

文章编号: 1671-6612 (2020) 03-321-05

# 建筑负荷参与电力需求响应的可行性及效果研究

艾松卉<sup>1</sup> 吴成斌<sup>2</sup>

(1.北京首钢建设投资有限公司 北京 100041;

2.优刻得科技股份有限公司 上海 200090)

**【摘要】** 电力需求响应是提高电网效率的关键方式。采用建筑环境与暖通空调系统模拟软件 Dest 建立了一座典型办公建筑模型,对建筑动态负荷特性进行模拟分析,发现建筑负荷的调控作为电力需求响应和虚拟储能的一种重要手段,具有较高的可行性和良好的效果。对室内温度进行全天或者短时的调控,都可以起到降低建筑电力负荷的效果;在电力需求响应时段前对建筑进行预冷,可以增强在响应时段降低电力负荷的效果。

**【关键词】** 建筑负荷;电力需求响应;虚拟储能

中图分类号 TU831 文献标识码 A

## Feasibility and Effect of Building Load Participating in Power Demand Response

Ai Songhui<sup>1</sup> Wu Chengbin<sup>2</sup>

(1.Beijing Shougang Construction Investment Co., Ltd, Beijing, 100041;

2.Ucloud Technology Co., Ltd, Shanghai, 200090 )

**【Abstract】** Power Demand Response is a key method to improve the efficiency of power grid. In this paper, a typical office building model is established with Dest, a building environment and HVAC system simulation software. Dynamic characteristics of building load is simulated and analyzed. It is found that the regulation of building load is an important means of power demand response and virtual energy storage, and it shows high feasibility and great results. The power demand will be reduced by full-day or short-term control of the indoor temperature. The effect of reducing the power load during the response period can be enhanced by pre-cooling the building.

**【Keywords】** Building load; Power demand response; Virtual energy storage

作者(通讯作者)简介:艾松卉(1990.12-),女,博士,工程师, E-mail: hu\_tu\_tu@126.com

收稿日期:2019-11-04

## 0 引言

能源互联网是电力系统发展的重要方向之一。与传统电力系统相比,能源互联网更加注重“发电、配电、储电、用电”的一体化管理和统筹优化。电力需求侧响应就是指对用电负荷的管理,用户根据电价信号或激励机制进行响应,改变常规电力消费行为<sup>[1]</sup>。通过电力需求侧响应,可以实现对现有电

源的充分利用,减少系统装机容量和输配电设施,提高设备利用率和用电效率。能源互联网中对光伏、风电等各类可再生能源的接入更加开放,但这类电源往往具有不稳定和可控性低的特点<sup>[2]</sup>,因此,对用电负荷的控制和管理是能源互联网的关键需求。同时,能源互联网中的各种设备的互联互通,为电力需求侧响应提供了物理基础和信息基础。

拉闸限电是一种传统常见的电力需求侧管理手段，可以起到缓解供电不足压力、降低电力负荷峰均比的作用，但是其是以损害各方利益为代价的。近年来，针对可控负荷和可中断负荷的管理成为电力需求侧响应的重要手段。建筑冷热负荷作为一种可控负荷，占全社会用电负荷的比例较大，对其参与电力需求响应的研究也收到日益增多的关注。建筑本身具有一定的热惯性，在空调设备关闭时，墙体和家具中的冷量或热量会逐渐释放出来，起到减缓室内环境变化的效果<sup>[3]</sup>。另外，建筑内部的人和设备都具有一定的环境适应性，在一定范围内的室内温度变化不会影响人体的热舒适性和设备的正常运行。

