

· 电网技术 ·

## 考虑变频空调负荷聚合调节的电网规划问题研究

杨济如<sup>1</sup>, 高赐威<sup>1</sup>, 苏卫华<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;  
2. 国网上海市电力公司松江供电公司, 上海 201600)

**摘要:**在对变频空调负荷特性的研究基础上,建立变频空调负荷模型;在满足用户舒适度要求并约定用户补偿方案的情况下,确定以较低频率持续运行并固定操作时长的变频空调控制方法,并以此为基础设计一种直接易行的聚合控制算法,同时根据空调调控顺序的不同,分别达到充分利用负荷削减潜力或经济性最优两种目标;建立计入需求响应激励费用的电网规划模型进行优化求解,利用算例证明聚合控制方法和规划方案的有效性。

**关键词:**需求响应;变频空调;负荷模型;电网规划

**中图分类号:**TM73

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2018)05-0038-07

### 0 引言

随着经济快速发展,电力需求迅速增长,环境保护、节能减排的必要性不断体现。对于电网规划的要求也不再仅限于“扩张保电”,逐渐以满足电力需求与低碳节能发展并重,向绿色环保的方向转型升级。电网规划的绿色发展一方面体现在考虑新能源发电的接入,在电网规划中配套相应的措施消纳新能源;另一方面可以考虑需求侧资源的接入,增加可调控资源,通过需求响应降低电网对尖峰负荷的供电压力,实现优化电网规划和绿色减排。

空调负荷是一种潜力巨大的需求侧响应资源,据统计华东地区空调负荷占夏季负荷高峰的比值超过30%,在北京、上海等特大城市甚至接近50%。空调负荷的增长造成夏季负荷高峰不断攀升,不利于电力系统安全稳定运行,空调使用时段的集中性造成了年负荷曲线的尖峰时段,为了满足供电需求势必会降低发、输电设备利用率并造成资源浪费。考虑到人体对温度变化敏感性较弱且对舒适区间接受范围大,而空调作为温控设备具有储能性,故可将空调负荷视为一种调度灵活、数量可观、潜力巨大的负荷资源<sup>[1]</sup>,通过合理的负荷控制能有效降低高峰负荷<sup>[2]</sup>,在电网规划中优化资源配置。

目前对空调需求响应的相关研究与试点主要针对定频空调和中央空调<sup>[3]</sup>。基于双向通信进行激励是主流做法<sup>[4]</sup>,通过对空调负荷进行条件控制实现系统聚合,由队列系统发出开关信号并通过信号接收运行情况;此外也可通过负荷预测和卡尔曼滤波器<sup>[5]</sup>等手段对恒温负荷进行预测、聚合与调

控,以放松负荷控制双线联系的要求。空调负荷的控制手段主要包括直接负荷削减、负荷转移、负荷暂停等方法,文献[6]以提供快速需求响应的辅助服务为目的,研究分布式空调负荷的反馈控制,同时也适用于少量的空调负荷;文献[7]将目标量参数化,为空调的聚合需求设计一种简单的控制器,在澳大利亚进行实践并取得较好的效果;文献[8]对直接负荷控制下理想空调负荷的可控容量进行预测,针对定频空调提出了双层优化控制的调度方案。

而随着人们生活质量的不断提高,变频空调以其节能、省电、舒适的优点获得广大用户青睐。变频空调能效新标准的实施<sup>[9]</sup>对高能效变频空调需求的增长形成进一步刺激,随着国家节能减排政策指导,变频空调市场占有率不断增高,将成为未来制冷市场主流产品,因此研究变频空调负荷的需求响应十分必要<sup>[10]</sup>。目前对于需求响应的研究主要集中于运行层面,例如需求响应参与辅助服务市场、平抑新能源出力波动等,而在规划层面上的应用则缺少研究。需求响应资源潜力巨大,在形成长期需求响应实施基础上将对电网的扩张建设具有较大影响。文中通过变频空调频率、电功率与制冷量三者之间的关系,在等效热参数模型基础上建立单台变频空调负荷模型;根据所建模型对单台空调控制方法进行仿真研究,分析计算单台空调负荷削减能力;在此基础上以削峰为目标,针对空调群组提出一种直接的聚合调控策略,并据此建立计入需求响应激励费用的电网规划模型。

