

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200548

## 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制

杨梓俊<sup>1</sup>, 丁小叶<sup>2</sup>, 陆晓<sup>1</sup>, 张卫国<sup>3</sup>, 李雪明<sup>3</sup>, 荆江平<sup>1</sup>, 高赐威<sup>4</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 国网江苏省电力有限公司南通供电分公司, 江苏 南通 226006;  
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 4. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 近年来, 空调类电力用户数量迅速增加, 成为了电网高峰负荷的主要组成部分。空调负荷作为典型柔性负荷, 可利用其热惯性参与需求响应, 为电网提供有效可调容量。区别于有关定频空调的研究, 基于变频空调的负荷特性构建其物理模型, 从控制后总功率和最大控制时长两个维度对变频空调集群的调节潜力进行评估。在此基础上, 根据变频空调负荷聚合商在需求响应日前市场的成交量, 以变频空调集群功率削减量与成交量偏差以及用户舒适度变化量最小化为目标, 提出了基于双层分组轮控的变频空调负荷优化控制策略。仿真结果表明, 所提策略不仅能够通过分组轮控延长变频空调集群最大控制时长, 还具有良好的用户友好性, 对于变频空调集群参与电网需求响应具有指导意义。

**关键词:** 变频空调; 需求响应; 调节潜力; 分组轮控; 负荷控制

### Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response

YANG Zijun<sup>1</sup>, DING Xiaoye<sup>2</sup>, LU Xiao<sup>1</sup>, ZHANG Weiguo<sup>3</sup>, LI Xueming<sup>3</sup>, JING Jiangping<sup>1</sup>, GAO Ciwei<sup>4</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 2. Nantong Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nantong 226006, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;  
4. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In recent years, the number of air conditioner users has increased rapidly, becoming a major component of the peak load in a power system. As a typically flexible load, air conditioners can participate in demand response and provide efficient adjustable capacity to the grid because of their thermal inertia. In contrast to the studies on fixed-frequency air conditioners, this paper constructs a physical model of inverter air conditioners based on their load characteristics and evaluates their flexibility potential from two perspectives, including total power after control and maximum control time. From the trading volume of inverter air conditioner aggregators in the day-ahead market for demand response, an optimal load control strategy for inverter air conditioners based on bi-level group rotation control is proposed. The strategy is aimed at minimizing the deviation between the power reduction of the inverter air conditioner cluster and the trading volume, while minimizing the change of user comfort. Simulation results show that the strategy proposed in this paper can not only extend the maximum control time through rotation control, but also is user-friendly, such that it is of guiding significance for the inverter air conditioner cluster participating in the demand response of the power grid.

This work is supported by the High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050401) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51577029).

**Key words:** inverter air conditioner; demand response; flexibility potential; group rotation control; load control

## 0 引言

近年来, 随着社会经济的发展, 城市电力负荷

迅速攀升, 负荷峰谷差日益增加, 电网调峰面临巨大困难。此外, 光伏、风电等新能源并网量不断增加, 其出力的间歇性和波动性极大地增加了电力系统潮流的不确定性, 给电网的安全稳定运行带来了巨大挑战<sup>[1-4]</sup>。在此背景下, 仅依靠传统的发电侧资源已难以满足电力系统的调控需求, 维持实时供需

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助(国家 863 计划)(2015AA050401); 国家自然科学基金项目资助(51577029)

平衡, 电网亟需大量柔性资源来维持系统功率动态平衡。

随着高级量测技术、双向通信、控制和信息技术的发展, 对用户侧设备进行功率调控已经成为可能, 空调负荷<sup>[5]</sup>、电热水器<sup>[6]</sup>、电动汽车<sup>[7-10]</sup>等柔性负荷可通过调节用电功率或转移用电时段, 为电网提供调频<sup>[11]</sup>、调压<sup>[12]</sup>、备用<sup>[13]</sup>等辅助服务, 帮助电力系统保持功率平衡<sup>[14]</sup>。空调负荷作为一种典型柔性负荷, 一方面, 在保证用户舒适度的前提下, 可利用建筑热惯性实现功率调整, 是一种经济可靠的需求响应资源<sup>[15]</sup>, 另一方面, 空调负荷体量大, 尤其在夏季占负荷高峰的比值可达 30%~50%, 需求响应潜力巨大, 通过合理调控, 能够有效实现调峰目标<sup>[16]</sup>。近年来成为了需求响应领域的研究热点。

目前已有的研究中, 参与需求响应的空调负荷以定频空调为主。单台定频空调的建模目前通常采用等效热参数和基于冷(热)负荷计算的建模方法<sup>[17]</sup>。聚合建模主要采用基于历史数据的回归模型<sup>[18]</sup>、基于建筑物能耗模拟的物理模型<sup>[19]</sup>和简化数学模型<sup>[20-24]</sup>。控制架构则主要包括集中控制、分散控制和包含负荷聚合商的分布式控制<sup>[15]</sup>。参与需求响应的调控策略方面, 文献[25]提出了一种基于最小焓值估计的温度调控方法, 在保证舒适度的前提下最大化负荷削减量。文献[26]采用免疫克隆选择规划方法, 以最大化用户利益为目标对设定温度进行优化。文献[27]针对空调负荷波动问题提出了对每台空调设定温度进行上下限分离控制的方法。