全年电力负荷的最高峰往往出现在夏季高温天气，这主要是由于建筑空调用电与气温有较强相关关系。以北京为例，夏季日负荷最大值达到 1776 万 kW，其中空调负荷达到 675 万 kW，占最大负荷的 38%<sup>[4]</sup>。利用空调系统进行电力需求侧响应始于美国，2008 年，美国太平洋天然气和电力公司在加州开展智能空调项目，在负荷高峰期对 15 万户居民的空调采取周期性暂停措施<sup>[5]</sup>。高赐威等提出了基于空调负荷的直接负荷控制双层优化调度和控制模型，从两个层面进行优化调度以实现用电方和供电方利益的协同<sup>[6]</sup>。2013 年中国电力科学院提出一种与电网互动的商业楼宇中央空调负荷调控系统，将某地区内的中央空调进行集中管控，在电力高峰负荷期，调整空调的运行参数，降低室内设定温度，在不影响人体舒适性的前提下，可以降低建筑的用电负荷<sup>[7]</sup>。丁小叶建立了变频空调负荷的数学模型，提出变频空调参与虚拟调峰的优化调控模型，并且准确量化了空调参与需求响应的效果<sup>[8]</sup>。

目前关于空调负荷参与电力需求侧响应的研究，建筑负荷模型都是采用的一阶等效热参数模型<sup>[8,9]</sup>，这种模型考虑了建筑的热阻和热容，是一种考虑因素较少、基于经验系数的简化模型。而建筑负荷是受实时变化的气温、通风、日照、内热源等众多因素共同影响，采用一阶等效热参数模型计算得到的建筑负荷一定是不准确、不符合实际情况的。

本文将采用建筑环境及暖通空调系统模拟软件 Dest 对典型建筑的动态负荷特性进行模拟，通过调整室内环境设定参数，判断各种工况下建筑负

荷的变化情况，从而判断建筑负荷参与电力需求侧响应的可行性和响应能力，为能源互联网体系下的电力需求侧响应措施的深入研究提供参考。

### 1 建筑模型建立

本文利用清华大学建筑技术科学系开发的 Dest 软件，以北京地区为例，建立一栋参考办公建筑的模型<sup>[10]</sup>，分别模拟该建筑在制冷季节空调运行时间的逐时负荷。本文建立的参考建筑如图 1 所示，建筑模型的设定参数如表 1 所示。

该办公建筑模型中，室内发热量（包括人员、用电设备、照明器具等）的设定如表 2 所示<sup>[11]</sup>。

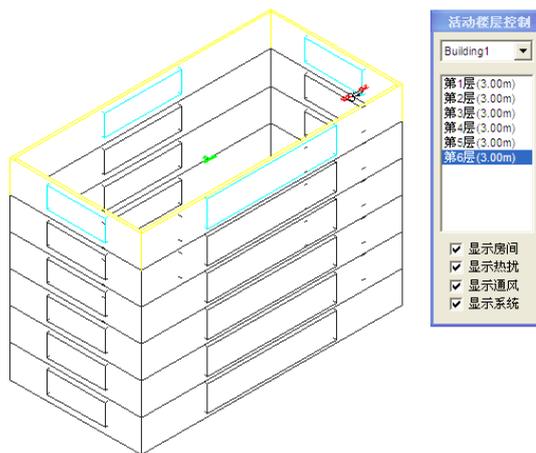


图 1 参考建筑示意图

Fig.1 Schematic diagram of reference building

表 1 建筑模型设定参数表

Table 1 Parameter setting of building model

类别	参数设定
地点	北京
建筑类型	办公建筑
尺寸	南北向长 $L=24\text{m}$ ，东西向长 $W=12\text{m}$ ， 高 $H=18\text{m}$
楼层数	共六层，层高 3m
建筑体形系数	$0.3\text{m}^{-1}$
窗墙比	南向 0.4，东、西向 0.3，北向 0.2
维护结构热工性能	外墙 $K=0.8\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ，屋顶 $K=0.6\text{W}/\text{m}^2$ ， 外表面太阳辐射吸收率 $e=0.5$ ，室外表面 换热系数 $\alpha_w=20\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； 外窗 $K=3.0\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ， $a_s$ (SHGC，平均太阳得热系数)

	=0.4W/(m <sup>2</sup> ·K)
家具系数	10.0
建筑新风量	1 次/h (有组织新风)
夏季空调运行时间	周一至周五, 8:00-19:00