### 1 单台变频空调负荷建模

在标准制冷工况下记录由低频至高频等距区

收稿日期:2018-05-23;修回日期:2018-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577029)

间内各参数实际变化数据<sup>[11]</sup>,对功率、制冷量与频率三者关系进行拟合,建立压缩机频率、空调功率与制冷量三者函数关系,如下式所示:

$$Q_{AC} = af^2 + bf + c \quad (1)$$

$$P_{AC} = mf + n \quad (2)$$

式中: $Q_{AC}$ , $P_{AC}$ 分别为空调机组的制冷量和电功率,单位 kW; $f$ 为空调压缩机的工作频率,单位 Hz; $a$ , $b$ , $c$ , $m$ , $n$ 是分别根据函数拟合得到的常数,取值与空调型号有关。

变频空调通过改变压缩机频率控制室温变化,目前大多以室温与用户温度设定值之间的温差( $\Delta T = T_{in} - T_{set}$ )为依据确定压缩机运行频率<sup>[12]</sup>:

$$f_t = \begin{cases} f_{max} & \Delta T > N_+ \\ f_{t-1} + K\Delta T & N_- < \Delta T \leq N_+ \\ f_{min} & \Delta T \leq N_- \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_t$ 和 $f_{t-1}$ 分别为 $t$ 和 $t-1$ 时刻的运行频率; $N_-$ 和 $N_+$ 分别为温差的上下限; $f_{max}$ 和 $f_{min}$ 分别是空调运行最大、最小频率,在不停机情况下满足 $f_{min} \leq f_t \leq f_{max}$ ;  $K$ 为常系数,取值与空调型号有关。

采用简化的一阶等效热参数模型<sup>[13]</sup>可以得到关于室温 $T_{in}$ 和空凋制冷量 $Q$ 的关系式如下:

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - Q^t R - (T_{out}^t - Q^t R - T_{in}^t) e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \quad (4)$$

式中: $T_{in}^t$ 和 $T_{out}^t$ 分别为 $t$ 时刻室内和室外温度,单位 $^{\circ}\text{C}$ ; $\Delta t$ 为 $t$ 与 $t+1$ 时刻的时间间隔,单位 min; $Q^t$ 为 $t$ 时刻空凋制冷量,单位 kW; $C$ 为空调房间的等效热容,单位 $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ,可通过房间体积乘空气的比热容计算得到; $R$ 为房间的等效热阻,单位 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ,数值通过物理参数和导热系数等计算得到。

综上所述,式(1—4)在室温与频率、功率及制冷量之间建立数学联系,通过室温变化得到频率变化情况,将制冷量的需求转化为功率需求,能够建立起单台变频空调的负荷模型。

## 2 单台变频空调控制方式

参与需求响应的空调可以通过改变设定温度降低电功率,达到削减负荷的目的。在设定温度值及室外温度恒定条件下,开机运行的频率及温度随时间变化如图 1 所示。稳定运行时提高设定温度,室温与频率变化情况如图 2 所示。

舒适区间确定为 $[T_{min}, T_{max}]$ 时,假设原设定温度为 $T_{s1}$ ,改变后设定温度为 $T_{s2}$ ,室温 $T_{in}$ 在 $[T_{s1} - N_-, T_{s2} + N_+]$ 间变化,则 $[T_{s1} - N_-, T_{s2} + N_+] \in [T_{min}, T_{max}]$ ,因此在改变设定温度的控制方法下,要求满足:

