

空调负荷虚拟储能技术研究

童亦斌,游小杰,王怡岚,黄 梅

(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘 要:由于建筑自身具有一定的热容量,空调制冷或制热功率发生变化时,建筑内温度的变化存在滞后;而人体对舒适温度的感觉也存在一个范围.利用“空调-建筑”系统的这两个特点,在保证用户基本舒适度要求的前提下,空调电功率可以按照外部需求主动调节,空调负荷也可等效成为电网中一个虚拟的电能存储装置.本文对影响空调负荷虚拟储能的主要因素进行分析,建立虚拟储能能量和功率模型;结合需求侧响应等典型应用,对虚拟储能的控制进行了介绍;利用实际测量结果和算例计算,验证了空调负荷虚拟储能用于电网调节的价值和可行性.

关键词:空调负荷;虚拟储能;需求侧响应

中图分类号:TM71 **文献标志码:**A

Research on virtual energy storage of air conditioning load

TONG Yibin, YOU Xiaojie, WANG Yilan, HUANG Mei

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Because of the heat capacity of buildings, there is a delay in the inner temperature changes when the power changes during the air conditioning cooling or heating process. And there is a range of comfort temperature for human body. Using these characteristics of "air conditioning-building" system, the electric power of air conditioner could perform active adjustment in a certain range according to the external needs while maintaining users' basic comfort. In this way, air conditioning load can be equivalent to a virtual energy storage device in the power grid. The energy model and power model of virtual storage are established to evaluate the influence of different factors on the virtual storage of air conditioning load. Considering the typical application of demand response, the control strategy of virtual energy storage is introduced preliminarily. Finally, based on the actual situation, an example is given to calculate the capacity of the air conditioning load. It verifies that virtual energy storage is practicable and valuable for the power grid regulation.

Keywords: air conditioning load; virtual energy storage; demand response

国内外统计数据表明,建筑能耗在全社会能源消耗中占有非常大的比重,大致在 30%~40%水平.而在建筑的各种类型能源消耗中,采暖、通风和空调负荷占比非常显著,可达 60%甚至更高^[1].具体到我

收稿日期:2017-04-07
基金项目:北京市科技计划项目(Z161100000716003);空调设备及系统运行节能国家重点实验室开放课题(SK LackF201609)
Foundation items:Beijing Science and Technology Planning Project(Z161100000716003);State Key Laboratory of Air-conditioning Equipment and System Energy Conservation Open Program(SK LackF201609)
第一作者:童亦斌(1969—),男,浙江永康人,副教授.研究方向为新能源发电系统、电力电子和主动配电网.email:ybtong@bjtu.edu.cn.
引用格式:童亦斌,游小杰,王怡岚,等.空调负荷虚拟储能技术研究[J].北京交通大学学报,2017,41(5):126—131.
TONG Yibin, YOU Xiaojie, WANG Yilan, et al. Research on virtual energy storage of air conditioning load[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(5): 126—131. (in Chinese)

国情况尤为突出.一方面,由于建筑本体节能技术水平相对较低,我国建筑的平均能耗较国际先进水平存在较大差距;另一方面,随着经济的快速发展和城镇化程度的提高,空调快速推广普及.电网监测和分析结果表明,对北京这样的大城市,在夏季制冷时段,电网尖峰负荷中超过 50%是由空调产生.空调已经成为电网负荷一个非常重要的组成部分,而且占比还有不断提高的趋势,对电网供电容量、安全性及输配电效率等,都会产生显著的影响.

传统意义上,空调的运行控制及温度和功率调节,都是由设备及用户使用习惯决定的,空调只是电网中一个简单的用电设备,与电网之间没有过多的控制关联和交互.面对空调负荷可能带来的问题,传统技术手段以被动应对为主,包括基于历史数据和气象预报的空调负荷预测,在空调负荷高峰时段增大电网后备容量,压减非重要负荷直至拉闸限电等.