近年来, 变频空调的市场占有率不断提高, 从 2014 年的 57.9% 逐步上升至 2019 年的 77.3%。变频空调的压缩机频率可调, 因此其控制策略与定频空调有差异。相比于定频空调, 目前有关变频空调调控的研究较少。建模方面, 文献[28-29]构建了变频空调的虚拟储能模型, 文献[30]构建了用户舒适度的量化评估模型; 应用场景方面, 文献[31-33]分别通过调控变频空调帮助电力系统调峰、调频、调压和平抑风电波动, 文献[34]采用主动响应和被动响应两种控制方式, 分别应用于调频和吸收联络线功率波动。目前变频空调参与电网调度发布的需求响应的相关研究很少, 变频空调参与需求响应的调节潜力评估和控制方法也都缺乏理论依据, 因此亟待进一步研究。

本文基于空调房间的一阶等效热参数模型, 采用回归分析方法辨识变频空调工作频率、电功率以及制冷量之间的函数关系; 在保证用户舒适度的基础上, 对变频空调集群的需求响应调节潜力进行评估; 以变频空调集群功率削减量与需求响应日前市

场成交量偏差最小化以及用户舒适度变化量最小化为目标, 提出了基于双层分组轮控的变频空调负荷优化控制策略; 最后采用遗传算法进行算例分析, 验证了本文所提策略的有效性。

## 1 变频空调需求响应机制

变频空调负荷功率较小且位置分散, 一般通过负荷聚合商聚合的方式参与需求响应。需求响应市场环境下, 负荷聚合商可作为变频空调负荷的代理参与市场申报。

本文基于电网调度、负荷聚合商和变频空调负荷构成的需求响应三层框架进行研究, 变频空调负荷参与需求响应的流程如下:

- 1) 电网调度向负荷聚合商发送需求响应日前市场信息, 包括需求响应时段和需要的削减量;
- 2) 负荷聚合商根据次日需求响应持续时长对变频空调集群的调节潜力进行评估, 在需求响应日前市场进行报量和报价;
- 3) 电网调度根据负荷聚合商的报价进行市场出清, 并将出清结果发送给负荷聚合商;
- 4) 在日内, 负荷聚合商根据市场成交量, 采用分组轮控对变频空调负荷进行优化控制。

需求响应三层框架的信息交互如图 1 所示。

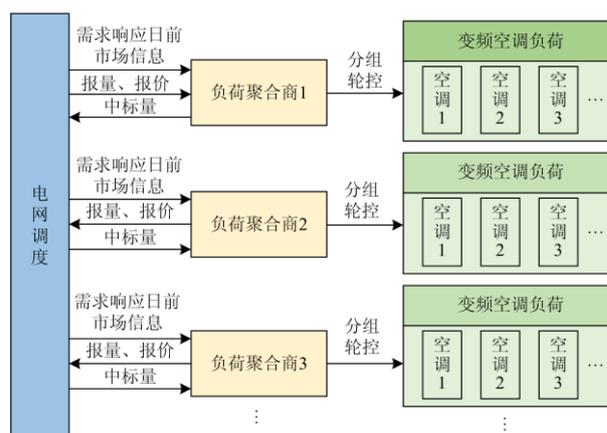


图 1 需求响应三层框架的信息交互

Fig. 1 Information interaction in the three-layer framework of demand response

## 2 变频空调物理模型

### 2.1 空调房间热力学模型

以一阶等效热参数模型(Equivalent Thermal Parameters, ETP)<sup>[35]</sup>表征空调房间的热动态过程, 如式(1)所示, 结合式(2)可建立空调电功率与室内温度的函数关系。

$$T_{t+1}^{\text{in}} = T_{t+1}^{\text{out}} - Q_t \cdot R - (T_t^{\text{out}} - Q_t \cdot R - T_t^{\text{in}}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R \cdot C}} \quad (1)$$

$$Q_t = P_t \cdot \eta \quad (2)$$

式中:  $T_t^{\text{in}}$  为  $t$  时段的室内温度;  $T_t^{\text{out}}$  为  $t$  时段的室外温度;  $Q_t$  为  $t$  时段的空凋制冷量;  $R$  为房间等效热阻;  $C$  为房间等效热容;  $\Delta t$  为一个时段的持续时长;  $P_t$  为空调  $t$  时段的电功率;  $\eta$  为空凋制冷能效比。

### 2.2 压缩机频率与空调电功率、制冷量的关系

文献[36]中, 空凋压缩机频率与空凋电功率、制冷量以及能效比之间的关系如图 2 所示。因此压缩机频率与空凋电功率之间的关系可拟合为式(3)所示的一次函数, 压缩机频率与空凋制冷量之间的关系可拟合为式(4)所示的二次函数。

$$P_t = d \cdot f_t + e \quad (3)$$

$$Q_t = a \cdot f_t^2 + b \cdot f_t + c \quad (4)$$

式中:  $f_t$  表示空凋压缩机  $t$  时段的频率;  $d$ 、 $e$  及  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均表示函数常系数。