$$T_{min} + N_- \leq T_{s1} < T_{s2} \leq T_{max} - N_+ \quad (5)$$

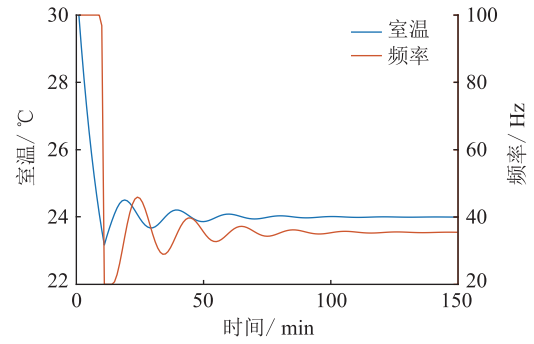


图 1 启动运行时的室温和频率变化

Fig.1 The start-up process of room temperature and frequency

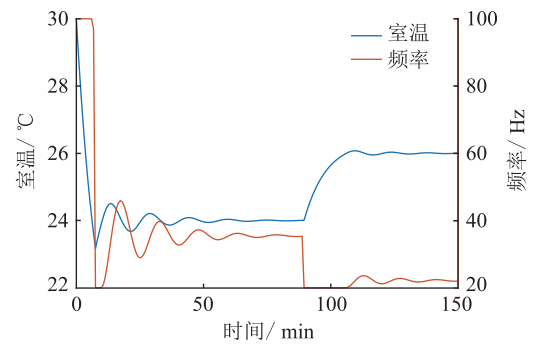


图 2 提高设定温度时的室温和频率变化

Fig.2 The variation process of room temperature and frequency when  $T_{set}$  was increased

提高设定温度,空调首先保持最低频率运行,在此过程中温度上升但仍满足要求。假设室外温度恒定为 $T_{out}$ ,忽略波动部分,使室温由 $T_{s1}$ 上升至 $T_{s2}$ ,最低制冷量为 $Q_{min}$ ,整理可得最低频率运行的持续时长 $t_{last}$ :

$$t_{last} = RC \ln \left( \frac{T_{out} - Q_{min}R - T_{s1}}{T_{out} - Q_{min}R - T_{s2}} \right) \quad (6)$$

固定操作时长为 $\Delta t$ ,以高于最低频率的固定频率运行,假设温度区间为 $[T_{min}, T_{max}]$ ,则用户接受室温与设定温度温差最大值 $\Delta T_{max} = T_{max} - T_{set}$ 。不考虑接受控制后温度回降的过程,首先计算极限情况,即在 $\Delta t$ 时段末室温与设定温度差值恰为 $\Delta T_{max}$ 的情况,此时代入式(4)整理可得:

$$Q_{AC2} = \frac{T_{out}^{t+1} - T_{out}^t e^{-\frac{\Delta t}{RC}} - \Delta T_{max} - T_{set}}{R(1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}})} - \frac{T_{set}}{R} \quad (7)$$

$Q_{AC2}$ 表示在 $\Delta t$ 时间段内满足舒适度要求所需最低制冷量,将 $Q_{AC2}$ 代入式(1)、(2),整理得到:

$$P_2 = m \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - Q_{AC2})}}{2a} + n \quad (8)$$

$P_2$ 表示压缩机以固定频率 $f_2$ 运行时的功率。在未接受控制时有 $T_{in}^{t+1} = T_{in}^t = T_{set}$ ,同样代入计算可

得正常使用情况的  $P_1$  如下:

$$P_1 = m \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - \frac{T_{out}^{t+1} - T_{out}^t e^{-\frac{\Delta t}{RC}}}{R(1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}})} + \frac{T_{set}}{R})}}{2a} \quad (9)$$

$\Delta P = P_1 - P_2$  表示空调在  $\Delta t$  时间段内接受控制,以固定频率  $f_2$  运行的削减能力。

综上所述,保持压缩机最低频率运行可以得到最大的削减量,但将减少控制时长作为代价。在空调群组削峰控制中大量空调在多次操作中采用等长操作时间更方便易行,因此在满足温度约束的条件下以高于压缩机最低频率的某固定频率运行实施控制。

### 3 空调群组聚合控制方式

#### 3.1 算法设计

考虑由  $J$  个用户组成的智能电网社区<sup>[14]</sup>,每个用户分别配备一台变频空调,并装设分控制器与总控制器进行信息交互:分控制器向总控制器提交空调参数及状态,同时接受总控制器的操作信号并对空调进行相应控制。

