

空调负荷群分组控制方法

管国兵, 辛洁晴

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240)

摘要: 针对现有空调群负荷控制难以在兼顾降载效果和舒适度的条件下有效减少分组数、简化控制策略的问题, 提出一种聚类分组及错峰控制方法。首先, 以温变指数和特征温差为特征属性对受控端聚类分组; 随后引入准备时间的概念, 以分钟级空调总负荷峰值最小化为目标, 优化聚合体分批进入受控期的错峰运行方案, 由此尽可能保持降载期受控端状态的多样性、避免负荷波动。算例分析了所提出方法的特性和降载量调节机理, 并从降载量调节特性、舒适度、负荷波形等方面将其与现有分组控制方法对比。结果表明: 聚类分组及错峰控制方法通过错开聚合体进入受控状态的时间, 能在较小分组数下实现迅速降载, 并可较好地兼顾降载和舒适度两方面的要求。

关键词: 空调负荷; 热响应模型; 分组控制; 准备时间; 削峰

0 引言

空调是造成中国城市地区夏季高峰负荷的主要因素, 空调降载控制对缓解夏季电力供需矛盾、规避为短时尖峰负荷新增电力投资的风险具有重要意义^[1-2]。

一座城市中, 无论居民空调还是商业建筑中央空调, 其数量都是庞大的。若对每个空调用户分别决策控制策略, 则控制逻辑复杂而不易实现。因此, 需考虑空调负荷群的合理分组和对空调聚合体的分组控制策略。目前相关研究较少, 现有方法可归结为如下三类。

1) 按可控容量平均分组。一些文献在对温变特性相同/近的受控端探讨空调控制方式时采用了此种分组方法。例如, 文献[3]提出了电网公司调度部门-负荷聚合商、负荷聚合商-空调受控端两级调度机制, 在将减载计划分配给受控端时采用平均分组, 并要求各组制冷机累积运行-停机时间比大于一个对各组受控端而言相同的阈值。当受控端温变特性差异较大时, 上述方法从原理上难以良好满足各受控端的舒适度需求; 而若要克服这点, 又需对各受控端分别考虑运行-停机时间比约束, 产生各受控端不尽相同的启停方案, 增加控制的复杂度。

2) 按室温状态分组。N. Lu 等人提出状态队列(state-queueing, SQ)模型^[4], 其本质是将温升/降范

围等分为若干区间、构成室温状态序列, 温升、温降状态数分别等于制冷机启停周期中停机期、运行期对应的分钟数。应用时每分钟模拟/监测一次各受控端室温, 室温接近下界的一组停机, 接近上界的一组开机。若各受控端的室温在允许波动范围内平均分布, 则 SQ 法可产生平稳的空调负荷; 但在从非受控期进入受控期的初始时段里, 由于温变范围的突然放大, 使得许多制冷机停机、一段时间后又集中开机, 即受控端状态多样性被打破, 从而会产生空调负荷的大幅波动, 不利于迅速降载。对此, 有文献进行了专门研究并提出了对策^[5]。但是这些方法都不涉及分组控制策略的简化, SQ 控制思想下分组数取决于降载期温控范围, 一般达到 30 组以上。

3) 按受控端热响应参数聚类的方法。文献[6]用等效热力学参数(equivalent thermal parameter, ETP)模型^[7-9]描述室温随供冷量的动态变化关系, 模型中描述温变规律的参数包括受控端制冷量 Q 、围护结构的传热热阻 R 和室内空气的热容 C 。该文假设各受控端的 Q 和 R 相同, 以 C 为特征属性进行聚类分析。但是 Q 和 R 均相同的假设太强, 且该文未进一步探讨聚类后空调聚合体的分组控制方式。

可见, 现有文献尚未对计入受控端温变特性差异的空调群分组控制方式开展充分研究。为此, 本文提出一种聚类分组及错峰(clustering and peak-staggering, CPS)控制方式。首先, 以温变指数、特征温差两个温变特征属性对受控端聚类分组, 减少控制组数, 简化控制方案; 随后, 引入准备时间的概

念错开聚合体进入受控期的时间,由此尽量保持受控端状态的多样性,降低分钟级空调负荷的波动,并通过优化聚合体错峰运行方案,尽可能获得室温允许波动范围对应的降载量。本文热响应模型采用适于居民和小型商用建筑的ETP模型,但所提分组控制思想具有推广到中、大型商用建筑的价值。