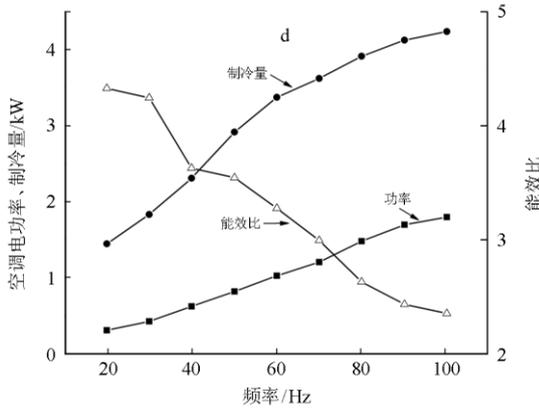


图 2 压缩机频率与空凋电功率、制冷量以及能效比的关系

Fig. 2 Relationship between compressor frequency and air conditioner electric power, cooling capacity, energy efficiency ratio

### 2.3 压缩机频率与室内温度的关系

压缩机频率与室内温度的函数关系一般由室内温度与设定温度的温度差决定, 温度差大于  $N$  时, 压缩机以最高频率运行, 温度差小于  $n$  时, 压缩机以最低频率运行, 如式(5)、式(6)所示<sup>[8]</sup>。

$$\Delta T_t = T_t^{\text{in}} - T_t^{\text{s}} \quad (5)$$

$$f_{t+1} = \begin{cases} f_{\text{max}} & N < \Delta T_t \\ f_t + K \cdot \Delta T_t & n \leq \Delta T_t \leq N \\ f_{\text{min}} & \Delta T_t < n \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta T_t$  为  $t$  时段室内温度与设定温度的温度差;  $T_t^{\text{s}}$  为  $t$  时段的设定温度;  $f_{\text{max}}$ 、 $f_{\text{min}}$  分别为压缩机

频率上限和下限;  $K$  为常数,  $K > 0$ 。

式(1)一式(6)构成了变频空凋的物理模型。

## 3 变频空凋调节潜力评估

负荷聚合商在日前市场申报功率削减量需要以变频空凋集群的调节潜力为依据。单台变频空凋的调节潜力受调控时长影响, 尽管短时间内以最低频率运行不会对用户舒适度带来明显影响, 但长时间以较低频率运行会使得空凋房间温度明显偏离用户舒适度需求。本文针对空凋集群, 采用分组轮控的方式在一定室内温度范围内进行调节潜力评估。

### 3.1 变频空凋最低频率运行时长

将变频空凋设定温度提高后, 其压缩机频率会瞬间变为最低值, 根据式(1)可得到该场景下室内温度的变化情况, 如式(7)所示。

$$T_{t+1}^{\text{in}} = T_{t+1}^{\text{out}} - Q_{\text{min}} \cdot R - (T_t^{\text{out}} - Q_{\text{min}} \cdot R - T_t^{\text{in}}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R \cdot C}} \quad (7)$$

若将设定温度由  $T^{\text{s}1}$  调节至  $T^{\text{s}2}$  ( $T^{\text{s}2} > T^{\text{s}1}$ ), 则根据式(7)可计算出压缩机以最低频率运行的时间  $T_{\text{last}}$  为

$$T_{\text{last}} = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{T^{\text{s}1} - T_t^{\text{out}} + Q_{\text{min}} \cdot R}{T^{\text{s}2} - T_t^{\text{out}} + Q_{\text{min}} \cdot R}\right) \quad (8)$$

在单台变频空凋设定温度从  $25^\circ\text{C}$  调整为  $28^\circ\text{C}$  情况下, 其电功率和室内温度的变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出, 压缩机在 25 min 内以最低频率运行, 该时段室内温度仍可维持在用户舒适度范围内。

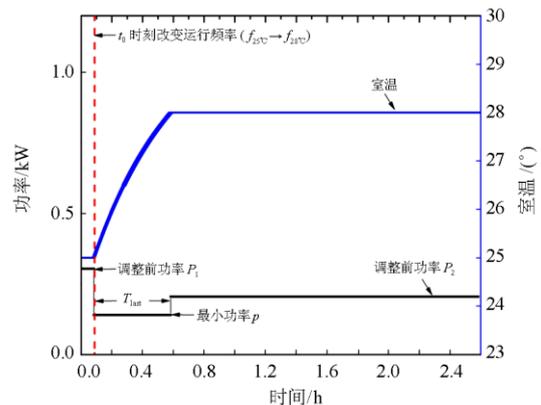


图 3 变频空凋电功率和室内温度曲线

Fig. 3 Electric power curve and indoor temperature curve of inverter air conditioner

### 3.2 基于变频空凋分组轮控的调节潜力评估

假设某空凋群共有  $N$  台空凋, 分为  $n$  组, 每组空凋台数分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\dots$ 、 $S_n$ 。同时以  $T_{\text{last}}$  为

一个时段,第  $n$  个时段控制第  $n$  组空调的设定温度。控制前各组空调的平均功率分别为  $P_{1,1}$ 、 $P_{1,2}$ 、 $\dots$ 、 $P_{1,n}$ , 最小功率分别为  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $\dots$ 、 $p_n$ ; 控制后各组的平均功率分别为  $P_{2,1}$ 、 $P_{2,2}$ 、 $\dots$ 、 $P_{2,n}$ , 空调总功率为  $P_s$ 。如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ p_1 & P_{1,2} & P_{1,3} & \cdots & P_{1,n-1} & P_{1,n} \\ P_{2,1} & p_2 & P_{1,3} & \cdots & P_{1,n-1} & P_{1,n} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & p_3 & \cdots & P_{1,n-1} & P_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} & \cdots & p_{n-1} & P_{1,n} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} & \cdots & P_{2,n-1} & p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ \vdots \\ S_{n-1} \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ P_s \\ P_s \\ P_s \\ \vdots \\ P_s \\ P_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

