

## 参与调峰控制的空调负荷建模仿真研究

王 栋<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>, 陈 亮<sup>2</sup>, 袁晓冬<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**调控空调负荷参与电网削峰填谷对于维持系统稳定运行、减少发电机备用容量提高效率,从而增大电网运行效益具有巨大潜力。基于家用分散式空调的工作原理,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了简化空调房调温模型,以该模型为基础依次探究了定/变频空调调温、增大变频区间调温的特性。考虑空调的工作特性,提出了一种对空调控制系统进行简单改造,使其自适应电网预测负荷大小进行互补运行的策略。最后开展基于 RT-LAB 实时仿真平台的模型仿真测试与试验,验证了仿真模型的正确性以及控制策略促进空调负荷参与调峰控制的有效性。

**关键词:**空调负荷;建模仿真;互补运行;调峰控制

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)06-0080-07

### 0 引言

据统计,国内夏季空调负荷在负荷高峰时段所占峰荷比例达到 30%~40%<sup>[1-2]</sup>。巨大的空调负荷使得负荷特性持续恶化,不利于电网的经济安全运行,同时降低了电网的运行效率。近年来,对空调负荷的研究随着空调的普及不断深入。早期研究通过回归分析、负荷预报法预测分析空调负荷变化情况,然后出现了对空调实际工作原理的建模研究<sup>[3]</sup>和概率特性模型研究<sup>[4]</sup>。初步探究空调负荷变化特性在空调负荷实际工作特性的研究中仍有不足。随后,文献[5]通过分析空调电压动静态特性、启动和堵转状态,在电力系统动态模拟实验空调特性试验的基础上建立了空调负荷运行特性模型。为了分析夏季含有大量空调区域的负荷特性,文献[6]提出了一种基于地理分区,按照负荷节点类型计算空调负荷比例的实用化方法。文献[7]提出了一种可中断负荷控制模式响应电网紧急状态的方法。考虑空调运行原理的负荷模型有效提高了模型准确性,但是缺少将空调负荷应用到调峰控制方面的分析探究。

于是,在简化空调负荷建模的基础上,提出了许多控制空调负荷参与需求响应的控制策略<sup>[8-11]</sup>。文献[12]基于对聚合温控负荷参与价格响应的研究,提出了一种联络线功率平滑算法用于居民温控负荷的控制。王怡岚等<sup>[13]</sup>考虑空调-建筑的热储备能力,构建了空调负荷群的聚合模型,分析了空调负荷群的虚拟储能控制策略。王蓓蓓等<sup>[14]</sup>建立了

基于直接负荷控制的中央空调集群降负荷潜力模型和指定降负荷容量下中央空调集群运行方式的求解模型,分析了中央空调负荷参与需求侧响应的降负荷潜力的影响规律。然而,为了便于研究空调负荷参与需求响应的特性,以上空调负荷模型在一定程度上降低了精确性和准确度。

RT-LAB 作为近年来兴起的实时仿真平台,越来越多地应用于电机建模<sup>[15-16]</sup>、微电网运行控制策略研究<sup>[17-18]</sup>和电力电子设备控制<sup>[19]</sup>中。该平台使仿真从纯数字仿真转向半实物半数字仿真,有效提高仿真速度。本文基于 RT-LAB 仿真平台建立了一个空调房简化模型,并提出了几种空调负荷参与调峰控制的策略,最后在仿真平台上进行仿真分析。

### 1 空调房建模

#### 1.1 变频空调简化模型

压缩机在空调系统中至关重要,被视为空调系统的核心。整个空调的耗电量主要集中在压缩机电机的运转上,占系统总耗电量的 80%~87%<sup>[20]</sup>,所以压缩机电机的用电特性基本反映了空调的用电特性。为了在准确反映用电特性的同时尽可能简化模型,本文用压缩机电机取代复杂的空调系统,在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了变频空调系统的简化模型。