在“空调-建筑”所构成的“电能-热能”转化系统中,热能存蓄在建筑本体及其中的空气和各种设施中,建筑“天然储热(能)体”的特性已经被理解和关注.文献[2]从建筑的自然属性和人为属性的角度进行冷热负荷建模,不过缺乏实际的能量调度应用场景.文献[3]建立了详细的空调建筑电热转换模型,对利用建筑蓄热能力进行能量存储和释放的技术进行了研究,但其模型和参数比较复杂,不利于评估和控制.文献[4]提出空调负荷虚拟储能(Virtual Energy Storage, VES)的概念,并介绍了 VES 的部分特性,而在定量评估方面则无法满足工程应用的需求.文献[5]采用状态序列方法实现了对空调负荷群的控制,却没有充分考虑环境等因素对虚拟储能调控裕量的影响.另外这些文献对空调负荷 VES 的分析大多借助建筑本体参数,需要较为详细的建筑设计数据,这在实践中非常不便,限制了应用.

需求侧响应(Demand Response, DR),是指用户对价格或者激励做出响应,改变其正常的电力消费模式和习惯,主动参与电网调度^[6].利用空调负荷所具有的虚拟储能特性,传统空调转变为可以根据调度目标,主动进行功率和能量调节的柔性负荷,非常适合需求侧响应.虽然单台空调对电网的影响和贡献非常微弱,但只要能聚合起数量众多的空调,按照共同的目标协同控制,就可以产生显著的价值.考虑到“空调-建筑”系统 VES 的建设和运行成本极低,随着互联网的技术发展和普及,空调负荷 VES 具有非常广阔的应用前景.

本文作者从分析影响空调负荷 VES 的主要因素和规律出发,重点针对需求侧响应,推导出一种简

洁的空调负荷 VES 能量和功率特性建模和量化评估方法,适合工程应用推广.

1 影响空调负荷虚拟储能的主要因素

“空调-建筑”系统如图 1 所示,空调将电网提供的电能转换为热能,用于调节建筑内部的温度或湿度.参考空调和电力行业习惯,文中用字母 Q 表示热功率,用字母 P 表示电功率.图 1 中 P_e 表示空调电功率, Q_t 表示空调产生的制冷或制热热功率, Q_d 表示建筑的热耗散功率, T_a 表示室外环境温度, T_r 表示建筑室内温度, C 表示建筑热容.

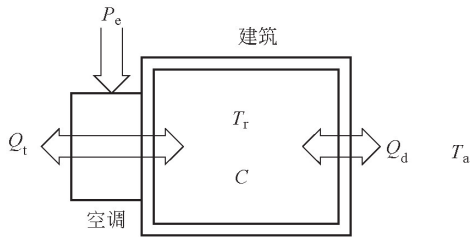


图 1 空调-建筑系统热量和能量关系

Fig.1 Thermal and energy relationship of air conditioning-building system

所谓空调负荷虚拟储能(VES),是指空调所具有的,能够按照控制目标,在一定时间内主动调控其电网侧电功率的能力.VES 所能提供用于调节的电功率及能量的大小,与空调类型、建筑内外部温度、空调的设定温度、空调的温度调节策略,以及建筑的保温特性等因素有关,而其中对 VES 影响最大的,主要是空调能效比、建筑热性能和等效热参数及人体热舒适度.

1)空调能效比.影响空调制冷或制热效率的因素虽然有很多,但为了方便 VES 的分析、建模和控制,可以利用能效比(Coefficient of Performance, COP) λ_{cop} ,将空调电功率和热功率的关系简化为

$$P_e = \frac{Q_t}{\lambda_{cop}} \tag{1}$$

式中 λ_{cop} 与空调的类型有很大的关系,而且会受环境温湿度等因素的影响.考虑到空调负荷 VES 主要用于响应分钟到小时级的调度需求,且正常情况下室内温度大多处于 15℃~30℃范围,对 λ_{cop} 影响最大的是外界环境温度^[7].COP 曲线可以方便地从空调厂家获取,图 2 是一台空气源热泵空调制热工况典型 COP 曲线.

