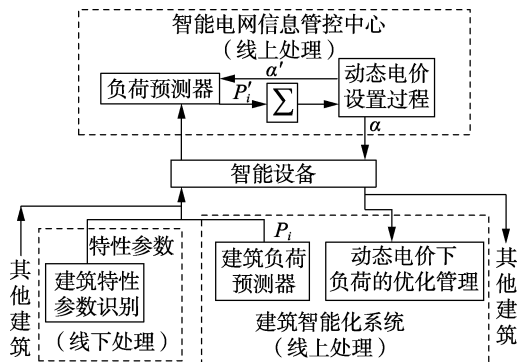


图 4 建筑与智能电网博弈机制的示意图

Fig.4 Schematic diagram of game mechanism between buildings and smart grid

测结果。在进行电价与负荷管理博弈前, 建筑的特性参数和用电指标需要提前确定(即通过简化的建筑热物理模型在离线状态下“训练”得出)。

建筑的负荷曲线会随着建筑的电力负荷控制策略(即电力负荷管理)和动态电价变化而变化, 并通过可变负荷预测器实现建筑负荷的在线预测。在多轮交互与博弈后, 最终可达到智能电网电力供给与电力用户之间电价和用电量的最佳平衡。

图 5 展示了一个智能电网与商业建筑的信息交互框架。楼宇自控系统已经具备将建筑融入智能电网的基础条件。现今信息与通信技术(如标准化、开放的通信协议 TCP/IP)已经在商业建筑中广泛应用。互联网因其较好的兼容性和灵活性, 在未来智能电网信息化的进程中将会成为最具潜力的网络通信技术。中央空调系统及其他建筑机电系统的电力负荷曲线以及电力需求侧响应能力等建筑用能信息可快速从楼宇自控系统获得。建筑电力负荷管理与智能电网动态电价的有效互动和博弈也可通过楼宇自控系统集成到智能电网的先进的计量架构 AMI (Advanced Metering Infrastructure) 中实现。

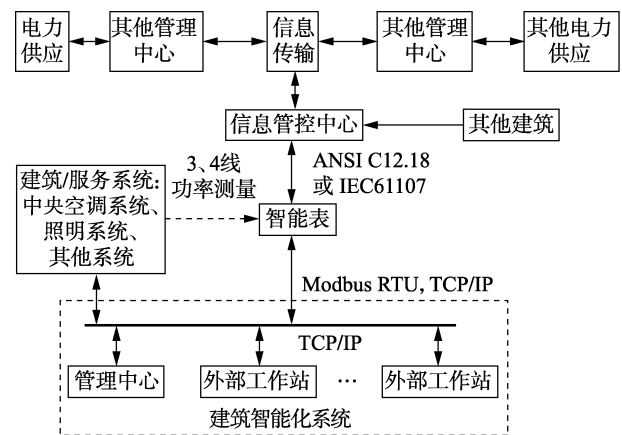


图 5 智能电网集成楼宇自控系统的通信框架

Fig.5 Communication framework of smart grid integrated with BAS

3 仿真结果

本文使用 FORTRAN 语言编写程序, 仿真了 9 种建筑类型(即不同类别建筑热质和不同窗墙面积比)共 245 座建筑的电力需求侧响应能力, 以及电力动态定价与动态负荷管理的博弈过程。该仿真程序被模块化成一个部件嵌入到瞬时系统模拟程序 TRNSYS 中, 进而用于较大规模的群体建筑和智能电网区域级/城市级的案例进行仿真。

图 6 和图 7 展示了电力负荷曲线与动态电价之间的 4 个互动过程。首先, 收集初始的集总电力负荷曲线用来制定初始电价; 其次, 电力用户根据初始电价信息进行第一轮的电力需求侧响应, 从而生成各自的新电力负荷曲线。在完成第一轮电力需求侧

响应之后,各电力用户的负荷曲线加总形成的集总电力负荷曲线会相应发生变化。电力动态电价接下来会进一步依据更新的集总电力负荷曲线进行重新定价直到集总电力负荷曲线最终趋于稳定(即电力负荷曲线和动态电价达至最优的平衡)。尽管电力的边际成本受到初始投资成本、能源成本、经济和利润等因素影响,本文仿真中暂不考虑上述因素,而仅采用电价比表征电价高低(即在实际的电力市场中,电价应为电力的边际成本乘以该电价比),如图6所示。