采用矢量控制<sup>[21-22]</sup>控制空调电机转速。将异步电机的定子电流分解为正交磁场分量  $i_d$  和转矩分量  $i_q$ ,通过控制解耦的  $i_d$  和  $i_q$  得到异步电机的电磁转矩,表达式如(1)所示。

$$T_e = K i_d i_q \quad (1)$$

式中: $K$  为比例系数; $T_e$  表示异步电机的电磁转矩。

收稿日期:2018-07-16;修回日期:2018-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577028)

将  $d-q$  坐标系转化为转子磁链坐标系 ( $M-T$  坐标系), 旋转坐标  $M-T$  下的电机状态方程及转矩表达式如下:

$$\begin{pmatrix} \ddot{i}_{m1} \\ \ddot{i}_{t1} \\ \dot{\varphi}_{m2} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{A} \begin{pmatrix} B & A\dot{\varphi} & D & C \\ -A\dot{\varphi} & B & -C & D \\ AD & 0 & -A\frac{R_2}{L_2} & A\dot{\lambda} \\ 0 & AD & A\dot{\lambda} & -A\frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{m1} \\ i_{t1} \\ \varphi_{m2} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_2 & 0 \\ 0 & L_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{m1} \\ u_{t1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中:

$$A = L_1 L_2 - L_m^2 \quad (3)$$

$$B = -R_1 L_2 - \frac{R_2}{L_2} L_m^2 \quad (4)$$

$$C = L_m (\dot{\varphi} - \dot{\lambda}) \quad (5)$$

$$D = \frac{L_m}{L_2} R_2 \quad (6)$$

$$\dot{\varphi}_{m2} = \frac{L_m R_2}{L_2} i_{m1} - \frac{R_2}{L_2} \varphi_{m2} \quad (7)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{L_m R_2}{L_2} i_{t1} \quad (8)$$

式中:下标“1”表示定子;下标“2”表示转子;“ $m$ ”表示旋转坐标系下的  $M$  轴,“ $t$ ”表示旋转坐标系下的  $T$  轴; $R, L, i, \varphi, \dot{\varphi}$  分别表示相应位置的电阻、电感、电流、磁势和磁通; $\ddot{i}_{m1}, \ddot{i}_{t1}$  分别表示  $M$  轴和  $T$  轴定子电

流的二阶导数; $\dot{\varphi}_{m2}$  表示  $M$  轴转子磁通的一阶导数; $\dot{\lambda}$  表示转子磁链旋转角速度和转子旋转角速度之差, $\dot{\lambda} = \dot{\varphi} - \dot{\theta}_0$ 。相应地,电机转矩变为:

$$T = p_n \frac{L_m}{L_2} i_{t1} \varphi_{m2} \quad (9)$$

式中: $p_n$  表示极对数。

压缩机转矩和消耗电功率的关系如式(10):

$$P = \eta T R_t / 9550 \quad (10)$$

式中: $P$  为压缩机电功率; $R_t$  为某时刻压缩机运行转速; $\eta$  表示机械功率与电功率转换效率系数。

变频空调压缩机电机转速由室温与设定温度之差决定<sup>[10]</sup>,符合式(11):

$$R_t = \begin{cases} R_{\max} & \Delta T \geq N \\ R_{t-1} + k\Delta T & M < \Delta T < N \\ R_{\min} & \Delta T \leq M \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta T = T_{in} - T_{set}$  为室温 and 设定温度之差; $R_{\max}, R_{\min}$  分别为压缩机最高和最低工作转速,决定了运行频率的最大和最小值; $k > 0$  且由检测温差的时间间隔决定。

式(12)给出了制冷量与房间进出风温度差和室内风机出风量的关系。

$$Q_a = c_a \rho_a V_a \Delta t \quad (12)$$

结合出风量变化正比于压缩机电机转速变化的函数关系  $V_a = R_t S$  建立制冷量控制模型。其中, $Q_a$  为空调制冷量; $c_a$  为制冷气体的比热容; $\rho_a$  为制冷气体密度; $V_a$  为空调室内机风机出风量; $\Delta t$  为房间进出风温度差; $S$  为出风面积。