1 市场规则和基本假设

1)供电公司负责对辖区参与降载的空调进行制冷量 Q 、制冷额定用电功率 P^e 的核实以及受控端 R 和 C 参量实测^[10],将结果上报电网调度部门;后者实施受控端聚类,并在夏季根据气温和负荷预测情况分析次日是否需空调降载、确定降载需求期和需降载量,进而决策空调聚合体降载控制方案;供电公司按调度部门下达的分组控制方案在次日降载需求期实施空调负荷控制。下文用下标 i 代表第 i 个空调聚合体的参量,用下标 ik 表示其中第 k 个受控端的参量。

2)电网公司与用户事先协定降载日空调温度设定值 T^{set} 和降载期允许的室温上限值 T^{max} ,其中 T^{set} 反映用户在空调习惯使用方式下夏季峰荷时段的室温均值, T^{max} 则由热舒适的室温上限决定,两者协定后不做修改。电网公司在夏季高温日前一天根据尖峰负荷预测值确定次日空调群降载需求量,进而确定次日受控端在受控期的室温上限值 T^{top} ($T^{\text{top}} < T^{\text{max}}$),该值随降载需求量而改变,决定了降载潜力。通常同种用电性质用户的 T^{set} 和 T^{max} 值比较相近,本文暂不考虑这两个参量不同的用户同时参与CPS控制的问题。

3)对制冷机实施分组周期性启停控制。为减少停机期升温累积效应并尽可能发挥削峰潜力,每一控制周期 τ_i 由停机期 $\tau_{\text{off},i} = (1-r_i)\tau_i$ 和运行期 $\tau_{\text{on},i} = r_i\tau_i$ 组成(占空比 $r_i = \tau_{\text{on},i}/\tau_i$),每一周期末室温恢复至起始值。

4)鉴于空调降载控制通常发生在异常高温时段(如南方城市夏季13:00—15:00),期间气温波动不大,后续建模中对降载期气温按均值考虑。本假设用于简化日前降载方案计划模型,不影响文中所提出方法相对于其他分组控制方式特点的结论。

5)降载日可划分为系统非降载期和系统降载需求期(简称降载期),后者顺序包括准备期和全受控期。准备期的时长优化而得,期间空调聚合体分批进入受控状态,由此尽可能保持空调状态多样性、降低负荷波动;所有聚合体都进入受控期时,系统即进入全受控期。

6)对属于同一聚合体的受控端采用相同控制方

案。进入系统降载期后,各聚合体经历不尽相同的准备时间 δ_i 后进入本组受控期。该过程中聚合体 i 的平均室温变化规律如图1所示。

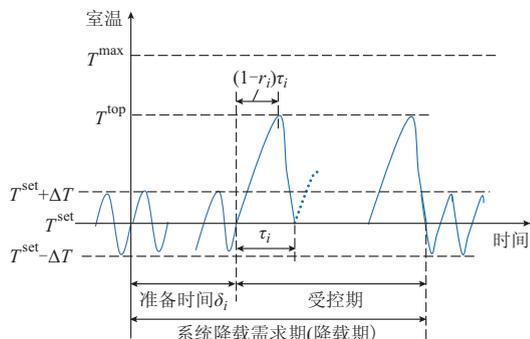


图1 降载日空调聚合体 i 的平均室温变化规律
Fig.1 Average temperature variation of an air conditioner aggregate i during a peak-clipping day

图1中:

1)进入降载期前,制冷机在内置温差控制模块作用下周期性启停,室温在 $[T^{\text{set}} - \Delta T, T^{\text{set}} + \Delta T]$ 内波动(ΔT 为内置温差控制幅度,通常为 1°C),记相应的制冷机自然启停周期和占空比分别为 τ_i^0 和 r_i^0 。

2)进入准备期时聚合体平均室温为 T^{set} ,准备时间 δ_i 内制冷机仍然按 τ_i^0 和 r_i^0 周期性启停。

3)进入本组受控期后,制冷机按强制启停周期 τ_i 和占空比 r_i 启停,平均室温波动范围为 $[T^{\text{set}}, T^{\text{top}}]$ 。

4)降载期结束时,室温大于 $T^{\text{set}} + \Delta T$ 的受控端制冷机运行,室温降到 $T^{\text{set}} - \Delta T$ 后停机;此后各受控端重新由内置温差模块控制。为避免负荷反弹,可分组恢复降载前室温波动范围,对此本文暂不予考虑。