虽然单个空调由于参数型号等不同, 功率存在较小差异, 但空调总台数足够多时可近似认为各组平均功率相等并进一步化简可得式(10)。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 0 \\ p & P_1 & P_1 & \cdots & P_1 & P_1 & -1 \\ P_2 & p & P_1 & \cdots & P_1 & P_1 & -1 \\ P_2 & P_2 & p & \cdots & P_1 & P_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_2 & P_2 & P_2 & \cdots & p & P_1 & -1 \\ P_2 & P_2 & P_2 & \cdots & P_2 & p & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \vdots \\ S_{n-1} \\ S_n \\ P_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $p$  为空调的最小功率,  $p = p_1 = p_2 = \dots = p_n$ ;  $P_1$  为控制前各组的平均功率,  $P_1 = P_{1,1} = P_{1,2} = \dots = P_{1,n}$ ;  $P_2$  为控制后各组的平均功率,  $P_2 = P_{2,1} = P_{2,2} = \dots = P_{2,n}$ 。

进一步近似认为  $p \approx 0$ , 则控制后空调总功率  $P_s$  和  $N$ 、 $n$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  的关系可表示为

$$P_s = \frac{N \times (P_1^{n-1} \times P_2 + P_1^{n-2} \times P_2^2 + \cdots + P_1 \times P_2^{n-1})}{(P_1^{n-1} + P_1^{n-2} \times P_2 + \cdots + P_1 \times P_2^{n-2} + P_2^{n-1})} \quad (11)$$

为了确定在日前市场申报的功率削减量, 负荷聚合商进行的变频空调调节潜力评估的流程为: 根据电网调度发布的次日需求响应持续时长, 首先计算变频空调集群的分组数  $n$ , 如式(12)所示; 并将控制后空调各组的平均功率  $P_2$  取值为设定温度上限对应的功率, 根据式(1)、式(2), 其计算方法如式(13)所示; 再根据式(11)计算控制后变频空调集群的总功率  $P_s$ ; 从而得到变频空调集群的调节潜力和负荷聚合商申报的功率削减量, 如式(14)所示。

$$n = \left\lceil \frac{T_{dr}}{T_{last}} \right\rceil \quad (12)$$

$$P_2 = \frac{T_{out} - T_{max}}{R\eta} \quad (13)$$

$$B = \Delta P_{max} = P_b - P_s \quad (14)$$

式中:  $T_{dr}$  为次日需求响应持续时长;  $T_{out}$  为次日需求响应时段内的室外温度;  $T_{max}$  为设定温度上限;  $B$  为负荷聚合商申报的功率削减量;  $\Delta P_{max}$  为变频空调集群的调节潜力;  $P_b$  为控制前变频空调集群的总功率。

## 4 变频空调控制策略

### 4.1 变频空调集群的双层分组轮控

本文提出双层分组轮控策略对大规模变频空调集群进行功率控制, 具体控制结构如图4所示。

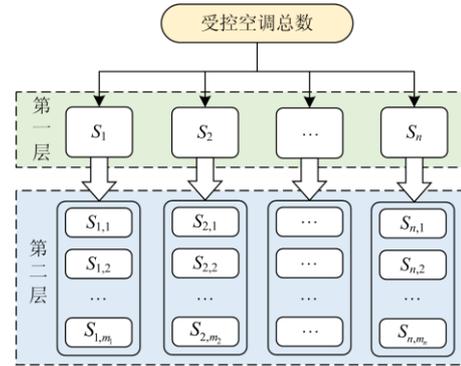


图4 变频空调集群双层分组轮控结构图

Fig. 4 Bi-level group rotation control structure of inverter air-conditioner group

第一层中, 根据式(12)和具体控制时长将空调集群分为  $n$  个大组进行轮控。第1大组空调第1个时段降至最低功率, 第2个时段调整为稳定运行功率; 第2大组空调第1个时段维持控制前功率, 第2个时段降至最低功率, 第3个时段调整为稳定运行功率; 其余大组同理。

第一层中, 各个大组中的空调数量分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\dots$ 、 $S_n$ ; 第二层中, 将第一层的每个大组平均分为多个小组进行优化控制, 第  $i$  个大组内的小组数为  $m_i$ , 各个小组中空调数量分别为  $S_{i,1}$ 、 $S_{i,2}$ 、 $\dots$ 、 $S_{i,m_i}$ 。小组数  $m_i$  需满足式(15)的约束。

$$m_i \geq \lceil S_i / S_{max} \rceil + 1 \quad (15)$$

式中,  $S_{max}$  表示第二层中每个小组内允许的最大空调台数。

### 4.2 变频空调集群的优化控制策略

电网调度进行需求响应日前市场出清后, 将成交量发送给负荷聚合商。本文优化控制模型的目标

包括变频空调集群功率削减量与负荷聚合商成交量偏差最小, 以及变频空调集群调控前后设定温度差值最小, 决策变量为控制后的设定温度。

### 1) 变频空调集群功率分解

假设负荷聚合商成交量  $D$ , 根据式(11), 近似认为变频空调最小功率  $p \approx 0$ , 则控制后空调各个大组的平均功率  $P_2$  计算式为

$$P_b - D = \frac{N \times (P_1^{n-1} \times P_2 + P_1^{n-2} \times P_2^2 + \dots + P_1 \times P_2^{n-1})}{(P_1^{n-1} + P_1^{n-2} \times P_2 + \dots + P_1 \times P_2^{n-2} + P_2^{n-1})} \quad (16)$$