综上,在 Simulink 平台上搭建的变频空调简化模型如图 1 所示。

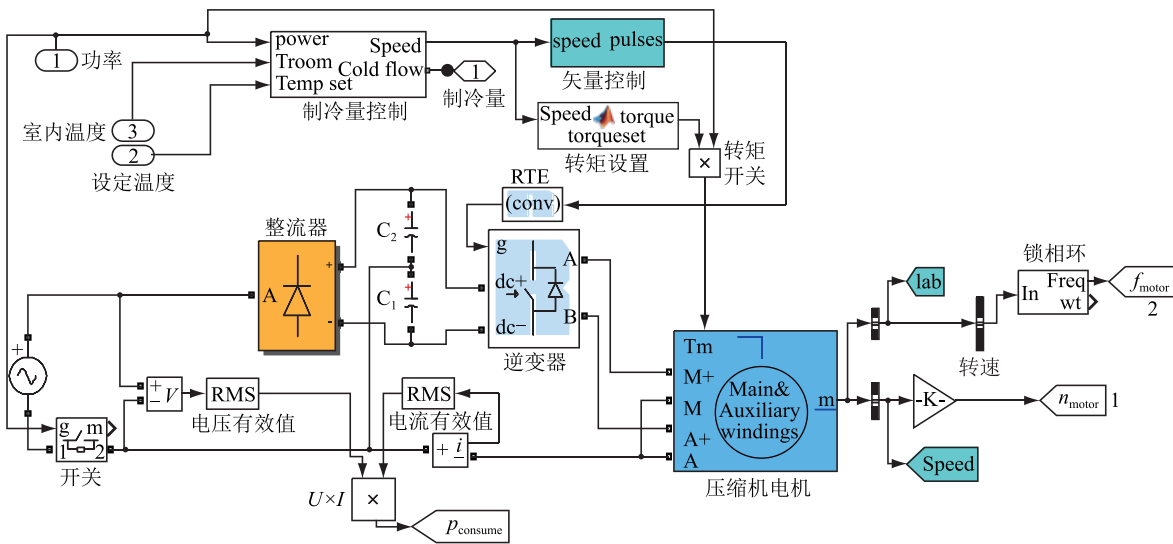


图 1 变频空调简化模型

Fig.1 Simplified variable frequency air conditioner model

## 1.2 房间简化模型

采用集总参数假设<sup>[23]</sup>对墙壁、门窗进行分层建模<sup>[24]</sup>,每一层的温度等属性参数完全相同。将墙壁分层图转化为R-C等效电路如图2所示。

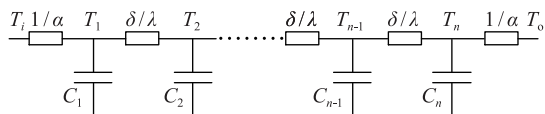


图2 墙壁的R-C等效电路

Fig.2 R-C equivalent circuit of the wall

每一层有如下表达式:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = \alpha(T_i - T_1) + \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)_1 (T_2 - T_1) + Q_a \quad i = 1 \quad (13)$$

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)_i (T_{i-1} - T_i) + \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)_{i+1} (T_{i+1} - T_i) \quad i = 2, \dots, n - 1 \quad (14)$$

$$C_n \frac{dT_n}{dt} = \alpha(T_o - T_n) + \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)_n (T_{n-1} - T_n) + Q_o \quad i = n \quad (15)$$

式中:  $T_i, C_i, 1/\alpha, (\delta/\lambda)_i$  分别为墙体分层模型第  $i$  层的温度、等效电容和等效电阻;  $Q_a, Q_o$  分别为室内、外热量;  $T_o$  为室外温度。

出于简化模型、提高仿真速度的考虑,采用墙壁的两层模型(2R-1C)。

对于室内人体对空气的热辐射情况,把所有人等效为一个体表面积加和、质量加和,温度恒为人体温度的热质量模块,该模块按照人体和空气的热传递系数与室内空气模型相连,进行热交换。