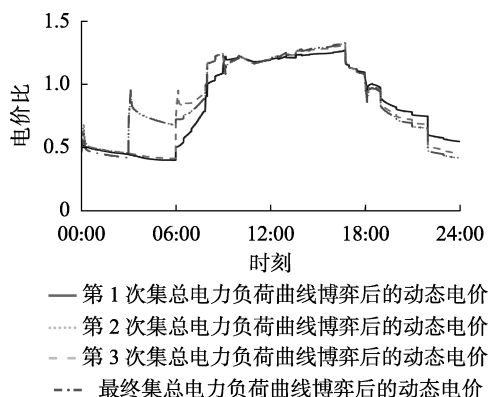


图6 与集总电力负荷曲线博弈后的动态电价定价过程

Fig.6 Dynamic pricing process after game with aggregated load curve

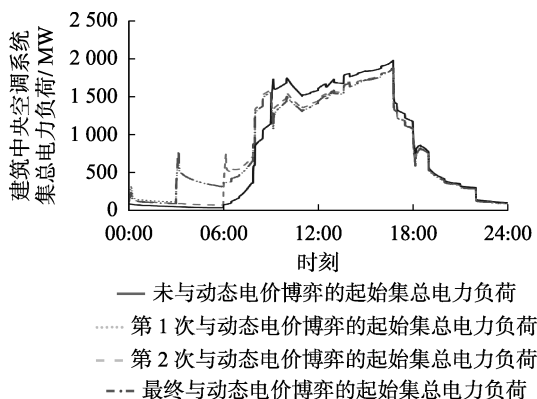


图7 与动态电价博弈后的动态电力负荷管理过程

Fig.7 Dynamic load management process after game with dynamic price

与基准集总电力负荷曲线(即初始的集总电力负荷曲线)相比,最终博弈平衡后所确定的集总电力负荷曲线总能耗仅上升3.14%,建筑热质的平均能量储存效率为71.27%。通过应用本文所提出的电力负荷管理策略,该建筑群可以协助智能电网将7.67%的电力负荷从办公时间段转移至非办公时间段。考虑到电网在电力需求低谷期的发电量极有可能因缺乏高性价比的储存介质而造成能源浪费,本文所提出的建筑电力负荷互动管理策略在电网整体层面上是可实现能源的有效利用和节省的。

4 结论

本文通过设定智能电网电力供需两侧可进行电力信息交互并实施电力负荷管理框架,采用示例模拟研究的方法验证了电力供需双方互动博弈最终达到平衡的可行性。此外,本文通过简化的建筑热物理模型对建筑热质的蓄能特性进行研究。考虑到未来建筑参与智能电网规划和建设的可能性,本文总结和建议如下。

建筑热质作为一种普遍且常见的蓄能介质,可考虑将其用于缓解电力供需失衡。尤其是越来越多不稳定的新能源电力接入智能电网,此时可将建筑热质视为一种“建筑热能电池”加以利用。

楼宇自控系统已有成熟可靠的技术、标准化的通信协议以及广泛的应用,使得商业建筑可提供较为全面的建筑信息和用电数据。这不仅可以帮助智能电网优化电能使用效率,而且可以通过电力供给侧和需求侧的双向交互最终将楼宇自控系统有机集成到智能电网中。而在未来智能电网的应用中,通过需求侧用电负荷预测的信息冗余有可能提高智能电网电力负荷预测的准确性。

参考文献:

- [1] 王蓓蓓,李扬. 面向智能电网的电力需求侧管理规划及实施机制[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):19-24.
WANG Beibei, LI Yang. Demand side management planning and implementation mechanism for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 19-24.
- [2] 梁甜甜,高赐威,王蓓蓓. 智能电网下电力需求侧管理应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):81-85.
LIANG Tiantian, GAO Ciwei, WANG Beibei. Applications of demand side management in smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 81-85.
- [3] 郭皓池. 智能电网中基于负荷分析的需求侧管理体系发展研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
GUO Haochi. Development of power demand side management in the smart grid based on the analysis of power load[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [4] WANG Shengwei. Use of phase change materials in buildings—can they play a role in demand side management for smart grid?[J]. Hvac & R Research, 2011, 17(5): 615-618.
- [5] WANG J, WANG X, WU Y. Operating reserve model in the power market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 223-229.
- [6] KIRBY B J. Spinning reserve from responsive loads[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2003, 15(3): 219-227.
- [7] XU Z, OSTERGAARD J, TOGEBY M. Demand as frequency controlled reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1062-1071.
- [8] TRANSMISSION O O E. Grid 2030: a national vision for electricity's second 100 years[R]. [S.l.]: US DOE Report, 2003.
- [9] BAMBERGER Y, BAPTISTA J, BELMANS R, et al. Vision and