根据式(10), 则各个大组中的空调数量  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $\dots$ 、 $S_n$  计算式为

$$\begin{bmatrix} p & P_1 & \dots & P_1 \\ P_2 & p & \dots & P_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_2 & P_2 & \dots & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_b - D \\ P_b - D \\ \vdots \\ P_b - D \end{bmatrix} \quad (17)$$

在此基础上, 各个大组都平均分为多个小组。根据大组和小组的分组结果, 将控制后变频空调集群的功率分解至各个小组。

$$P_{i,j}^c = (P_b - D) \cdot \frac{S_{i,j}}{S_i} \quad (18)$$

式中:  $P_{i,j}^c$  为第  $i$  个大组第  $j$  个小组控制后的目标功率;  $S_{i,j}$  为第  $i$  个大组第  $j$  个小组的空调数量。

### 2) 变频空调小组优化控制策略

将控制后变频空调集群的功率分解至各个小组之后, 对小组内各台变频空调的设定温度进行优化控制。控制目标 1 为变频空调小组功率削减量与目标功率偏差最小。

$$\min \sum_{t \in M} e_1(t) \quad (19)$$

$$e_1(t) = (P_{i,j}^c - \sum_{k=1}^{S_{i,j}} P_k(t))^2 \quad (20)$$

$$P_k(t) = \frac{T_{out} - T_{k,t}^{s2}}{R\eta} \quad (21)$$

式中:  $e_1(t)$  为变频空调小组  $t$  时段的功率偏差量;  $P_k(t)$  为变频空调  $k$  在  $t$  时段的功率;  $T_{out}$  为需求响应时段内的室外温度;  $T_{k,t}^{s2}$  为变频空调  $k$  调控后  $t$  时段的设定温度;  $M$  为需求响应时段集合。

控制目标 2 为变频空调集群调控前后设定温度差值最小。

$$\min \sum_{t \in M} e_2(t) \quad (22)$$

$$e_2(t) = \sum_{k=1}^{S_{i,j}} (T_{k,t}^{s2} - T_{k,t}^{s1})^2 \quad (23)$$

式中:  $e_2(t)$  为变频空调小组调控前后  $t$  时段设定温度的偏差量;  $T_{k,t}^{s1}$  为变频空调  $k$  调控前  $t$  时段的设定温度。

为了保证用户舒适度在合理范围内, 变频空调设定温度满足式(24)的约束。

$$T_{min} \leq T_{k,t}^{s2} \leq T_{max} \quad (24)$$

式中,  $T_{min}$  为变频空调设定温度下限。

## 5 算例分析

对 10 000 台参数呈正态分布的变频空调集群进行仿真, 参数设置情况如表 1 所示。

表 1 空调负荷集群参数设置表

Table 1 Setting table of multi inverter air-conditioners

参数名称	数值
室外温度/°C	35
室内初始温度/°C	期望为 23.4, 方差为 1.12 的随机二项分布
空调集群最大设定温度/°C	28
空调集群最小设定温度/°C	22
房间等效热阻/(°C/kW)	期望为 10, 方差为 1 的正态随机分布
房间等效热容/(kJ/°C)	期望为 200, 方差为 0.5 的正态随机分布
压缩机最大频率/Hz	110
压缩机最小频率/Hz	5
压缩机频率与空调电功率的一次系数	平均数 18, 方差为 3 的正态随机分布
压缩机频率与空调电功率的常数	平均数 50, 方差为 10 的正态随机分布
压缩机频率与空调制冷量的二次系数	平均数 -0.23, 方差为 0.025 的正态随机分布
压缩机频率与空调制冷量的一次系数	平均数 50, 方差为 3 的正态随机分布
压缩机频率与空调制冷量的常数	平均数 200, 方差为 50 的正态随机分布

### 5.1 变频空调集群的调节潜力评估

#### 5.1.1 不同设定温度下变频空调集群功率削减量

改变空调集群的设定温度, 空调集群的功率削减量如图 5 所示。由图可知, 空调集群功率削减量与调控后的设定温度成正比关系。当设定温度上调至 28°C 时, 功率削减量可达 1 939 kW, 削减程度达 44.78%, 由此可知空调集群可提供的功率削减潜力巨大。