为了便于后续的量化分析,可以采用数值拟合的方法,得到 λ_{cop} 与环境温度 T_a 的关系.以图 2 所示的空调为例,于是就有

$$\lambda_{cop} = 0.07 T_a + 2.5 \tag{2}$$

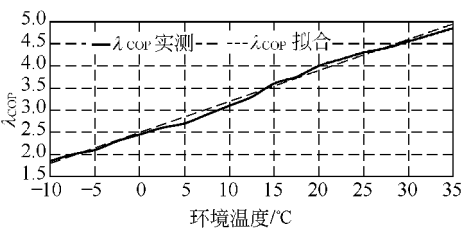


图 2 空气源热泵空调典型 COP 曲线

Fig.2 COP curves of air-source heat pump air conditioning system

2)建筑热性能和等效热参数.从研究 VES 的角度,建筑热性能主要包括保温性能和热容两个方面.保温性能主要受墙体材料、窗墙比、通风及湿湿度等条件的影响.建筑内外部温差和保温性能,决定了因热交换产生的热耗散功率 Q_d .建筑热容 C ,用于衡量存储在建筑本体,以及室内空气和设施中的热量. C 的准确测量或计算都比较困难,受现场情况的影响也非常大,而经验数据,单位建筑面积热容 $47\sim 230\text{ kJ}/^\circ\text{C}$ 的范围又太宽,难以满足准确评估 VES 的要求.本文第 3 节中介绍借助等效热参数模型和实际测量数据进行推算的方法,经过实验验证,可以满足大多数 VES 应用场合的要求.

考虑 VES 主要依靠控制室内温度的变化来实现热量释放和存储,因此更关注温度变化对应的热量变化.为了研究 VES 分钟级动态响应特性,可以采用一阶等效热参数模型描述建筑内外热量和温度的关系为

$$\pm (Q_t - Q_d) = C \times \frac{d(T_r - T_a)}{dt} \quad (3)$$

式中,±分别对应制热和制冷工况.

为简化叙述起见,下面的分析以制热工况为例,而所用方法也完全适于制冷工况.从式(3)可知,假设环境温度 T_a 和建筑热耗散功率 Q_d 不变,空调热功率 Q_t 是引起室内温度 T_r 变化的主要因素,而 T_r 的变化范围直接决定了 VES 能够存储或释放能量的大小.

3)人体热舒适度.控制温度是空调最基本的功能.虽然目前大多数情况可能都是简单地将房间温度设定为恒定值(比如夏季 $26\text{ }^\circ\text{C}$,冬季 $20\text{ }^\circ\text{C}$),但相关研究表明,人体对于温度的舒适感觉其实是有一个范围的.根据文献[8]的研究成果,可以利用图 3 所示热感觉投票值 (Thermal Sensation Vote, TSV) 曲线,衡量温度与体感舒适度的关系.

TSV 方法通过对人群中个体舒适度主观感觉的统计分析,形成特定人群对舒适度的量化评估指标.TSV = 0,对应人体感觉最舒适的温度 T_{comf} ;

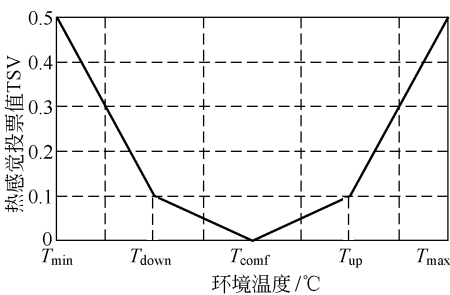


图 3 热感觉投票值与温度的关系

Fig.3 Relationship between TSV and temperature

TSV = 0~0.1(温度在 $[T_{\text{down}}, T_{\text{up}}]$ 之间变化),意味着绝大多数人对该范围内温度的变化不敏感;TSV ≤ 0.5 (温度在 $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ 之间变化),表示 90% 的人可以容忍和接受,但可能需要适当引导,包括补偿、激励或约束等.考虑到空调参与需求侧响应调度能产生效益,对用户进行一些补偿和激励完全可行.因此,TSV = 0.5 对应的 T_{min} 或 T_{max} ,决定了 VES 的最大可调节温度范围 T_c ,其中 $T_c = T_{\text{min}} - T_{\text{max}}$ (制热工况)或 $T_c = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ (制冷工况).文献[8]给出 TSV 对应的温度范围如表 1 所示.