鉴于进入准备期时各受控端的初始室温在 T^{set} 基础上有 $\pm\Delta T$ 的差异,为尽可能满足所有受控端的降载期舒适度需求(室温不超 T^{max}),要求 $T^{\text{set}} + 3\Delta T \leq T^{\text{top}} \leq T^{\text{max}} - \Delta T$ 。注意到80%人群可接受的舒适温度上限为 29.8°C ^[11], $T^{\text{set}}, T^{\text{max}}, T^{\text{top}}$ 取值范围的对应关系如附录A图A1中左上角阴影部分所示(如 $T^{\text{set}} = 24^\circ\text{C}$ 时, $T^{\text{max}} \in [28, 30]^\circ\text{C}$, $T^{\text{top}} \in [27, 29]^\circ\text{C}$)。

2 空调设备群分组策略

2.1 受控端的热响应模型和温变特性参量

ETP模型描述室内温度与供冷量之间的动态变化关系,在仅考虑围护结构传导热阻 R 和室内空气热容 C 的情况下,ETP模型为^[6,12-13]:

$$T^{\text{in}}(t) = \begin{cases} T^{\text{out}}(t) - (T^{\text{out}}(t) - T^{\text{in}}(t-1))e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \\ \chi(t) = 0 \\ T^{\text{out}}(t) - QR - (T^{\text{out}}(t) - QR - T^{\text{in}}(t-1))e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \\ \chi(t) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\chi(t)$ 表示 t 时刻制冷机的启停状态(0 表示关停,1 表示开启),式中上、下层分别对应制冷机停机期、运行期的室温变化方程; $T^{\text{in}}(t), T^{\text{out}}(t)$ 分别表示 t 时刻的室内、室外温度; Δt 为 t 至 $t-1$ 时刻的时间间隔。

若停机期室温从 T_1^{in} 升为 T_2^{in} ,运行期室温从 T_2^{in} 降为 T_1^{in} ,则由式(1)可计算出两个时期的持续时间为:

$$\begin{cases} \tau_{\text{off}} = -RC \ln \frac{T^{\text{out}} - T_2^{\text{in}}}{T^{\text{out}} - T_1^{\text{in}}} \\ \tau_{\text{on}} = -RC \ln \frac{T^{\text{out}} - QR - T_1^{\text{in}}}{T^{\text{out}} - QR - T_2^{\text{in}}} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可见,在一定的气象条件和室温波动范围下,各受控端的温变规律由如下参量决定。

1)温变指数 RC :在一定的室温变化范围内, RC 是决定停机期持续时间的主导因素, RC 越大则温升越缓慢、停机期越长;并且,由于运行期供冷量 Q 通常远大于得热量,各受控端的制冷期持续时间差别不大^[4],因此 RC 也是制冷机启停周期的决定因素。

2)特征温差 QR :该量表明制冷机持续运行($\Delta t \rightarrow \infty$)情况下受控端最终可达到的室内外温差。 QR 影响制冷期时间,但是影响控制周期的次要因素。

2.2 分组方法

由 2.1 节的分析可见,为使同组受控端在相同的控制策略(制冷机启停起止时间)下具有相同的温变速率,分组按如下步骤进行。

步骤 1:以受控端的温变特性参量 $R_{ik} C_{ik}$ 和 $Q_{ik} R_{ik}$ 为特征属性进行聚类分析,得到若干空调聚合体。

步骤 2:以簇中心的特征属性值作为相应聚合体特征属性,由此得到 $R_i C_i$ 和 $Q_i R_i$,并以同组受控端制冷功率 P_{ik}^c 之和作为聚合体制冷功率 P_i^c 。

步骤 3:将聚合体参量代入式(2)得到聚合体启停规律。其中,将 $T_1^{\text{in}} = T^{\text{set}} - \Delta T, T_2^{\text{in}} = T^{\text{set}} + \Delta T$ 代入式(2)得到准备期每一启停周期的停机时间 $\tau_{\text{off},i}^0$ 和运行时间 $\tau_{\text{on},i}^0$,进而可确定 τ_i^0 和 r_i^0 ;而将 $T_1^{\text{in}} = T^{\text{set}}, T_2^{\text{in}} = T^{\text{top}}$ 代入式(2)则得到受控期每一启

停周期的停机时间 $\tau_{\text{off},i}$ 和运行时间 $\tau_{\text{on},i}$,进而可确定 τ_i 和 r_i 。

3 空调聚合体的错峰控制方案优化模型

受控期允许的室温波动范围决定了空调负荷群的降载潜力,要实现该降载量则要求空调群进入降载期时不发生分钟级负荷的大幅波动。保持受控端状态多样性是达到此目的的重要条件,而简化控制方式(减少控制组数、实施周期性轮停)本质上会降低受控端状态的多样性。为缓解上述影响,让各聚合体分批进入受控期,并引入准备时间的概念反映各聚合体进入受控期的时间间隔,以其为决策变量优化聚合体错峰运行方案,可尽可能降低分钟级负荷波动,充分利用室温允许波动范围所对应的降载潜力。