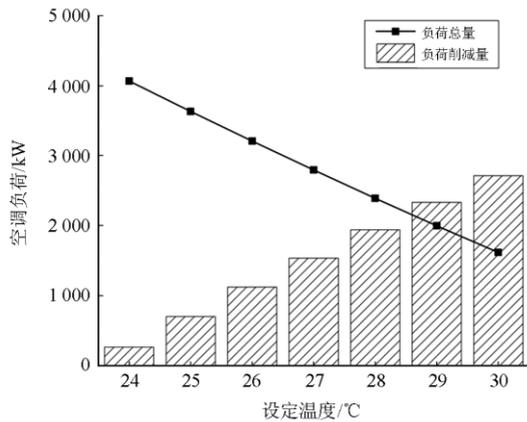


图5 不同设定温度下变频空调集群功率削减量  
Fig. 5 Power reduction of inverter air conditioner cluster at different set temperature

### 5.1.2 不同功率削减量对应的最大控制时长

假定变频空调设定温度上限为 28°C, 根据式(13)可求得设定温度上限对应的单台变频空调功率  $P_2$  为 0.239 1 kW, 分组数  $n$  取值为 1~12, 单个组的控制时长  $T_{last}$  取值为 15 min, 可根据式(11)计算出控制时长  $nT_{last}$  为 0.25 h 至 3 h 的情况下空调集群总功率和功率削减量, 如表 2 所示。

表 2 变频空调集群不同控制时长下的功率削减量

Table 2 Power reduction of inverter air conditioner cluster under different control time

目标总功率/kW	目标削减功率/kW	目标削减百分比/%	最大可控时长/h
1 400.00	2 931.00	67.67	0.25
2 140.84	2 190.16	50.57	0.50
2 313.34	2 017.66	46.59	0.75
2 365.70	1 965.30	45.38	1.00
2 382.80	1 948.20	44.98	1.25
2 388.52	1 942.48	44.85	1.50
2 390.44	1 940.56	44.81	1.75
2 391.09	1 939.91	44.79	2.00
2 391.31	1 939.69	44.79	2.25
2 391.39	1 939.61	44.78	2.50
2 391.41	1 939.59	44.78	2.75
2 391.42	1 939.58	44.78	3.00

当变频空调集群功率最小时, 功率削减量达 2 931 kW, 此时最大控制时长不足 0.25 h; 功率削减量减小过程中, 最大控制时长随之增加; 当功率削减量减小至 2 000 kW 时, 最大控制时长可上升至 0.5 h 到 1 h; 当功率削减量降至理论极限值 1 939 kW 时, 最大控制时长将变得无限大, 此时所有空调都

可以设定温度上限 28°C 运行。

不同功率削减量对应的最大控制时长如图 6 所示, 由图可知, 为了保障空调用户舒适度, 空调负荷的最大控制时长受功率削减量的制约, 目标功率削减量越大, 可实现的最大控制时长越短。

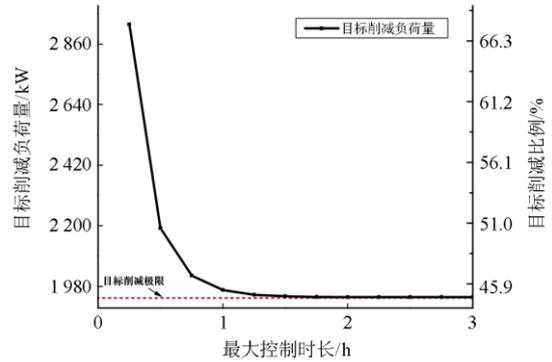


图6 不同功率削减量下的最大控制时长变化  
Fig. 6 Variation of maximum control time at different power reduction

假定需求响应日前市场发布的需求响应持续时长为 1.25 h, 则根据表 2 和图 6 可知, 变频空调集群的调节潜力为 1 948.2 kW。

### 5.2 变频空调集群的优化控制策略分析

假定负荷聚合商在日前市场的成交量为 1 031 kW, 并在 1.25 h 内保持不变。根据第 4 节提出的双层分组优化控制策略, 采用遗传算法寻优。

#### 5.2.1 优化控制过程

1) 单个大组的控制时长为 15 min, 所以将空调集群第一层分为 5 个大组, 根据式(16)和式(17), 每组中空调的数量如表 3 所示。

表 3 10 000 台空调第一层分类结果

Table 3 Results of the 10 000 air-conditioners packet in first level

组数	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
台数	5 434	2 548	1 195	560	263

2) 将第一层中各大组空调平均分成若干小组。例如, 第一组含空调 5 434 台, 可分为 44 个含 99 台空调的小组和 11 个含 98 台空调的小组。随机分组情况下, 可认为各组空调的平均功率近似相等。

3) 根据式(18)将控制后变频空调集群的功率分解至各个小组之后, 采用遗传算法根据式(19)一式(24)对每个小组内各台空调的设定温度进行优化。

#### 5.2.2 优化结果分析

##### 1) 室温变化分析

对第二层中某含 99 台空调的小组运行情况进行仿真, 优化控制后的室内温度变化过程和控制前

后的室温概率分布情况分别如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出, 由于采用了双目标优化, 优化后的室内温度在 23℃ 到 28℃ 之间分布, 平均室温上升约 3℃, 变化幅度较小, 负荷调控结果可满足用户舒适度需求。