- strategy for Europe's electricity networks of the future[R]. [S.I.]: European Commission. EU. Full Report. 2006.
- [10] YUAN J, HU Z. Low carbon electricity development in China—an IRSP perspective based on super smart grid[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 2707-2713.
- [11] 王吉权, 赵玉林. 组合预测法在电力负荷预测中应用[J]. *电力自动化设备*, 2004, 24(8): 92-94.
- WANG Jiquan, ZHAO Yulin. Application of combination forecasting method in power load forecast [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2004, 24(8): 92-94.
- [12] 张大海, 江世芳, 毕研秋, 等. 基于小波神经网络的电力负荷预测方法[J]. *电力自动化设备*, 2003, 23(8): 29-32.
- ZHANG Dahai, JIANG Shifang, BI Yanqiu, et al. Study of power system load forecast based on wavelet neural networks[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2003, 23(8): 29-32.
- [13] MALISANI P, FAVRE B, THIERS S, et al. Investigating the ability of various buildings in handling load shiftings[C] // *Power Engineering and Automation Conference*. Wuhan, China: IEEE, 2012: 393-397.
- [14] HONG C S D. Hong Kong energy statistics; annual report[R]. Hong Kong, China: [s.n.]. 2017.
- [15] HENZE G, DODIER R, MONCEF K. Development of a predictive optimal controller for thermal energy storage systems[J]. *Hvac & R Research*, 1997, 3(3): 233-264.
- [16] BRAUN J E. Load control using building thermal mass[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125(3): 292-301.
- [17] SUN Y, WANG S, HUANG G. A demand limiting strategy for maximizing monthly cost savings of commercial buildings[J]. *Energy & Buildings*, 2010, 42(11): 2219-2230.
- [18] LAM J C, CHAN R Y C, TSANG C L, et al. Electricity use characteristics of purpose-built office buildings in subtropical climates[J]. *Energy Conversion & Management*, 2004, 45(6): 829-844.
- [19] 牛丽仙, 邓翔. 建筑相关性负荷能效管理方法[J]. *建筑电气*, 2014(1): 62-64.
- NIU Lixian, DENG Xiang. Energy efficiency management method for correlative loads in buildings [J]. *Building Electricity*, 2014(1): 62-64.
- [20] 李昌. 需求侧管理下的公共建筑空调用电负荷预测[J]. *电气技术*, 2015, 16(10): 39-44.
- LI Chang. The load forecasting method for air conditioning load of public buildings on demand side management[J]. *Electrical Engineering*, 2015, 16(10): 39-44.
- [21] 岳明. 建筑中央空调负荷管理系统性解决方案及应用[J]. *电力需求侧管理*, 2016, 18(3): 27-30.
- YUE Ming. Systemic solutions and application of building central air-conditioning load management[J]. 2016, 18(3): 27-30.

作者简介:



薛雪(1985—),男,江西萍乡人,博士后,主要研究方向为智能电网中智能建筑需求侧响应及中央空调能效管控(E-mail: 31544341@qq.com)。

Interactive building power load management strategy for smart grid

XUE Xue^{1,2}, SHI Wenxing¹, SUN Tian², YUAN Yifeng²

(1. Department of Building Technology and Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100083, China;

2. Shenzhen Das Intellitech Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: The power imbalance between supply and demand sides is a critical issue for grid operation, which can be eased and solved by the effective management and control of supply and demand sides. Based on the dynamic pricing of electric power and quantification of energy storage in building thermal mass, a power load management framework and strategy for information interaction between smart grid and buildings is proposed, which provides a novel reference mode for smart grid to achieve peak load shifting and increase load coefficient. The simplified building thermal physical models and several indoor temperature control strategies are used to fast estimate the demand response capability of building power. Simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: buildings; smart grid; load management; demand response; dynamic pricing; electricity cost saving