基于上述思想,构建控制期分钟级空调总负荷峰值最小化的聚合体错峰运行方案优化模型如下:

$$\min \left(\max_{t=1,2,\dots,T_c} \sum_{\forall i \in I_c} P_i(t) \right) \quad (3)$$

s. t.

$$P_i(t) = \begin{cases} r_i^0 P_i^c & 0 < t \leq \delta_i \\ \chi_i(t) P_i^c & \delta_i < t \leq T_c \end{cases} \quad (4)$$

$$\chi_i(t) = \begin{cases} 0 & \delta_i < t \leq T_c \text{ 且 } \exists n \in \mathbf{N} \text{ 使得} \\ & 0 < t - \delta_i - n\tau_i \leq (1 - r_i)\tau_i \\ 1 & \delta_i < t \leq T_c \text{ 且 } \exists n \in \mathbf{N} \text{ 使得} \\ & (1 - r_i)\tau_i < t - \delta_i - n\tau_i \leq \tau_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{\forall i \in I_c} P_i(t) \leq \sum_{\forall i \in I_c} r_i^0 P_i^c \quad \forall t \in [1, T_c] \quad (6)$$

$$\delta_i \leq T_c \quad \delta_i \in \mathbf{N} \quad (7)$$

$$\prod_{\forall i \in I_c} \delta_i = 0 \quad (8)$$

式中： $\forall i \in I_c; I_c$ 为聚合体集合; T_c 为目标日系统降载期分钟数。

式(4)确定各聚合体在准备时间和本组受控期的逐分钟空调负荷,其中准备时间里的负荷按 $r_i^0 P_i^c$ 计算(这是因为准备时间里同一聚合体中受控端状态不尽相同,平均而言,每一时刻约有 r_i^0 比例的制冷机处于开启状态),而进入受控期后同一聚合体的制冷机状态相同,故负荷根据制冷机启停状态求取;式(5)按周期性启停规律确定受控期各聚合体制冷机的逐分钟启停状态, $\chi_i(t) = 0$ 表示停机, $\chi_i(t) = 1$ 表示开机;式(6)要求降载期逐分钟空调总负荷不超过未受控情况下的小时平均负荷;式(7)要求准备期时长在降载期范围内且为自然数;式(8)保证进入系统准备期时至少一个聚合体进入本组受控期。

上述模型以 δ_i 和 $\chi_i(t)$ 为决策变量,属整数规

划问题,采用改进二进制粒子群算法求解^[14]。求得 δ_i 后,系统准备期和全受控期时长分别为 $T_s = \max_{i \in I_c}(\delta_i)$ 和 $T_c - T_s$ 。

4 算例分析

假设某地夏季日预测次日空调降载需求期为13:00—15:00,该时段平均气温预测为38℃;以居民空调为例,考虑受控端一万个,制冷功率在[2,3]kW范围内均匀分布, Q, R, C 在 (6.75 ± 1) kW, (5.56 ± 0.8) ℃/kW, (0.18 ± 0.05) (kW·h)/℃范围内均匀分布^[15];协议的 $T^{\text{set}} = 24$ ℃, $T^{\text{max}} = 30$ ℃,从而 T^{top} 可调范围为[27, 29]℃。评估降载量和受控端室温时采用仿真方法,受控端进入受控期时的初始室温按[23, 25]℃范围内均匀分布取值。

4.1 CPS控制特点分析

以分组数为15, $T^{\text{top}} = 29$ ℃的情况为例,采用 k -means法对一万个受控端聚类,分组结果和优化所得各聚合体准备时间如表1所示。分析发现,CPS控制倾向于让运行期 $\tau_i r_i$ 特短或运行期较短而停机期 $\tau_i(1-r_i)$ 很长的聚合体优先进入受控期,因为此类受控端尽早进入受控期可更大幅度降低空调用电功率。