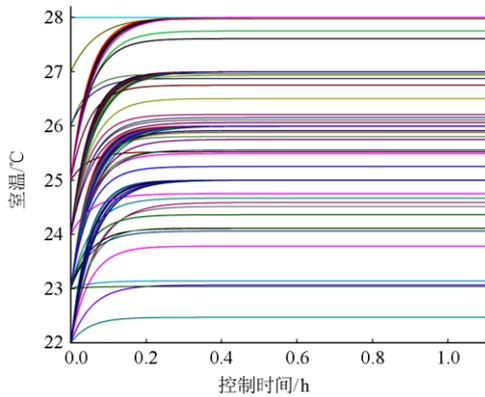


图 7 第二层某空调小组负荷优化后室温变化情况  
Fig. 7 Variation of a second level air-conditioner group after optimization

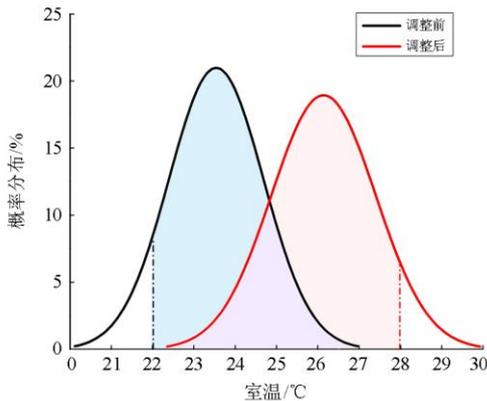


图 8 第二层某空调群组优化前后室温概率分布  
Fig. 8 Probability distribution of a second level air-conditioners group after optimization

### 2) 负荷削减情况分析

对 10 000 台变频空调进行优化控制后的功率变化如图 9 所示, 结果表明, 空调集群的功率可快速调整至功率削减目标值, 且能够维持 1.25 h。因此, 本文提出的控制策略不仅能够使空调集群功率迅速削减, 还能保证较长的控制时长。

## 6 结论

本文针对变频空调参与需求响应进行了相关研究, 具体内容总结如下:

1) 基于一阶等效热参数模型, 采用回归分析确定空调压缩机频率与空调电功率、制冷量的关系,

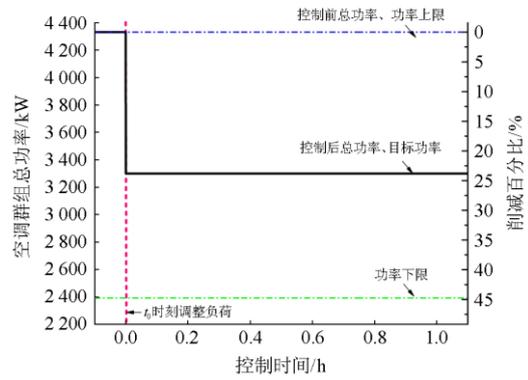


图 9 变频空调总功率的削减情况

Fig. 9 Power reduction of total inverter air conditioners

建立变频空调负荷模型;

2) 以满足人体舒适度为前提, 提出变频空调集群参与需求响应的调节潜力评估方法, 结果表明变频空调调节潜力与设定温度和控制时长相关;

3) 提出基于双层分组轮控的变频空调负荷优化控制策略, 算例结果表明变频空调集群可快速达到功率削减目标, 且满足控制时长要求。

综上所述, 本文的工作填补了变频空调参与电网需求响应相关研究的空白。本文提出的变频空调调节潜力评估方法和控制策略可应用于电网调度组织的需求响应日前市场, 有助于电网改善用电曲线、提高运行效率。

## 参考文献

[1] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.

[2] 苗长越, 王维庆, 王海云, 等. 光伏接入对系统小干扰稳定的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 211-215. MIAO Changyue, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research of the influence of photovoltaic access on small disturbance stability of the system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 211-215.

[3] 黄景光, 陈波, 林湘宁, 等. 基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 162-168. HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimal operation of islanded microgrid based on crow search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 162-168.

[4] 陈洁, 郭志, 付翰翔, 等. 基于撬棒控制策略的 DFIG 风电场动态等值建模研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 190-196.