人体和门窗的传热模型与墙壁传热类似,根据传热方程在 Simulink 平台搭建简化房间模型<sup>[25]</sup>,如图3所示。结合变频空调模型和房间简化模型建立完整的简化空调房调温模型。

## 2 定变频空调控制策略研究分析

### 2.1 定变频空调室温调节

定变频空调运行模式有较大差异。定频空调只有两种运行状态:额定工作状态和停机状态。定频空调压缩机循环启停,使得室温在  $[T_{set} - K_1, T_{set} + K_2]$  范围内波动。如果范围过大,空调用户使用的舒适度就会下降;如果范围过小,空调频繁启停,会消耗更多电能,而且缩短空调使用寿命。定频空调调温曲线如图4所示。

变频空调根据室温与设定值的温差调节供电频率改变压缩机电机转速。温差较大时,变频空调制冷量较大,温差降低时,制冷量相应减小,维持室

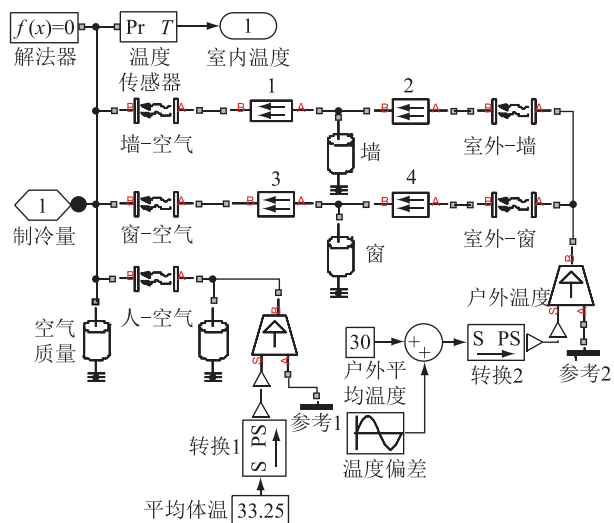


图3 房间传热模型

Fig.3 Room heat transferring model

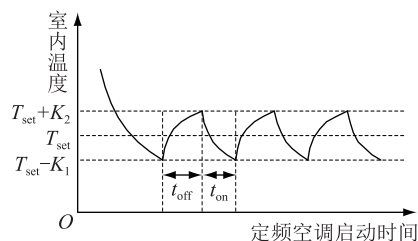


图4 定频空调调温曲线

Fig.4 Curves of constant-speed air conditioner regulating temperature

温在设定温度周围浮动。变频空调调节室温波动小,室温达到设定温度后空调低功率运行,更加节能。变频空调调温曲线如图5所示。

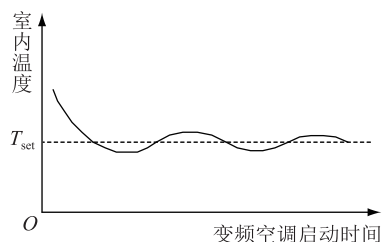


图5 变频空调调温曲线

Fig.5 Curves of variable frequency air conditioner regulating temperature

### 2.2 增大空调变频区间

变频空调的变频区间通常为 30~120 Hz。一般来说,空调在室温没有达到设定温度且与设定温度有较大偏差时,压缩机以最高设定频率工作。最高频率决定了压缩机驱动电机的最高转速,最高频率越大,则最高转速越大,输出的制冷量越大,室温达到设定温度的速度越快。

当室温达到设定温度或者低于设定温度时,空调以最低频率运行,使室温维持在设定温度附近,

最低频率的大小等因素决定了室温维持在设定温度附近的波动大小。通常最低频率越小,室温保持在设定温度附近的波动越小,耗电量越低,用户舒适度越好。当然,室温的波动范围还会受到环境的影响,房间大小、室内热源多少等都会影响空调能否工作在最低频率。图 6 给出了变频空调在大小不同变频区间内的调温曲线。

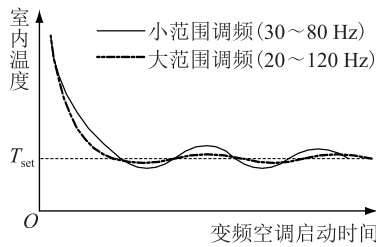


图 6 变频区间大小不同的空调调温曲线对比

Fig.6 Contrast of temperature regulating by air conditioners with different frequency variation ranges