表 1 TSV 对应的温度范围

Tab.1 Temperature range of TSV $^\circ\text{C}$

季节	T_{comf}	$T_{\text{down}} - T_{\text{up}}$	$T_{\text{min}} - T_{\text{max}}$
夏季	25.5	25~26	23.2~27.8
冬季	22.9	20.7~23.2	16.8~24.6

出于节能考虑,在夏季制冷工况下,可以按照设定温度定 $26\text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 1\text{ }^\circ\text{C}$ (从 $26\text{ }^\circ\text{C} \sim 27\text{ }^\circ\text{C}$)进行 VES 能量估算;国家采暖通风与空气调节设计规范中规定,冬季供暖室内温度最低为 $18\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,而北京地区的实际情况大多为 $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$.因此,在冬季制热工况下,设定温度可以选择为 $22\text{ }^\circ\text{C}$,同时按照 $T_c = 2\text{ }^\circ\text{C}$ (从 $22\text{ }^\circ\text{C} \sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,或是从 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 18\text{ }^\circ\text{C}$)对 VES 可供调度的能量进行评估.

2 空调负荷虚拟储能的能量和功率

2.1 VES 的能量特性

建筑本身就是一个蓄热体,室内或室外温度变化,使得更多热量被存蓄到建筑里,或从建筑中释放出来.VES 正是利用建筑的蓄热能力,在 T_c 范围内,通过主动调节空调的设定温度 T_{set} ,控制热量流动方向(向建筑蓄热或从建筑释热),并通过空调反映到电网侧功率 P_e 上.

结合图 4 为例说明.假设空调设定温度 T_{set} 的初值为 $T_{\text{set}0}$,室内温度稳定($T_r = T_{\text{set}0}$),此时空调电功率为 P_{e0} ,产生的热功率等于建筑的热耗散功率($Q_t = Q_d$),系统处于稳定状态.1)降低设定温度,

空调热功率 Q_t 和电功率 P_e 减小,室内温度 T_r 下降,建筑内部储存的热量开始释放.受空调机组限制,释热过程一般无法将热能重新转化为电能回馈电网.但如果以初始功率 P_{e0} 为参考,空调电功率因 VES 释热而减小,可以看作“间接”实现了“放电”; 2) 提高设定温度,空调热功率 Q_t 和电功率 P_e 增大,室内温度 T_r 上升,更多电能被转变为热能存储在建筑中,等效于“充电”.

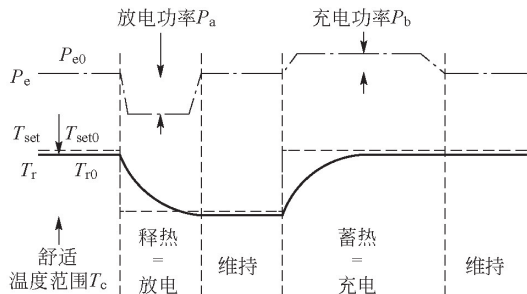


图 4 采暖工况 VES 典型运行状态

Fig.4 Working state of heating condition of VES

忽略充电（蓄热）和放电（释热）过程中建筑热耗散功率的变化,利用最大可调节温度范围 T_c , VES 可以提供的最大可充放电能量为 $E_{ves(max)}$, 并有

$$E_{ves(max)} = \int |P_e - P_{e0}| dt = \frac{C \times T_c}{\lambda_{cop}} \quad (4)$$

与电化学储能等传统储能不同的是, VES 的控制不仅需要考虑人体对温度感觉的敏感性和舒适性,还要考虑空调温度调节策略及负荷反弹等问题,这些都影响 VES 的功率特性.

2.2 VES 的反弹负荷

VES 能够存储或释放的最大能量,取决于人体舒适度范围.考虑到人对温度的耐受力以可能付出的成本, VES 一般都要求完成需求侧响应等任务后,在一定时间内将室内温度重新调回到设定值.此时空调需要增大输出功率,以便将建筑蓄热恢复到初始状态.

考虑到 VES 一般通过聚合实现多台空调一致响应,起始释热阶段空调功率的下降,一般是可以预测并符合控制预期的.相比之下,恢复蓄热过程中的功率控制比较复杂.仍结合图 4 说明,调高空调设定温度, VES 转变为蓄热状态.如果只是考虑人体舒适,空调应该以额定功率运行,以便尽可能快地将温度提升到设定温度.如果聚合在一起的空调都采用这样的控制策略,同时以额定功率工作,这些空调负荷时间上一致,峰值叠加,甚至可能超出响应前的功率水平,常被称为反弹负荷.反弹负荷会对电网带来诸如稳定性和电压质量等问题,有必要加以约束.