空调负荷控制对舒适度的影响主要体现在:最大温差  $\Delta T_{max}$ ,表示用户能够接受室温偏离设定温度的最大值;空调最大受控次数  $t_{max}$ ,空调实际接受操作时间被分为  $t_i$  个等  $\Delta t$  长的时段。由于用户对舒适度、经济性追求不同,电力公司提供与最大温差  $\Delta T_{max}$  有关的不同激励方案,激励价格表示用户在接受一次  $\Delta t$  时长的控制能够得到的补偿。

将同一时段内可以提供空调调控操作的设备聚合成为一组接受群组控制,以次日负荷预测曲线为输入量,将日负荷曲线时间轴划分为等  $\Delta t$  长的多时段,在高峰时段实施负荷控制,以峰荷时刻为控制中点时刻,在前后各  $\Delta t/2$  时段内选择该时段聚合群组内的空调进行单台空调控制,循环操作至达到削减目标或削减潜力。为保证空调在同一时刻不重复操作,设置二进制状态变量  $S(j,t)$  记录第  $j$  台空调  $t$  时刻操作状态,值为 0 表示按原设定运行,值为 1 表示空调受控。 $J$  台空调群组总控制次数为  $(t_{max}J)$  次,空调群组负荷的削峰控制算法流程如图 3 所示。

该方法的具体算法如下:首先,预测次日负荷曲线。其次,当受控次数  $t_i$  在总控制次数  $(t_{max}J)$  范围内时,寻找峰荷时刻  $t_p(t_i)$ ,并根据状态变量  $S(j,t)$  和计数器  $t_c(j)$  判断空调状态,排除不可用空调。计算可用空调削减能力  $\Delta P(j)$ ,根据经济性最

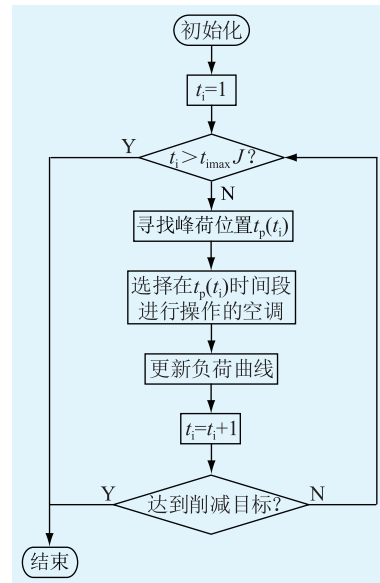


图 3 空调群组负荷削峰控制算法

Fig.3 The algorithm of AC group load control

优或削减量最大目标选择一台空调  $j_c$  进行控制。在  $t_p(t_i)$  时刻负荷减  $\Delta P(j_c)$  更新负荷曲线,同时更新空调受控次数、状态变量和激励费用,直至达到削减目标。最后,计算激励费用,得到调控后的负荷曲线。

#### 3.2 不同目标下的控制顺序选择

要求尽可能削减更多负荷时,根据削减能力排序,首先选择能力最大的空调,将多数削减能力较弱的空调分散削减次高峰或更加平坦的区域。在可控负荷范围内设置削减量,以经济性最优为控制目标时,根据削减负荷的经济性排序,首先选择经济性最优的空调进行控制。

对 2 种控制顺序下的削峰效果进行仿真,该仿真过程中算法用时为秒级。由图 4 可见,设定温度及空调额定功率等参数随机产生并固定不变,以最小能力排序作对照,考虑削减能力时所削减的峰荷更多。