### 2.3 适应负荷曲线互补运行

参与电网辅助服务时,变频空调需要获得电网信息并协调运作。传统的空调控制系统需要进行改造才能满足要求,从而参与到调峰控制等电网辅助服务中去。

#### 2.3.1 空调控制系统改造

为了保证空调的正常运作和有效参与调控,只对空调的控制系统加以改造。

如图 7 所示,红色部分是该响应策略所要求对空调做出的系统改造,包括加入电网频率和电压检测模块和接收电网调度发布的日前负荷预测曲线。变频空调可以根据负荷曲线做出相应的调峰控制,还可以结合电网频率下降和电压跌落参与紧急频率响应等其他电网辅助服务。

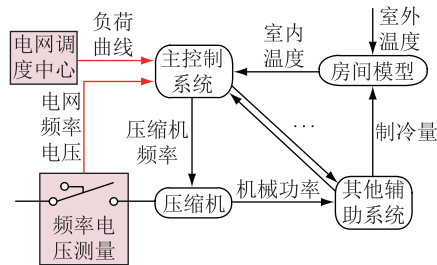


图 7 改造的空调系统

Fig.7 Modified air conditioning system

#### 2.3.2 自适应互补运行策略

空调负荷参与电网削峰填谷调度可以有效缓解电网峰荷压力。然而,目前空调负荷参与需求侧响应主要通过被动的直接负荷控制,这种模式不仅影响参与用户的舒适度体验,还会因为调度命令发

送延时等问题影响削峰效果。

本文提出一种主动而及时的空调运行响应策略,以便更有效地发挥空调负荷削峰填谷的作用。空调根据接收到的给定区域电网预测或实时负荷大小,调整设定温度在用户设定温度周围小范围波动,在保证用户舒适度的前提下,与负荷曲线互补运行。也就是说,如果区域负荷量在下一控制周期(如 15 min)内比当前周期有所增长,则适当升高空调设定温度使空调降低功率运行,从而减小区域总负荷增长量。当负荷值达到峰值附近时,空调应处于最低功率运行或停运状态,以减小负荷值缓解电网压力,但此时仍应保证室温让用户舒适;当预测区域负荷量开始减小时,空调及时降低设定温度,增大功率运行,以提高空调用户舒适性,但此时需注意空调增大的负荷不应产生新的峰荷。

把这种控制策略集成到空调主控制芯片中,使空调配合区域日负荷大小互补运行,将有效起到削峰填谷、平滑负荷曲线的作用。

## 3 RT-LAB 仿真分析

为了提高模型仿真精度并缩短仿真时间,将基于 Simulink 建立的空调房调温模型在 RT-LAB 平台上仿真。

某日户外温度变化函数近似如下式:

$$T_{out}(t) = 30 + 6\sin\left(\frac{2\pi}{24 \times 3600}t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (16)$$

以某大学办公室为例,窗户和墙体的相关参数如表 1 所示。表 2 给出了简化空调房模型室内人体和空气的相关参数<sup>[26]</sup>,表 3 给出了简化空调房模型传热系数<sup>[27]</sup>。

表 1 简化空调房模型窗户和墙体参数表

Tab.1 Parameters of windows and walls in simplified air conditioning room

窗户属性	数值	墙体属性	数值
个数	3	长度/m	15
高度/m	1.5	高度/m	3.5
宽度/m	1	宽度/m	10
厚度/m	0.01	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1920
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2700	比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	835
比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	840	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	0.38
导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	0.78		

### 3.1 不同变频区间空调调温仿真

改变空调房模型空调压缩机电机的调频区间,

表2 简化空调房模型室内人体和空气参数表

Tab.2 Parameters of human bodys and air in simplified air conditioning room

人体属性	数值	空气属性	数值
人数	10	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.225
体表面积/ $\text{m}^2$	1.8	比热容/[ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	1 005.4
体重/kg	65	初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
比热容/[ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	4200		
体表平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	33.25		