表1 CPS控制的优化结果
Table 1 Optimization results of CPS control

组号	用户数	$Q_i R_i / R_i C_i /$ ℃	$P_i^0 /$ min	$\tau_i^0 /$ min	r_i^0	$\tau_i /$ min	r_i	$\delta_i /$ min
1	750	34	59	1.87	15	0.40	40	0.35
2	652	34	54	1.63	14	0.43	35	0.34
3	503	40	72	1.26	17	0.35	44	0.30
4	520	40	55	1.30	13	0.38	34	0.29
5	632	41	66	1.57	15	0.33	41	0.29
6	665	35	65	1.66	15	0.40	42	0.33
7	610	37	69	1.52	16	0.38	44	0.32
8	992	37	57	2.49	13	0.38	37	0.32
9	436	37	48	1.09	11	0.36	31	0.32
10	445	40	50	1.11	11	0.36	32	0.31
11	947	37	61	2.36	15	0.40	39	0.33
12	679	37	53	1.71	13	0.38	34	0.32
13	836	38	65	2.10	16	0.38	41	0.32
14	468	34	48	1.18	12	0.42	32	0.34
15	865	40	61	2.16	14	0.36	37	0.30

图2给出了CPS控制方式下降载期前后空调群逐分钟总负荷的变化情况。为进行对比,图中同时绘出了无准备期(即各聚合体同时进入受控期、按各自的 τ_i 和 r_i 启停)情况下的负荷波动曲线。其中,第0 min前为非降载期、第0~120 min为降载期。根据表1中的优化结果,降载期的前40 min为

系统准备期,后80 min为全受控期。附录A图A2进一步画出了空调总负荷在上述三类时期中的平均值。从中可见:

1)CPS控制在缩小控制组数的同时(若按SQ法,一万个受控端对应[24, 29]℃室温波动范围的制冷机平均启停周期为45 min,故组数也需45组),通过让聚合体分批进入受控期,使空调负荷在进入受控期时没有出现大幅波动,有效实现降载效果。

2)按同时刻不受控、受控情况下的分钟级负荷之差定义降载量,得到系统准备期最小降载量为1.21 MW(降幅11.5%),全受控期最小降载量为1.55 MW(降幅14.6%)。若考虑附录A图A2中的平均负荷,则降载更为明显,准备期和全降载期分别平均降载2.17 MW(21.1%)和2.84 MW(25.6%)。上述现象表明,全降载期的降载量大于准备期,但由于CPS倾向于选择降载幅度大的受控端优先进入受控期,从而在准备期也可获得可观的降载效益。后续分析中的降载量均指整个降载期的最小分钟级降载量。

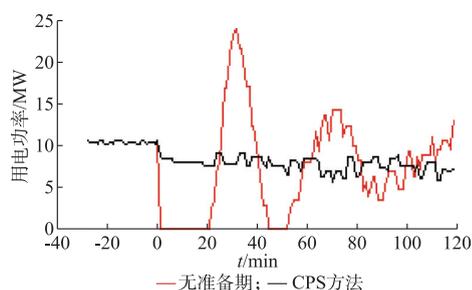


图2 有/无准备期的分组控制方式下空调群在降载期前后的逐分钟总负荷
Fig.2 Minute-by-minute air conditioning load curves before and during load reduction period under grouping control modes with and without standby period

4.2 CPS的降载量调节机理分析

附录A图A3对 T^{top} 取下限27℃(虚线)、上限29℃(实线)两种情况,作出降载期最小降载量与分组数的关系曲线。可见CPS控制方式下:

1)空调群最小降载量随降载期允许的室温波动范围的增大(反映为 T^{top} 的增大)而增大。这是因为温度调节范围增大时制冷机停机时间增大较运行时间增大明显,同一时刻制冷机处于停机状态的概率增大。

2)空调群降载量与分组数也呈正向关系,但只在小分组数情况下敏感于分组数,此后几乎与分组数无关。这是由于聚合体错峰降载效益随分组数增大而不断减少,分组数大于某阈值后错峰潜力饱和。

上述现象表明:CPS分组控制下,电网公司主要通过 T^{top} 调节降载量;而在一定的室温可调范围

下,由于聚合体间错峰效益存在饱和点,可选取较小的分组数实现预期卸载效果,简化控制方案。

4.3 CPS 与其他分组控制方式的比较

与 CPS 比较的分组控制方式如表 2 所示。其中,平均分制(APS)采用平均分组,但与文献[1]采用的直接负荷控制(direct load control, DLC)不同,平均分组后实施第 3 节的错峰运行方案优化,使 APS 和 CPS 一样,制冷机为周期性启停方式,通过两者对比分析平均分组与聚类分组的差异。修正的状态队列(MSQ)是 SQ 思想的延伸,用于探讨 SQ 思想推广至小分组数的可能性,而原始 SQ 法的效果即 MSQ 法结果中分组数等于 τ_{ave} (指卸载期室温波动范围对应的制冷机平均启停周期分钟数,按所有受控端平均温变特性参量求取)的情况。