一些研究提出利用排队理论,对空调进行分类排序,对总的反弹负荷进行抑制.由于控制所需的交互变量更多,对通信的实时性要求也更高,并且对局部点反弹负荷无能为力,类似方法在应用中存在较大的局限性.因此,借助空调自身的控制策略,在空调端直接抑制反弹负荷的方法,显然具有更高的应用价值.

2.3 VES 的功率特性

当室内实际温度与设定温度不相同,空调可以采用不同的功率控制策略进行调节,这将决定 VES 的功率特性.定频空调采用简单的启停控制进行温度调节,用于 VES 会产生非常严重的负荷反弹问题,并不适合需求侧响应等任务的要求.变频空调可以对功率进行连续调节,有利于提高 VES 的性能.

下面结合图 4,分析 VES 的功率特性,以及如何抑制反弹负荷.在 VES 参与需求侧响应前,假设空调建筑系统已经处于热平衡状态, $P_e = P_{e0}$, $Q_t = Q_d$, $P_{e0} = Q_d / \lambda_{cop}$,室内温度稳定在设定温度 $T_{set0} = T_{comf}$,分别用 Δt_a 和 Δt_b 表示放电和充电的持续时间.

1) 为触发 VES 参与需求侧响应,将空调设定温度从 T_{set0} 降低至 $(T_{set0} - T_c)$, VES 开始放电（释热）过程.为充分发挥 VES 的功率能力,空调可以直接停止制热,电功率和热功率降为零. VES 所能提供的最大放电功率 $P_{a(max)}$ 和最长放电时间 $\Delta t_{a(max)}$ 分别为

$$P_{a(max)} = P_{e0},$$

$$\Delta t_{a(max)} = C \times T_c / Q_d = C \times T_c / (P_{e0} \times \lambda_{cop}) \quad (5)$$

2) 如果需求侧响应要求的时间较长(大于 $\Delta t_{a(max)}$),室内温度会降低到 $(T_{set0} - T_c)$,此时为减少对用户舒适度造成的影响,就必须将空调的电功率增加至 P_{e0} ,以产生足够的热功率平衡 Q_d ,维持室内温度稳定.个体空调快速增加电功率会产生较大的反弹负荷,但考虑实际条件的差异(比如空调的类型和建筑热性能等), $\Delta t_{a(max)}$ 的分散性很大,众多 VES 聚合后的总体反弹负荷其实非常小,对电网的影响可以忽略.

3) 如果在 $\Delta t_{a(max)}$ 时间内提前结束需求侧响应,设定温度重新调高到 T_{set0} ,空调增大输出恢复建筑室内温度, VES 进入充电（蓄热）过程.期间空调电功率 $P_e = P_{e0} + P_b$,其中 P_{e0} 产生的热量用于平衡建筑热耗散,而 P_b 产生的热量则蓄到建筑内部,使建筑室内温度逐渐升高.因此, P_b 对应于

VES 的充电功率,并可以定义反弹系数 $\delta = P_b / P_{e0}$.

负荷聚合商根据电网调控目标,结合内部激励和补偿机制,在恢复期之前,根据最长放电(释热)时间 $\Delta t_{a(max)}$ 确定反弹系数 δ ,空调按照 $P_b = \delta P_{e0}$ 及 $P_e = (1 + \delta) P_{e0}$ 运行,VES 充电(蓄热)时间 $\Delta t_b = \Delta t_a / \delta$.

VES 释热期间的放电功率 P_a 和最长放电时间 $\Delta t_{a(max)}$ 主要取决于建筑耗散热量 Q_d ,在需求侧响应过程中一般可以看作是定值;VES 恢复蓄热期的充电功率,取决于负荷聚合商确定的反弹系数 δ ,而充电时间则与放电时间成正比,最长充电(蓄热)时间 $\Delta t_{b(max)} = \Delta t_{a(max)} / \delta$.