表 2 建筑模型室内发热量设定

Table 2 Setting of indoor heating value of building model

时刻	室内发热量 (W/m <sup>2</sup> )	时刻	室内发热量 (W/m <sup>2</sup> )	时刻	室内发热量 (W/m <sup>2</sup> )
0	0	8	26.7	16	26.7
1	0	9	26.7	17	26.7
2	0	10	26.7	18	13.35
3	0	11	26.7	19	2.67
4	0	12	8.01	20	2.67
5	0	13	26.7	21	2.67
6	0	14	26.7	22	2.67
7	0	15	26.7	23	2.67

## 2 模拟结果

### 2.1 建筑逐时负荷

通过 Dest 模拟, 可以获取在典型气象年数据下整个制冷季节的建筑逐时冷负荷。为了便于分析, 本文截取典型气象年 7 月 2 日—7 月 6 日 (周一至周五) 计算结果进行分析。图 2 是在建筑空调温度设定在 25℃ 时单位面积建筑负荷以及此时段的室外空气干球温度。

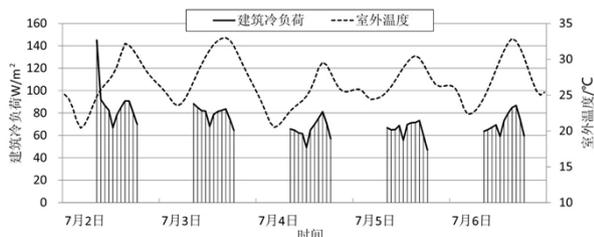


图 2 室外温度与建筑逐时负荷图

Fig.2 Ambient temperature and hourly building load

通过结果可以看出:

(1) 在空调运行时间 (8:00—19:00) 建筑负荷在一定范围内波动, 在非空调运行时段, 建筑负荷为零。

(2) 周一 (7 月 2 日) 空调工作时间的最初一个小时是建筑冷负荷最高的时刻, 这是由于在此

之前的周末时段空调没有运行, 室内外温差、光照等因素造成了室内空气温度较高, 同时墙壁、家具等蓄存了较多热量, 在空调开始运行的最初时段, 将室温在较短时间内调控到设定温度, 需要消耗较多的冷量。在其他工作日的空调运行初始时段, 建筑负荷也会由于前夜非空调时段的热量累积而相对较高, 但没有出现周一那样的高值。

(3) 建筑负荷与室外温度有较强的正相关关系, 当其他条件不变时, 室外温度越高, 建筑负荷越高, 反之亦然。

(4) 室内发热量的变化对建筑负荷有较大的影响, 中午 (12:00—13:00) 和傍晚 (17:00—19:00) 室内人员和设备运行数量相对正常工作时间较低, 室内发热量也随之较低, 建筑负荷在这些时段内也相对较低。

### 2.2 室内设定温度对负荷的影响

建筑负荷中的一部分是由于围护结构的传热造成的, 围护结构的传热量是由室内外的温差决定的。当室内温度越高, 其与室外温度的温差就越小, 围护结构的传热量也就随之越小, 反之亦然。

新风负荷也是建筑负荷的一部分, 其是与室内设定空气温度呈负相关的。室内设定温度越高, 新风从室外温度降低到室内设定温度需要消耗的冷量就越少, 即新风负荷越小, 反之亦然。

在上文室内设定温度 25℃ 的基础上, 提高和降低 1, 2, 3℃, 分别模拟各种设定温度下的建筑动态负荷。图 3 是 7 月 3 日在室内温度不同设定值下的建筑逐时负荷曲线。由图可知, 各个室内设定温度下, 建筑逐时负荷曲线的趋势是一致的, 但室内设定温度越高, 单位面积建筑负荷就越低。