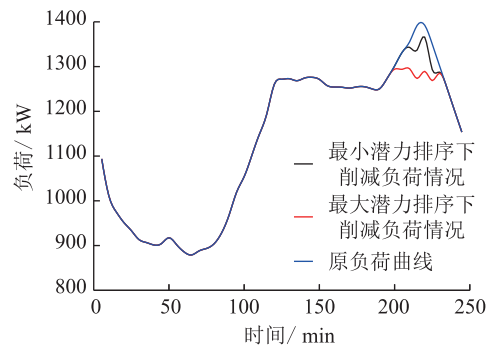


图 4 考虑最大削减能力削峰情况

Fig.4 Peak clipping with consideration of clipping ability

由图 5 对比考虑削减量最大和考虑经济性最优的激励费用,可见在规定削减量的条件下两者削峰情况相似,而考虑经济性最优时激励费用较低。

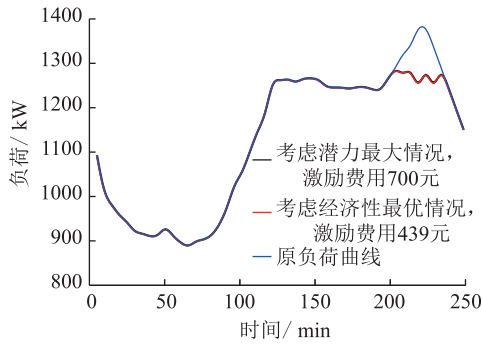


图 5 考虑最优经济性的削峰情况

Fig.5 Peak clipping with consideration of optimal economy

## 4 基于经济性最优聚合控制方法的电网规划模型

在电力市场放开、友好互动的背景下,需求侧响应资源的重要性不断凸显,在规划中考虑需求侧响应资源能够降低投资成本,在未来包含源网荷互动系统的电网规划势必会越来越普遍,各电压等级的网络规划中考虑可控负荷的作用也会日益增多。

### 4.1 规划模型

规划目标是使投资成本最低,即建造成本与激励费用之和最低,同时保证不出现线路过载,满足直流潮流约束以及电力系统安全性的  $N-1$  准则,构造下面的数学模型:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{S}) + C_e(P_{in}) \\ \text{s.t. } P_L \leq P_{Lmax} \quad \mathbf{B}_0 \boldsymbol{\theta} = \mathbf{P} \\ P_{L(N-1)} \leq P_{Lmax} \quad \mathbf{B}_{0(N-1)} \boldsymbol{\theta}_{N-1} = \mathbf{P}_{N-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{S}$ 为规划方案的向量; $F$ 为折算至等年值的建造成本; $P_{in}$ 为聚合控制削减负荷量; $C_e$ 为激励费用年值; $P_L$ 为支路功率; $P_{Lmax}$ 为支路输电容量; $\mathbf{B}_0$ 为节点导纳矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角向量; $\mathbf{P}$ 为节点净注入功率向量; $P_{L(N-1)}$ , $\mathbf{B}_{0(N-1)}$ , $\boldsymbol{\theta}_{N-1}$ , $\mathbf{P}_{N-1}$ 分别为一条线路断开情况下的支路功率、节点导纳矩阵、节点电压相角向量和节点净注入功率向量。

### 4.2 激励费用

为提高优化效率,将激励费用转化为关于削减量的函数计入目标函数。根据考虑经济性最优的聚合控制方法运行仿真,在  $J$  台空调可控负荷范围  $[0, \Delta P_{max}]$  内,等距计算激励费用并对仿真数据进行拟合,可得到激励费用关于削减量的三次函数:

$$C_e(P_{in}) = \kappa_1 P_{in}^3 + \kappa_2 P_{in}^2 + \kappa_3 P_{in} + \kappa_4 \quad (11)$$

式中: $P_{in}$ 为空调负荷聚合调节下削减的负荷量; $C_e$ 为需求响应激励费用; $\kappa_1$ 至 $\kappa_4$ 为通过拟合得到的系数。

### 4.3 优化方法

采用遗传算法<sup>[15]</sup>进行优化规划,将待选线路按节点自然排序,用二维矩阵存放线路参数、容量信息,以待选线路建设条数和聚合控制削减量作为染色体基因进行编码,染色体的长度比待选线路数大一位,每条染色体代表一个规划方案。对违反约束的方案,以过负荷量乘以惩罚系数计入费用<sup>[16]</sup>,构造目标函数:

$$F = A \left( \sum_{i=1}^k L_i F_i Z_i + P_{en} W \right) + C_e(Z_{k+1}) \quad (12)$$

式中: $A$ 是资金回收系数,用于换算等年值; $k$ 表示待选线路数; $L_i$ 表示待选线路  $i$  的长度; $F_i$ 表示待选线路  $i$  的单位长度建设投资; $Z_i$ 为染色体中第  $i$  位基因值即待选线路  $i$  的建设条数; $P_{en}$ 为惩罚系数; $W$ 为过负荷量; $C_e(Z_{k+1})$ 是将规划方案代入式(11)计算的年激励费用。