表3 简化空调房模型传热系数表

Tab.3 Heat transfer coefficients between objects in simplified air conditioning room

材料	传热系数/[ $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ]
室内空气-墙体	24
墙体-室外环境	34
室内空气-窗户	25
窗户-室外环境	32
室内空气-人体	15

进行室温调节仿真实验,图8给出了变频空调在大范围调频(15~100 Hz)和小范围(30~80 Hz)的室温变化曲线。

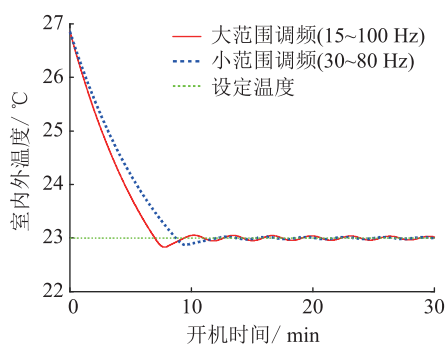


图8 空调房室温变化曲线

Fig.8 Temperature variation in air conditioning room

图9给出了变频空调在上述两种调频区间运行方式下的耗电量对比图,容易发现增大空调调频区间对于长时间运行具有良好的经济效益。考虑到房间大小等各种因素的影响,低频保持室温更省电的特性不一定完整地表现出来。

归根结底,增大变频区间能否提高经济效益取决于空调不同运行状态下的能效比高低,低频段或高频段的能效比越高,越有助于大范围变频空调经济效益的提高。

### 3.2 适应负荷曲线的空调互补运行仿真

对于一个给定的夏季某日预测负荷曲线,每15 min为一段。考虑到人体对环境感到舒适的温度为某一区间:24~26.5 $^{\circ}\text{C}$ ,因此在峰荷时段到来前使室温

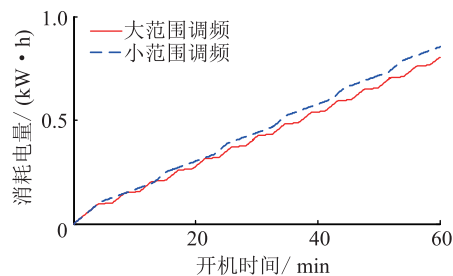


图9 不同变频区间内空调运行耗电量对比

Fig.9 Comparison of operating power consumption of air conditioner in different frequency conversion

达到24 $^{\circ}\text{C}$ ,在峰荷的若干个时段里将设定温度改为26.5 $^{\circ}\text{C}$ ,峰荷时段过后恢复设定温度为24 $^{\circ}\text{C}$ 。自适应互补运行策略在不影响用户舒适度的前提下进行(不考虑湿度等其他因素对人体舒适度的影响),温度未达到舒适温度或负荷曲线未达到响应阈值时不采取该策略。将互补运行策略添加到空调模型控制中,进行RT-LAB半实物平台的实时仿真。

预测负荷曲线图和相应的空调互补运行状态图(功率和室温变化曲线)如图10和图11所示。

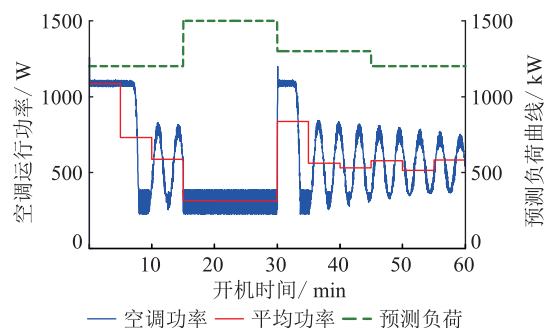


图10 某时段预测负荷和空调互补运行功率曲线

Fig.10 Curves of forecast load and air conditioning complementary operation power variation in one time period