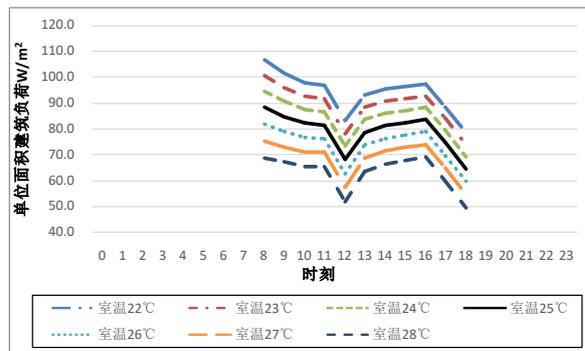


图 3 不同室内设定温度下建筑逐时负荷图

Fig.3 Hourly building load with different setting of indoor temperature

根据表 3 的统计结果, 相对于 25℃, 室内设定温度降低 1℃、2℃、3℃, 单位面积的平均建筑负荷会增加 6.4%、12.7%、19.0%; 室内设定温度提高 1℃、2℃、3℃, 单位面积的平均建筑负荷会降低 6.6%、13.3%、20.1%。这表明, 在电力负荷高峰时段, 通过负荷侧管理, 将全天的建筑室内设定温度提高 3℃, 可以使建筑的空调用电量降低约 20%。

表 3 不同室内设定温度下建筑负荷统计表

Table 3 Statistical table of building load with different setting of indoor temperature

室内设定温度 (°C)	单位面积平均建筑负荷 (W/m <sup>2</sup> )	变化幅度
22	94.08	19.0%
23	89.17	12.7%
24	84.18	6.4%
25	79.09	0.0%
26	73.9	-6.6%
27	68.6	-13.3%
28	63.2	-20.1%

根据民用建筑供暖通风与空气调节设计规范<sup>[1]</sup>, 人员长期逗留区空调供冷工况的室内设计温度为 I 级热舒适度 24~26℃, II 级热舒适度 26~28℃ (I 级热舒适度较高, II 级热舒适度一般)。室内温度在一定幅度内变化, 符合设计标准的规定。因此, 建筑负荷的调控可以作为电力需求响应和虚拟储能的一种重要手段。

### 2.3 室内温度短时调控

电力需求响应的时长通常是小时级的。在电力需求响应的短时间内调整室内设定温度, 然后在电力需求响应结束后可以将室内设定温度调整回原值。

本文设定 12:00—13:00 为电力需求响应时段, 分别模拟三种空调模式下的建筑逐时负荷变化情况: 模式一是正常的空调模式, 室内温度设定为 25℃; 模式二是短时调控模式, 在电力需求响应时段将室内温度设定为 28℃, 其余时间室内温度设定为 25℃; 模式三是提前预冷、短时调控模式, 在电力需求响应时段的前一个小时, 将室内温度设定为 22℃, 在电力需求响应时段将室内温度设定为 28℃, 其余时间室内温度设定为 25℃。

图 4 是三种模式下空调运行时间内建筑逐时

负荷图, 表 4 是电力需求响应时段三种模式下建筑负荷的对比分析。从中可以看出, 在电力需求响应时段 (12:00—13:00), 模式二 (短时调控) 相比于模式一 (正常空调) 建筑负荷降低了 63.9%, 而模式三 (提前预冷、短时调控) 相比于模式一 (正常空调) 建筑负荷降低了 80.0%, 但在提前预冷时段 (11:00—12:00), 模式三的建筑负荷会有较大幅度的增加; 模式二和模式三在电力需求响应之后的一小时, 建筑负荷相对于模式一会略有增加。

从模拟结果可以看出, 在电力需求响应时段对室内温度进行短时调控, 具有良好的降低电力负荷的效果; 提前预冷可以增强在电力需求响应时段降低电力负荷的效果, 但在预冷时段会增加电力负荷。

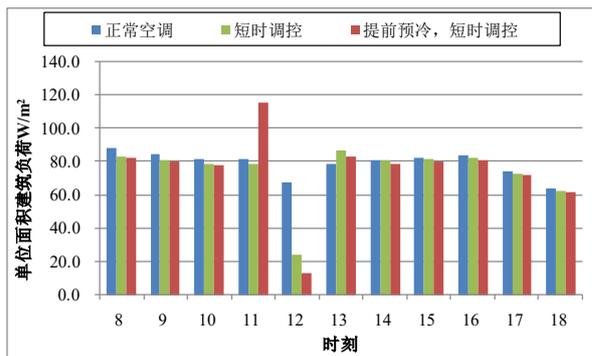


图 4 不同模式下建筑逐时负荷图

Fig.4 Hourly building load with different operating model

表 4 不同模式下电力需求响应效果

Table 4 Effect of Power demand response with different operating model

空调运行模式	正常 空调	短时 调控	提前预冷, 短时调控
调控期建筑负荷 (W/m <sup>2</sup> )	68.01	24.54	13.57
负荷下降幅度	0.0%	63.9%	80.0%