结合 2.1 节 VES 的能量特性,为了便于 VES 的评估和控制,可以借用传统化学储能电池荷电状态(State of Charge, SOC)的概念,定义 VES 储能状态 SOC_{ves}

$$SOC_{ves} = \frac{C \times |T_r - T_{set0}|}{E_{ves(max)}} = \frac{|T_r - T_{set0}|}{T_c} \quad (6)$$

VES 充放电过程中, $SOC_{ves} = 1$ 分别对应最长放电时间 $\Delta t_{a(max)}$ 和最长充电时间 $\Delta t_{b(max)}$,因此,根据当前室内温度 T_r 计算出 SOC_{ves} ,就可以方便地利用式(6)评估剩余的可用充放电时间.

3 算例分析

本节利用实际算例,分析验证 VES 的可行性、

控制策略和应用价值.对建筑热性能全面评估和准确测量的方法,不但需要大量的专业知识和技能,而且由于建筑情况千差万别,推广应用也存在较大的困难.考虑到未来 VES 的应用依赖于对众多个体的聚合,某些个体及特殊情况对整体聚合的效果影响甚微,加之智能家居和互联网的普及,本文采用智能插座和温度传感器相结合方法,根据实时测量数据,推导建筑的等效热性能参数.

算例具体情况:北京地区 2016 年新建民用建筑,市政热力供暖,东向房屋室内面积 19 m²,层高 2.7 m,砖混结构.房间配置 1.5 匹冷暖分体空调 1 台,额定电功率 1 120 W,对应热功率 3 850 W, $\lambda_{COP2} = 3.44$,空调另外配置 1 000 W 电辅助加热(λ_{COP1} 按照 1 考虑).实验选取在春季,天气晴,空气质量优,环境温度 18.0 ℃,北风 3 级.利用智能插座和温度传感器获得的监测结果如图 5 所示.

上午 10 点,室内温度 19.9 ℃,启动空调制热,设定温度 27 ℃,除刚开始约 6 min 启动辅助电加热外,其余时段均只有空调压缩机制热;空调电功率曲线如图 5(b)所示,到 11 时 45 分(蓄热时长 $\Delta t_1 = 6\ 300\ s$),室内温度上升 $\Delta T_{r1} = 3.7\ ^\circ C$,达到 23.6 ℃,累计耗电量 1.8 kWh,关闭空调;到 13 时 25 分(释热时长 $\Delta t_2 = 6\ 000\ s$),室内温度下降 $\Delta T_{r2} = 2.3\ ^\circ C$,达到 21.3 ℃,温度曲线如图 5(a)所示(图中竖线表示 10 点).

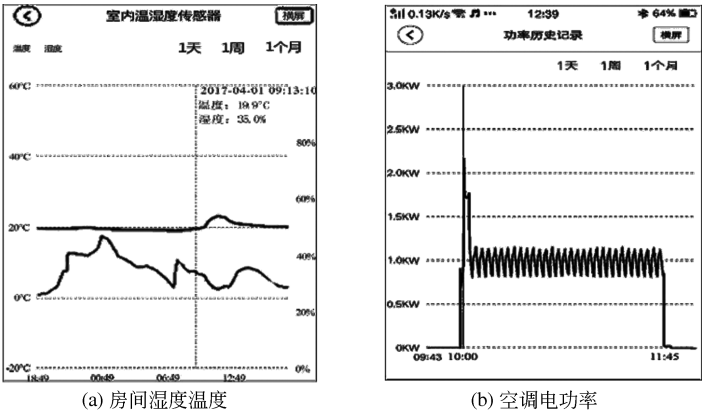


图 5 实验测试结果

Fig.5 Experimental testing results

由于电辅助加热时间为 6 min,得到其消耗电能 $e_1 = 0.1\ kW \times 6160\ h = 0.1\ kWh$;根据总耗电量得到压缩机制热消耗电能 $e_2 = 1.8\ kWh - e_1 = 1.7\ kWh$;综上的推算出制热时段 Δt_1 内空调产生的总热量 $E_1 = e_1 \times \lambda_{COP1} + e_2 \times \lambda_{COP2} = 0.1kWh \times 1 + 1.7kWh \times 344 = 5.95\ kWh$.平均热功率 $Q_t = E_1 / \Delta t_1 = 3.40\ kW$.采用前面介绍的空调建筑系统模型,利

用式(3)和式(5)可以列出以下关系:

建筑蓄热(空调制热)过程

$$Q_t - Q_d = C \times \Delta T_{r1} / \Delta t_1 = C \times 3.6\ ^\circ C / 6\ 300\ s \quad (7)$$

建筑释热(空调停机)过程

$$Q_d = C \times \Delta T_{r2} / \Delta t_2 = C \times 2.3\ ^\circ C / 6\ 000\ s \quad (8)$$

联立式(7-8)得 $C = 3.56\ MJ / ^\circ C, Q_d = 1.37\ kW$.