## 5 算例分析

### 5.1 测试系统

采用文献[17]中附录 18 节点系统作为算例,稍作修改如图 6 所示,各线路参数均如参考文献[17]所述。参考目前江苏电网的大规模源网荷友好互动系统的运行,该系统可实现 3500 MW 的可中断负荷控制,文中选取某一城市电网作为算例背景,考虑可控的需求响应空调群组数量为 100 000 台,经仿真可知可控负荷约为 190 MW,算例设置合理。实线表示已建设线路,虚线代表可选建设线路,可选建设线路种类共有 27 种,如表 1 所示,假设各线路的单位建设成本相等。

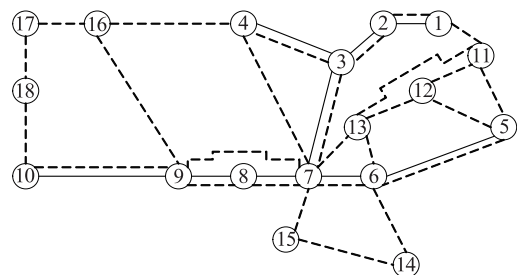


图 6 十八节点测试系统

Fig.6 The 18 bus test system

### 5.2 激励费用

规定空调每接受 10 min 的实际调温操作时的补偿与最大温差有关,因此设置激励费用套餐对应  $\Delta T_{max} = [3, 4, 5, 6]$  的激励费用分别为  $[0.5, 0.75, 1,$

表 1 18 节点测试系统线路情况

Tab.1 The line situation of 18 bus system

两端节点	初始	待选	两端节点	初始	待选	两端节点	初始	待选
1-2	1	3	1-11	0	5	7-15	0	5
2-3	1	3	4-7	0	5	9-16	0	5
3-4	1	3	4-16	0	5	10-18	0	5
3-7	1	3	5-11	0	5	11-12	0	5
5-6	1	3	5-12	0	5	11-13	0	5
6-7	1	3	6-13	0	5	12-13	0	5
7-8	1	3	6-14	0	5	14-15	0	5
8-9	1	3	7-9	0	5	16-17	0	5
9-10	1	3	7-13	0	5	17-18	0	5

1.25]。假设所有用户均接受并参与需求响应,在可控范围内仿真部分结果如表 2 所示,对所得结果进行拟合,得到激励费用关于削减量的关系如式(13)所示:

$$C_e(P_{in}) = 0.000 2P_{in}^3 - 0.025 5P_{in}^2 + 1.838 1P_{in} - 21.422 4 \quad (13)$$

表 2 100 台空调不同削减量下的激励费用

Tab.2 Incentive costs of 100 ACs at different peak clipping

削减量/kW	激励费用/元	削减量/kW	激励费用/元
40	19.3	120	140
50	25.5	130	178
60	36.8	140	230
70	48.8	150	287
80	61.8	160	367
90	74.3	170	459
100	89.3	180	549
110	113	190	652

### 5.3 规划结果

#### 5.3.1 考虑空调负荷控制的规划结果

利用 MATLAB 对考虑变频空调聚合调节的电网规划问题进行求解,用时 362.045 s。在不考虑空调负荷控制时进行电网规划,得到结果如表 3 所示,投资成本最低为 1 230.882 万元。根据前述规划模型,将建设成本折算为第 20 年年值,可控负荷  $P_{in}$  全部分布在节点 6 的情况对规划求解,考虑夏季一个月的激励费用,结果如表 3,总成本最低为 1 164.427 万元,考虑空调负荷控制时成本低于不考虑空调负荷控制的情况。

#### 5.3.2 建设费用与激励费用对比

以可控负荷全部分布在节点 6 为例,观察建设费用与激励费用随削减量变化的情况,由图 7 可见随着削减量的增多,激励费用增多而建造成本下

表 3 最优规划结果

Tab.3 Optimal planning

空调	新建线路 (表顺序)	削减量 /MW	激励费用 /万元	建造费用 /万元	总成本 /万元
不控制	0000000111111 111111111111213	0	0	1 230.882	1 230.882
控制	0000000011112 11211110111110	77	60.23	1 104.197	1 164.427