### 3 结论

本文采用建筑环境与暖通空调系统模拟软件 Dest 建立了一座典型办公建筑, 对建筑动态负荷特性进行模拟分析, 发现建筑负荷的调控作为电力需求响应和虚拟储能的一种重要手段, 具有较高的可行性和良好的效果。

(1) 通过改变室内温度, 可以调控建筑负荷, 进而调控建筑用电量。在本文算例中, 全天的室内设定温度降低 1℃、2℃、3℃, 单位面积的平均建

筑负荷会增加 6.4%、12.7%、19.0%;室内设定温度提高 1℃、2℃、3℃,单位面积的平均建筑负荷会降低 6.6%、13.3%、20.1%。

(2) 在电力需求响应时段对室内温度进行短时调控,具有良好的降低电力负荷的效果;提前预冷可以增强在电力需求响应时段降低电力负荷的效果,但在预冷时段会增加电力负荷。在本文算例中,对室内温度短时调控可以降低建筑负荷 63.9%,提前预冷后对室内温度短时调控可以降低建筑负荷 80.0%。

### 参考文献

- [1] 伍伟华,庞建军,陈广开,等. 电力需求侧响应发展研究综述[J]. 电子测试,2014,(3):86-94.
- [2] 邓益,王军. 太阳能光伏发电系统在西南高校的应用实践与效果评估研究[J]. 制冷与空调,2018,32(2):137-140.
- [3] 杜前洲,姜梅,刚文杰,等. 基于实测数据的夏热冬暖地区校园建筑负荷分析[J]. 制冷与空调,2019,33(2): 135-142.
- [4] 刘文. 北京地区的电力供需预警和负荷优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [5] Pacific Gas and Electric Company. Smart ACTM program [EB/OL]. <http://www.pge.com/en/myhome/saveenergymoney/energysavingprograms/smartac/index.page>. 2018.
- [6] 高赐威,李倩玉,李扬,等. 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,(10): 1546-1555.
- [7] 叶剑斌,陈新贺,李天阳,等. 一种与电网互动的商业楼宇中央空调负荷调控系统[P]. 中国:CN202904332U, 2013-4-24.
- [8] 丁小叶. 变频空调参与需求响应的调控策略与效果评估[D]. 南京:东南大学,2016.
- [9] 刘利兵,刘天琪. 参与需求侧响应的空调负荷群调节控制方法及优化调度策略[J]. 工程科学与技术,2017,49(增刊 1):175-182.
- [10] 吴成斌. 空调用制冷设备季节性能评价方法研究[D]. 北京:清华大学,2013.
- [11] 石文星,颜承初,赵伟. 单元式空气调节机 APF 性能评价相关问题研究[J]. 冷冻空调标准与检测,2006,(6):4-33.
- [12] GB 50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

(上接第 315 页)

### 参考文献:

- [1] Society of Automotive Engineers. SAE ARP 85 Air Conditioning Systems For Subsonic Airplanes[S].
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 161-2007 Air Quality within Commercial Aircraft[S].
- [3] Pang L, Qin Y, Liu D, et al. Thermal comfort assessment in civil aircraft cabins[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014,24(2):180-186.
- [4] Park S, Hellwig R, Grun G, et al. Local and overall thermal comfort in an aircraft cabin and their interrelations[J]. Building and Environment, 2011,46: 1056-1064.
- [5] Cui W, Ouyang Q, Zhu Y. Field study of thermal environment spatial distribution and passenger local thermal comfort in aircraft cabin[J]. Building and Environment, 2014,80:213-220.
- [6] 林国华,袁修干,杨燕生. 人机环境系统中的 CFD 研究[J]. 航空学报,1999,20(增):21-23.
- [7] 林国华,杨燕生,袁修干. 座舱环控系统气流组织的数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报,1998,6(3):302-307.
- [8] 林国华. 空调座舱流体流动和传热的数值研究[M]. 北京:北京航空航天大学,1998.