表 2 用于与 CPS 对比的两种分组控制方式
Table 2 Two grouping control modes used for comparison with CPS

分组控制方式	实施方法
APS	按可控容量相近原则平均分组,再按第 3 节错峰控制
MSQ	分组数 $ I_c < \tau_{ave}$ 时,将温升段均分为 $\text{ROUND}(I_c \cdot \tau_{off,i} / \tau_i)$ 组,温降段均分为 $\text{ROUND}(I_c \cdot \tau_{on,i} / \tau_i)$ 组,状态总数为 $ I_c $ 组,受控端按进入卸载期的初始室温归入各组,随后每隔 $\tau_{ave} / I_c $ 分钟模拟一次各受控端的室温,室温最接近上界的一组开机,室温最接近下界的一组停机

4.3.1 一定室温波动范围和分组数下载载量对比

附录 A 图 A4 对 T^{top} 取上限(实线)、下限(虚线)两种情况,做出了各分组控制方式下空调群在卸载期的最小卸载量与分组数间的关系曲线。对 MSQ 而言, T^{top} 下限为 25 °C、上限为 30 °C, CPS 和 APS 的 T^{top} 下限为 27 °C、上限为 29 °C。可见:

1) MSQ 法的卸载量为负,且 T^{top} 取上限时反而低于 T^{top} 取下限时。这是因为, MSQ 控制方式下空调负荷存在大幅振荡期(第 4.3.3 节进一步说明这点),难以在短时间里实现卸载;另一方面, T^{top} 增大则卸载期温控范围增大,同样分组数下每一室温状态对应的温度范围越大,按最接近上限的一组开机、最接近下限的一组停机的原则,会有更多受控端不能充分利用室温可调范围,从而使卸载量减小。

2) APS 的卸载量随分组数的变化规律与 CPS 一致,且在一定的 T^{top} 和分组数下, APS 比 CPS 的卸载量大。这是因为 APS 采用平均分组,各聚合体容量相近且启停周期相同;而 CPS 增加了聚合体内各受控端温变特性相近的约束,不保证各聚合体容量相近,启停周期也不尽相同,错峰效益优化的可行域有所缩小。

4.3.2 卸载期热舒适度对比

引入卸载期室温越限(大于 T^{max})用户数 N_c 。反映控制方式满足舒适度的良好程度。图 3 给出了 $T^{top} = 28$ °C (虚线)和 $T^{top} = 29$ °C (实线)时三种控制方法下 N_c 与分组数的变化关系。图中:红色实、虚线表示 MSQ,绿色实、虚线表示 APS,黑色实、虚线表示 CPS。

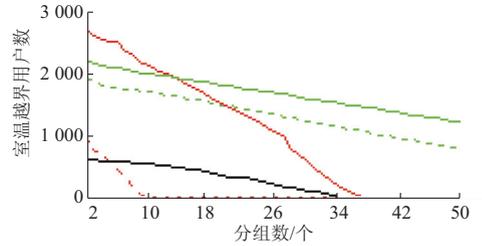


图 3 $T^{top} = 28$ °C 和 29 °C 两种情况下 CPS, APS, MSQ 三种控制方式导致的卸载期室温越限用户数随分组数关系
Fig.3 Relationship of amount of customers with uncomfortable minutes during peak-clipping period with group number under CPS, APS and MSQ control modes in cases of $T^{top} = 28$ °C and 29 °C

1) 无论哪种控制方式, $T^{top} = 29$ °C 时的 N_c 明显大于 $T^{top} = 28$ °C 时的 N_c , 也就是说卸载期 $N_c > 0$ 都主要发生在 T^{top} 接近 T^{max} 的情况下。

2) 随着 T^{top} 的下降(无论分组数多少), CPS 的 N_c 会迅速降为 0, 而其他两种控制难以做到这点。这是因为, MSQ 的 N_c 主要取决于分组数, 仅当分组数接近 τ_{ave} (此时室温每分钟模拟/监测一次)时 $N_c = 0$; 对 APS 而言, 室温越界主要源于同组受控端温变特性差异大, 这种差异不会随着 T^{top} 的下降而有所改变; 而 CPS 实施了按温变特性参量的预分组, 受控端温变特性与所属聚合体平均温变特性的差异很小, 故当 T^{top} 稍远离 T^{max} 即可迅速减少室温越界情况。