注:新建线路数值表示各线路新建条数。

降,总投资成本在不同阶段有升有降,在负荷削减量为 800 MW 时,总投资费用最低为 1 169.022 万元,此时经济性最优。结合上节规划结果,考虑到遗传算法往往仅能得到近似全局最优解,认为规划模型有效。

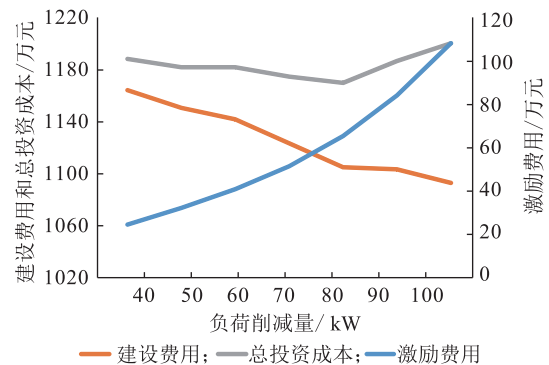


图 7 投资成本随削减负荷量变化情况

Fig.7 The costs at different load reduction

#### 5.3.3 激励定价对规划结果的影响

设置如表 4 的激励套餐分析不同激励力度对规划结果的影响。用户参与度指在确定的激励套餐下参与需求响应用户的负荷削减潜力与总负荷的比值,反映需求响应参与积极性,经分析用户参与度随激励定价变化规律可由图 8 描述,激励定价较低时用户参与较少,随着激励定价增加用户参与度不断提高,变化率降低。

表 4 激励套餐设置

Tab.4 The set of incentive cost

$\Delta T_{max}$	激励费用/万元			
	套餐一	套餐二	套餐三	套餐四
3	0.17	0.25	0.5	0.75
4	0.25	0.38	0.75	1.13
5	0.33	0.5	1	1.5
6	0.42	0.63	1.25	1.88

实验设定在 4 种激励定价套餐情况下的用户参与度及规划所得结果如表 5 所示,可见激励费用采用套餐二时投资总成本最低。

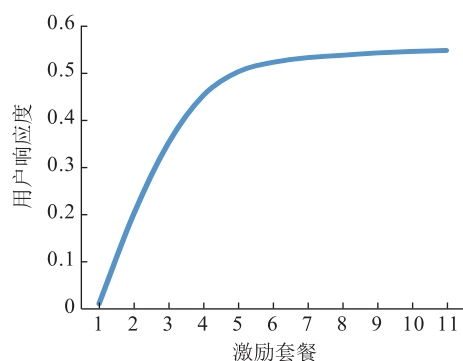


图8 不同激励定价下的用户参与度

Fig.8 User engagement at different pricing of compensation

表5 不同补偿定价下的规划结果

Tab.5 Planning results at different pricing of compensation

套餐	参与度	削减量 /MW	激励费用 /万元	建设费用 /万元	总成本 /万元
一	0.2	40	8.033 9	1 163.197	1 171.231
二	0.35	70	25.447 3	1 122.51	1 147.958
三	0.45	80	64.825 6	1 104.197	1 169.022
四	0.5	50	47.598 9	1 149.32	1 196.919

## 6 结论

变频空调由于其变频特点,在正常运行中能效比变化且通常没有停机状态,针对定频空调的控制模型不再适用,因此文中针对变频空调进行聚合控制和电网规划的相关探索。本文根据变频空调的相关特性建立了单台变频空调的负荷模型,在分析变频空调控制方法特点基础上,提出了保持固定操作时间,以较低固定频率运行的单台空调负荷控制方法;同时文中运用所提出的单台空调负荷控制方法,设计了一种聚合控制算法,能够有效地达到充分利用负荷削减潜力或经济性最优的控制目标。基于经济性最优的聚合控制方法,建立计入激励费用的电网规划模型,用遗传算法进行优化求解,分析所得结果的正确性,所建立的规划模型能有效地确定经济性最优情况下空调负荷削减量与线路规划情况。目前对空调负荷的需求响应研究缺乏实际经验,不同类型用户的空调使用行为须深入分析与划分,更加细致有针对性的空调负荷聚合调节方法的研究具有进一步意义。

### 参考文献:

[1] FAN W, ZHOU N, LIU N, et al. Time-sharing scheduling model of air conditioning based on demand response and profit allocation[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy*, 2016.