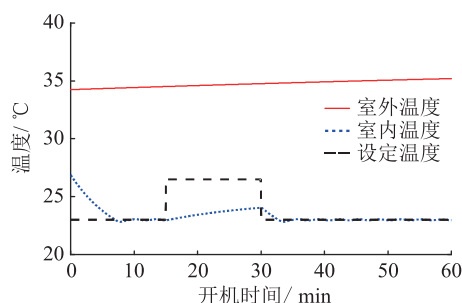


图11 空调互补运行室温变化

Fig.11 Room temperature variation while air conditioning complementary operation

由此可见,空调自适应负荷曲线互补运行模式是一种自动减负荷策略,这种负荷控制在减小峰荷

对电网压力的同时也能保证用户的使用舒适度,也能减少用户峰时用电成本。

#### 4 结语

空调负荷在参与电网削峰填谷调控策略中发挥着愈发重要的作用,所建立的简化空调房调温模型从空调运行的基本原理出发,提出了利于电网稳定运行的空调自适应互补运行模式,并在 RT-LAB 平台上进行了简单的验证试验。

本文对空调运行、调控策略进行了初步研究,但还缺少实际样机数据支撑及其参与削峰的实际效果探究。因此后续的研究工作可以从空调改造样机开发完善等方面展开。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 史 静,周 琪,谈 健,等. 江苏电网夏季空调负荷特性挖掘与温度敏感性辨识[J]. 电力工程技术,2018,36(3):28-32.  
SHI Jing, ZHOU Qi, TAN Jian, et al. The load excavation and temperature sensitivity identification of air conditioning in summer of Jiangsu Power Grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 36(3): 28-32.
- [3] MANICHAIKUL Y, SCHWEPPE F C. Physically based industrial electric-load [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(4): 1439-1445.
- [4] MOLINA-GARCIA A, KESSLER M, FUENTES J A, et al. Probabilistic characterization of thermostatically controlled loads to model the impact of demand response programs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 241-251.
- [5] 郑亮宏,朱守真,王 光,等. 空调负荷运行特性研究及建模[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):67-73.  
ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, WANG Guang, et al. Key characteristics and modeling of air conditioner load [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 67-73.
- [6] 陈 谦,陆杨文,孙建波,等. 含有空调的综合电力负荷建模研究[J]. 高电压技术,2008,34(4):759-762.  
CHEN Qian, LU Yangwen, SUN Jianbo, et al. Load modeling including air conditioners [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 759-762.
- [7] 方 超,陈 楚,熊 政,等. 基于用户可中断负荷的实时负荷控制决策技术应用[J]. 电力工程技术,2017,36(4):108-112.  
FANG Chao, CHEN Chun, XIONG Zheng, et al. Application of real-time load control decision technology based on user's interruptible load [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 108-112.
- [8] HU X, WANG B, YANG S, et al. A closed-loop control strategy for air conditioning loads to participate in demand response [J]. Energies, 2015, 8(8): 8650-8681.
- [9] YAN C, XUE X, WANG S, et al. A novel air-conditioning system for proactive power demand response to smart grid [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102(2015): 239-246.
- [10] 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.  
DING Xiaoye. Regulating strategy and effect evaluation of inverter air-conditioner applied in demand response [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [11] SHOU Q. A new central air-conditioning system control strategy based on prediction model [C] // 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT). Chengdu, China; 2010: 479-482.
- [12] 秦晓辉,张彦涛,葛磊蛟,等. 多态用能与电网间安全稳定的协调控制框架设计[J]. 电力工程技术,2017,36(5):8-14.  
QIN Xiaohui, ZHANG Yantao, GE Leijiao, et al. A framework design of coordinated control for multi-energy's utilization and grid's security and stability [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 8-14.
- [13] 王怡岚,童亦斌,黄 梅,等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术,2017,41(2):394-401.  
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [14] 王蓓蓓,朱 峰,嵇文路,等. 中央空调负荷潜力建模及影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(19):44-52.  
WANG Beibei, ZHU Feng, JI Wenlu, et al. Load cutting potential modeling of central air-conditioning and analysis on influencing factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 44-52.
- [15] CHEN H, GAN C, XIA B, et al. RT-LAB simulator platform for simulation of switched reluctance machine [C] // 21st IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Hangzhou, China; 2012: 738-741.
- [16] KRISHNA M, DAYA F. Adaptive speed observer with disturbance torque compensation for sensorless induction motor drives using RT-Lab [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2016, 24(5): 3792-3806.
- [17] VECHIU I, ETXEBERRIA A, TABART Q. Power quality improvement using an advanced control of a four-leg multilevel converter [C] // IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Vancouver, Canada; 2015.
- [18] BUESCHER M, CLAASSEN A, KUBE M, et al. Integrated smart grid simulations for generic automation architectures with RT-LAB and mosaik [C] // 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Venice, Italy, 2014: 194-199.
- [19] HADDAD M, KTATA S, RAHMANI S, et al. Real time simula-