3) 一定的 T^{top} 下 N_c 随分组数的增大而减小。对 MSQ 而言, 这是因为分组数增大则对受控端监测和控制的时间间隔缩短, 临近室温上界的一组不易超界就可启动制冷机制冷; 对 CPS 和 APS 而言, 分组数增大则相同聚合体内各受控端的温变特性更为一致, 按同组平均启停周期控制时室温越界的受控端减少。

4) 任何室温可调范围和任何分组数下, CPS 控制方式的 N_c 值都是最小的。其他两种控制方式中, APS 的 N_c 值始终保持在受控端总数的 1/10 以上, 从舒适度角度不可行; MSQ 法在 $T^{top} = 29$ °C, 分组数小于 30 时 N_c 也可达到 1 000 以上, 这意味着将 SQ 思想推广到小分组数, 当卸载量需求较大

(对应 T^{top} 较高)时也会遇到舒适度较差的问题。CPS 则能较好兼顾降载和舒适度两方面的要求。

4.3.3 降载期空调负荷波形对比

鉴于 APS 从舒适度角度不可行,本节仅对 CPS 和 MSQ 的负荷波形进行对比。以 $T^{\text{top}} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,图 4 和图 5 分别给出了 15,45 两种分组数下,CPS 和 MSQ 控制产生的空调群总负荷在降载期前后的波动情况。其中分组数 45 对应 $T^{\text{top}} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 τ_{ave} ,从而 MSQ 即对应 SQ 的原始方法。

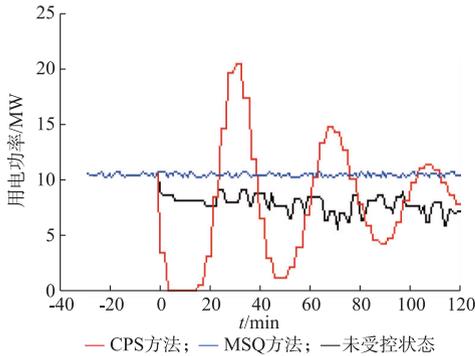


图 4 分组数 15 时 CPS 和 MSQ 法的逐分钟空调负荷曲线

Fig.4 Minute-by-minute air conditioning load curves by 15 aggregates under CPS and MSQ method

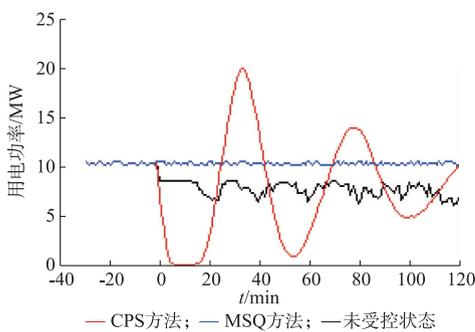


图 5 分组数 45 时 CPS 和 MSQ 法的逐分钟空调负荷曲线

Fig.5 Minute-by-minute air conditioning load curves by 45 aggregates under CPS and MSQ method

从图中可见:

1)MSQ 法下进入降载期后空调负荷要经历一个大幅振荡期,随后趋于平稳。如前所述,该现象的根本原因在于室温允许波动范围突变后,受控端状态的多样性被打破。振荡期可持续 2 h 以上,难以在尖峰时段起到降载效果。由图 5 可见,即便不考虑分组数的减小,上述问题对 SQ 原始方法也同样存在。

2)CPS 控制下空调负荷也有波动,不如非降载期平稳,但这种波动不同于 MSQ 的负荷大幅振荡,仍可实现降载效果。CPS 控制下的空调负荷波动

是简化控制策略(体现在减少分组数和实施周期性启停两方面)的代价。比较图 5 和图 4 可见,随着分组数的增大,CPS 导致的空调负荷波动幅度有所减小。整体而言,这种空调负荷波动叠加于系统负荷之后,并不明显加剧系统总负荷波动的剧烈程度。

5 结语

针对现有空调群降载控制方法难以在兼顾舒适度的条件下有效减少分组数、简化控制策略的问题,提出一种 CPS 分组控制方式。算例结果表明:

1)在计入受控端温变特性差异的情况下,平均分组不能满足受控端热舒适度需求,将现有的 SQ 思想推广到小分组情况也会出现舒适度难以良好满足的问题。CPS 法通过对受控端按温变特性的预分组,可在小分组控制方式下较好满足降载期舒适度要求。