由此可知,该房间在 $T_c = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下, VES 最大可充放电能量 $E_{\text{ves(max)}} = C \times T_c / \lambda_{\text{COP}_2} = 0.29\text{ kWh}$, 对应最大放电时间 $\Delta t_{\text{a(max)}} = C \times T_c / (P_{\text{e0}} \times \lambda_{\text{COP}_2})$ 约为 925 s.

4 结论

本文作者对空调-建筑系统内在能量关系进行了分析,建立了 VES 能量和功率模型,将 VES 等效为熟悉的储能装置,便于在系统层面进行统一规划和调度.本文的分析和算例表明如下.

1) VES 可以为电网提供了一种廉价、可靠和灵活的功率和能量调度方法,在保证用户舒适度的前提下参与需求侧响应.空调的温度和功率控制策略,对 VES 的功率特性和反弹负荷有很大影响,需要根据需求侧响应的要求进行适当调整.

2) 对 VES 效果影响最大的因素是人体热舒适度, $1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化,可以满足 90% 以上人群基本的舒适度要求.参考我国民用空调选配一般标准,以 $20 \sim 30\text{ m}^2$ 左右的房屋配置算例中 1.5 匹空调估算,在房屋正常保温和通风的情况下,可以为电网提供 15 min 左右,约 0.3 kWh 的虚拟储能容量.借助适当的激励或补偿机制, VES 具有一定的推广应用价值.

3) 准确测量和计算 VES 的容量比较困难,而利用在线监测数据对建筑等效热性能参数进行简单推算的方法,虽然对单台空调可能有较大误差,但多台聚合的过程中,可以借助统计规律减小误差及其影响.这方面的规律值得进一步深入研究.

参考文献 (References):

[1] 江亿.我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J].暖通空调,2005,35(5):30-40.
JIANG Yi.Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2005,35(5):30-40.(in Chinese)
[2] 陈飞翔,胥建群,王晨杨,等.能源互联网系统用户侧冷热负荷预测模型研究[J] 中国电机工程学报,2015,35

(14):3678-3683
CHEN Feixiang, XU Jianqun, WANG Chenyang, et al. Research on building cooling and heating load prediction model on user's side in energy internet system[J].Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (14): 3678 - 3683. (in Chinese)
[3] XUE X, WANG S, SUN Y, et al. An interactive building power demand management strategy for facilitating smart grid optimization[J]. Applied Energy, 2014, 116 (3):297-310.
[4] 艾欣,赵阅群,周树鹏,等.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, et al.Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control[J].Proceedings of the CSEE,2016,36 (6):1596-1603.(in Chinese)
[5] WANG D, JIA H, WANG C,et al.Performance evaluation of controlling thermostatically controlled appliances as virtual generators using comfort-constrained state-queueing models[J].IET Generation, Transmission & Distribution,2014,8(4):591-599.
[6] 高赐威,梁甜甜,李扬.自动需求响应的理论与实践综述[J].电网技术,2014,38(2):352-359.
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. A survey on theory and practice of automated demand response[J]. Power System Technology, 2014, 38 (2): 352 - 359. (in Chinese)
[7] 艾淞卉,吴成斌,石文星,等.低环境温度空气源热泵机组在北京冬季运行的性能[J].暖通空调,2015,45(3):52-58.
AI Songhui, WU Chengbin, SHI Wenxing, et al. Running performance of low-temperature air-source heat pump applied in winter of Beijing[J].Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015,45(3):52-58.(in Chinese)
[8] 曹彬.气候与建筑环境对人体热适应性的影响研究[D].北京:清华大学,2012.
CAO Bin.Research on the impacts of climate and built environment on human thermal adaptation[D].Beijing: Tsinghua University,2012.(in Chinese)