- CHEN Jie, GUO Zhi, FU Hanxiang, et al. Research on dynamic equivalence modeling of wind farm composed of double fed induction generators based on crowbar control strategy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 190-196.
- [5] 康忠健, 李锴绩, 常铮. 基于扩张状态观测器的非线性最优变频空调频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 91-98.
- KANG Zhongjian, LI Kaiji, CHANG Zheng. Frequency control of inverter air conditioning based on ESO nonlinear optimal control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 91-98.
- [6] 赵洪山, 闫西慧, 戴湘, 等. 基于 NILE 算法量化热水器参与需求响应的灵活性[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 98-104.
- ZHAO Hongshan, YAN Xihui, DAI Xiang, et al. Quantifying flexibility of water heater participating in demand response based on non-intrusive load extracting algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 98-104.
- [7] 阎怀东, 马汝祥, 柳志航, 等. 计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 71-80.
- YAN Huaidong, MA Ruxiang, LIU Zhihang, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch of electric vehicle charging station considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 71-80.
- [8] 欧名勇, 陈仲伟, 谭玉东, 等. 基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 54-59.
- OU Mingyong, CHEN Zhongwei, TAN Yudong, et al. Optimization of electric vehicle charging load based on peak-to-valley time-of-use electricity price[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 54-59.
- [9] 徐佳夫, 王旭红, 李浩, 等. 无序充电模式下电动汽车对住宅区配电网谐波影响研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 61-67.
- XU Jiayu, WANG Xuhong, LI Hao, et al. Research on the harmonic effect of electric vehicles on distribution network in residential areas under the disordered charging mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 61-67.
- [10] 潘华, 梁作放, 李永奎, 等. 考虑电动汽车用户行为特性的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 96-101.
- PAN Hua, LIANG Zuofang, LI Yongkui, et al. Power system economic dispatch considering the behavior characteristics of electric vehicle users[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 96-101.
- [11] 李娜, 王晓亮. 集群空调负荷提供微电网调频备用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 101-105.
- LI Na, WANG Xiaoliang. Research of air conditioners providing frequency controlled reserve for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 101-105.
- [12] AMROUNE M, BOUKTIR T, MUSIRIN I, et al. Power system voltage instability risk mitigation via emergency demand response-based whale optimization algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 269-282. DOI: 10.1186/s41601-019-0142-4.
- [13] 陈志杰, 李凤婷, 黄蓉. 计及需求响应的含风电电力系统旋转备用优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 117-122.
- CHEN Zhijie, LI Fengting, HUANG Rong. Spinning reserve optimal configuration strategy of a wind power system with demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 117-122.
- [14] FENG Jiahuan, ZENG Bo, ZHAO Dongbo, et al. Evaluating demand response impacts on capacity credit of renewable distributed generation in smart distribution systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 14307-14317.
- [15] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
- SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167.
- [16] 杨济如, 石坤, 崔秀清, 等. 需求响应下的变频空调群组削峰方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 44-52.
- YANG Jiru, SHI Kun, CUI Xiuqing, et al. Peak load reduction method of inverter air-conditioning group under demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 44-52.
- [17] 程媛, 刘士友, 程小明. 定频空调负荷参与需求响应的研究现状[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(1): 9-17.
- CHENG Yuan, LIU Shiyu, CHENG Xiaoming. Research status of fixed-frequency air conditioning load participating in demand response[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(1): 9-17.
- [18] ABREU J, PEREIRA F C, VASCONCELOS J, et al. An approach to discover the potential for demand response in the domestic sector[C] // Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, September 27-29, 2010, Waltham, MA, USA: 240-245.
- [19] LI Xiwang, WEN Jin, BAI Erwen, et al. Developing a whole building cooling energy forecasting model for on-line operation optimization using proactive system identification[J]. Applied Energy, 2016, 164: 69-88.
- [20] BASHSH 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.

[21] HU Jianqiang, CAO Jinde, CHEN M, et al. Load following of multiple heterogeneous TCL aggregators by centralized control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3157-3167.

[22] LIU Mingxi, SHI Yang, LIU Xiaotao. Distributed MPC of aggregated heterogeneous thermostatically controlled loads in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1120-1129.

[23] LU Ning, CHASSIN D P. A state-queuing model of thermostatically controlled appliances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1666-1673.

[24] 李娜, 褚晓东, 张文, 等. 考虑参数空间差异的多区域空调负荷聚合模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(5): 19-24.

LI Na, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Aggregation model of multi-zone air conditioning load considering spatial differences of parameters[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(5): 19-24.

[25] TRAN T, SABONNADIÈRE J C, HADJSAID N, et al. Air conditioner direct load control in distribution networks[C] // 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28- July 2, 2009, Bucharest, Romania: 1-6.

[26] HONG Y Y, LIN J K, WU C P, et al. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1603-1610.

[27] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.

ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.

[28] SONG Meng, GAO Ciwei, YAN Huaguang, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 5522-5534.

[29] SONG Meng, GAO Ciwei, YANG Jianlin, et al. Energy storage modeling of inverter air conditioning for output optimizing of wind generation in the electricity market[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2018, 4(3): 305-315.

[30] 黄海涛, 王岱锋, 朱丰泽, 等. 考虑热舒适度的变频空调响应调控策略[J]. 电力建设, 2018, 39(9): 9-17.

HUANG Haitao, WANG Daifeng, ZHU Fengze, et al. Study on the control strategy of frequency conversion air conditioning considering thermal comfort[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 9-17.

[31] 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.

[32] YANG Huan, TANG Shengqing, ZENG Zheng, et al. Demand response of inverter air conditioners and applications in distribution system voltage stability enhancement[C] // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, October 26-29, 2013, Busan, Korea: 954-959.

[33] SHAHIDEHPOUR M, SONG Meng, SUN Wei, et al. Multi-time scale coordinated control and scheduling of inverter-based TCLs with variable wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 46-57.

[34] 姚垚, 张沛超. 大规模变频空调参与电力系统辅助服的协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 127-134.

YAO Yao, ZHANG Peichao. Coordinated control method of ancillary services of power system with participation of large-scale inverter air-conditioner[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 127-134.

[35] 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.

[36] 喻首贤. R410A 变频房间空调器稳态特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

YU Shouxian. Study on steady performance of R410A DC inverter room air-conditioners[D]. Changsha: Central South University, 2007.

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2021-05-20

作者简介:

杨梓俊(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行与管理; E-mail: 26229908@qq.com

丁小叶(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力需求侧管理、电力系统运行与控制; E-mail: dingxiaoye@outlook.com

高赐威(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力需求侧管理、电动汽车接入电网、电力规划、电力市场等。E-mail: ciwei.gao@seu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)