2)SQ 方法,无论在大分组还是小分组下,若不对受控端制冷机状态实施干预,则进入降载期时温控范围突变会导致受控端状态多样性的破坏,进而产生大幅负荷波动,无法真正实现降载。对此,CPS 引入准备时间的概念,让聚合体分批进入受控期,由此可避免空调负荷大幅振荡,迅速获得可观的降载效益,从而适用于短时间尖峰负荷的降载问题。

3)CPS 法在简化控制方案的同时,也使得空调负荷在降载期小幅波动;但整体而言这种波动不会加剧系统总负荷波动的剧烈程度。

此外,本文所提 CPS 法是一种分组控制方法,其降载量可通过室温调节范围的变化而改变。对 CPS 在各种降载目标下的应用方式还有待另文探讨。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 李天阳,赵兴旺,肖文举.面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J].电力系统自动化,2015,39(17):96-102.DOI:10.7500/AEPS20150311009.
LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Regulation technology of air-conditioning load in commercial buildings for balance of power grid peak and valley[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 96-102. DOI: 10.7500/AEPS20150311009.
- [2] 杨永标,颜庆国,徐石明,等.公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的思考[J].电力系统自动化,2015,39(17):103-107.DOI:10.7500/AEPS20150331023.
YANG Yongbiao, YAN Qingguo, XU Shiming, et al. Thinking of public building air-conditioning load participating in grid with virtual peak clipping [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 103-107. DOI: 10.7500/AEPS20150331023.

- [3] 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.
- [4] LU N, CHASSIN D P, WIDERGREN S E. Modeling uncertainties in aggregated thermostatically controlled loads using a state queueing model [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 725-733.
- [5] 刘萌,褚晓东,张文,等.基于多样性保持的空调负荷群调度控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3674-3682.
LIU Meng, CHU Xiaodong, ZHANG Wen, et al. Dispatch and control strategies for air-conditioning load groups based on maintenance of load diversity [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3674-3682.
- [6] PERFUMO C, KOFMAN E, BRASLAVSKY J H, et al. Load management: model-based control of aggregate power for populations of thermostatically controlled loads [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 55(3): 36-48.
- [7] KOCH S, MATHIEU J L, CALLAWAY D S. Modeling and control of aggregated heterogeneous thermostatically controlled loads for ancillary services [C]// Proceedings of 17th Power Systems Computation Conference, August 22-26, 2011, Stockholm, Sweden: 1-7.
- [8] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318-1327.
- [9] KATIPAMULA S, LU N. Evaluation of residential HVAC control strategies for demand response programs [J]. Transactions-American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2006, 112(1): 535.
- [10] TAYLOR Z T, PRATT R G. The effects of model simplifications on equivalent thermal parameters calculated from hourly building performance data [C]// Proceedings of the 1988 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August 3-8, 1988, Pacific Grove, California: 268-285.
- [11] 李俊鹤.夏季冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [12] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [13] 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,2015,39(17):82-88. DOI:10.7500/AEPS20150409001.
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, 39(17): 82-88. DOI: 10.7500/AEPS20150409001.
- [14] YUAN X, NIE H, SU A, et al. An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 8049-8055.
- [15] 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.

管国兵(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向:智能用电管理。E-mail: 1130319006@sjtu.edu.cn

辛洁晴(1973—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力营销、电力市场、配电网规划。E-mail: jqxin@sjtu.edu.cn

(编辑 丁琰)

Grouping Control Method for Air Conditioning Load

GUAN Guobing, XIN Jieqing

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),
Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: In view of the difficulty of existing air conditioning control methods in compromising load reduction and heating comfort objectives by smaller group numbers with simple control themes, a new method called clustering and peak-staggered (CPS) control is proposed. To begin with, two thermal parameters, temperature variation exponent and characteristic temperature difference, are used as characteristic attributes to group the clusters at the controlled ends. To maintain status diversity of the controlled ends while avoiding load oscillation during the peak clipping period, the concept of standby time is introduced and a minute load minimization problem is proposed for optimizing the controlled ends' sequence of gearing into the load reduction operating mode. A numerical example is provided to reveal the characteristics and load regulation mechanism of the CPS control method, and to compare the method presented with various exiting ones from the aspects of load regulation performance, thermal comfort effect and load waveforms. Results show that the CPS control method, by staggering the load reduction beginning time of the controlled ends, can achieve rapid air conditioning load reduction while satisfying thermal comfort effect by smaller grouping numbers.

Key words: air conditioning load; thermal response model; grouping control; standby time; peak clipping