- tion and experimental validation of active power filter operation and control [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2016, 130(C):212-222.
- [20] GAIKWAD A M, BRAVO R J, KOSTEREV D, et al. Results of residential air conditioner testing in WECC [C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh, USA; 2008:1-9.
- [21] 张斯瑶. 变频空调压缩机电机的参数辨识[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
ZHANG Siyao. Parameter identification of variable-frequency air conditioning compressor [D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2012.
- [22] 李家荣, 邓智泉. 三相异步电动机矢量控制调速系统的建模与仿真[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2001, 10(2):23-26.  
LI Jiarong, DENG Zhiqian. Modelling and simulation of vector control adjustable-speed system of asynchronous motor [J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology*, 2001, 10(2):23-26.
- [23] YU B, PAASSEN A H C V. Simulink and bond graph modeling of an air-conditioned room [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2004, 12(1):61-76.
- [24] HRTADO L A, NGUYEN P H, KLING W L, et al. Building energy management systems-optimization of comfort and energy use [C] // 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Dublin, Ireland; 2013:1-6.
- [25] LAPUSAN C, BALAN R, HANCU O, et al. Development of a multi-room building thermodynamic model using Simscape library [C] // Conference on Sustainable Solutions for Energy and Environment (EENVIRO - YRC). Bucharest, Romania; 2016:320-328.
- [26] 彭见曙, 夏雅琴, 林兆娣. 体表温度及其总体平均值的测量与统计分析[J]. *北京工业大学学报*, 1994, 20(1):49-53.  
PENG Jianshu, XIA Yaqin, LIN Zhaodi. The measuring and statistic analysis of mean skin temperature [J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 1994, 20(1):49-53.
- [27] 马最良, 姚 杨. 民用建筑空调设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:17-90.  
MA Zuiliang, YAO Yang. *Civil building air conditioning design* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:17-90.

---

作者简介:



王 栋

王 栋(1995—),男,硕士研究生,研究方向为需求响应与负荷调控(E-mail:winterswang@foxmail.com);

徐青山(1979—),男,博士,博士生导师,教授,研究方向为智能配电系统与微网(E-mail:xuqingshan@seu.edu.cn);

陈 亮(1989—),男,博士,工程师,从事直流配电网运行控制工作。

## Air Conditioning Load Modeling and Simulation of Peak Load Regulation

WANG Dong<sup>1</sup>, XU Qingshan<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>, YUAN Xiaodong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Controlling air conditioning load to participate in the power grid load shifting has great potential for maintaining stable operation of the system, reducing the reserve of generators, and improving the efficiency of the grid. Based on the principle of the household decentralized air conditioner, a simplified air conditioning room temperature adjustment model was built in the MATLAB/Simulink environment. Based on the model, the characteristics of the fixed/inverter air conditioner temperature adjustment and influence of adjusting frequency conversion interval were studied in turn. Considering characteristics of air conditioners, a strategy is proposed to conduct an adaptively complementary operation of the air conditioner according to grid load. Finally, the model simulation test based on RT-LAB real-time simulation platform is carried out, which verifies the correctness of the model and effectiveness of the strategy to participate air conditioners in peak shaving control.

**Key words:** air conditioning load; modeling and simulating; complementary operation; peak shaving control

(编辑 钱 悦)