[2] 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.

[3] 戚野白,王 丹,贾宏杰,等.基于局部终端温度调节的中央空调需求响应控制策略[J].*电力系统自动化*, 2015(17):82-88.  
QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Demand response control strategy for central air-conditioner based on temperature adjustment of partial terminal devices [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015(17):82-88.

[4] LEE S C, KIM S J, Kim S H. Demand side management with air conditioner loads based on the queuing system model [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26:661-668.

[5] MATHIEU J L, CALLAWAY D S. State estimation and control of heterogeneous thermostatically controlled loads for load following[C]//*Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE*, 2012:2002-2011.

[6] BRASLABSKY J H, PERFUMO C, WARD J K. Model-based feedback control of distributed air-conditioning loads for fast demand-side ancillary services[C]//*Conference on Decision and Control. IEEE*, 2013:6274-6279.

[7] PERFUMO C N. Dynamic modelling and control of heterogeneous populations of thermostatically controlled loads[J]. *University of Newcastle*, 2013.

[8] 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.

[9] 李 嵩.制冷空调行业部分上市公司2013年年报集锦[J].*制冷与空调*, 2016, 15(9):44-47.  
LI Song. The 2013 annual report highlights of some listed companies in the refrigeration and air conditioning industry[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2016, 15(9):44-47.

[10] CHEN M, SUN X, HUANG L. Extraction of high frequency operating parameters of a compressor motor for a variable frequency air conditioner [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2011, 1326(11):423.

[11] 曹小林,喻首贤,李雄林,等.采用R410A的变频房间空调器的理论与实验研究[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(2):759-763.  
CAO Xiaolin, YU Shouxian, LI Xionglin, et al. Theoretic and experimental study on domestic air-conditioner with R410A as refrigerant [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(2):759-763.

[12] 宁波奥克斯空调有限公司.一种变频空调在夜间的控制方法:中国,CN201310029098.9[P].2013-5-8.

- Ningbo oxy air conditioning co., Ltd. A control method for variable frequency air-conditioning at night: China, CN201310029098.9[P].2013-5-8.
- [13] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1263-1270.
- [14] KHALID Y I, HASSAN N U, YUEN C, et al. Demand response management for power throttling air conditioning loads in residential Smart Grids[C]//IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2014:650-655.
- [15] 杨宁, 文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14):23-27.  
YANG Ning, WEN Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14):23-27.
- [16] 张俊芳, 王秀丽. 遗传算法在电网规划应用中的改进[C]//1996年电力系统规划学术年会论文集. 1996:278-282.  
ZHANG Junfang, WANG Xiuli. The improvement of genetic algorithm in grid planning and application [C]//Proceedings of the Annual Conference on Power System Planning. 1996:278-282.
- [17] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京:中国电力出版社, 2014.  
CHENG Haozhong. Power system planning [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.

作者简介:



杨济如

杨济如(1994—),女,硕士研究生,研究方向为需求侧管理、能源互联网(E-mail: 213122147@seu.edu.cn);

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

苏卫华(1977—),男,硕士,高级工程师,从事电网规划、负荷预测工作。

## Power Grid Planning Considering the Aggregated Inverter Air Conditioning Load

YANG Jiru<sup>1</sup>, GAO Ciwei<sup>1</sup>, SU Weihua<sup>2</sup>

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

2. Songjiang Power Supply Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** On the basis of the research on the load characteristics, the model of the inverter air conditioner is established. In circumstances that could satisfy the requirement of the users' comfort, design a control method of the single inverter air conditioning, and design a direct and easy aggregation control algorithm. At the same time, depending on the different order of air conditioning control, two goals are respectively to make full use of the load reduction potential or economy optimal. A power grid planning model is established considering the cost of the demand response, and the effectiveness of the control method and the planning scheme are proved by the case study.

**Key words:** demand response; inverter air conditioner; load model; power grid planning

(编辑 方晶)