

考虑空调负荷弹性约束的用能优化研究

裴旻茜,包宇庆,刘其良

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 空调负荷(air conditioning loads, ACLs)可作为一种灵活的需求侧资源参与新型电力系统的源-荷互动. 充分利用 ACLs 的热力学特性,既能发挥 ACLs 的负荷调节能力,又能保证用户的舒适度. 现有的优化方法将 ACLs 的热力学约束建立为刚性约束. 通过松弛刚性舒适变量,提出了一种考虑弹性约束的空调负荷用能优化策略以满足系统运行中极端情况下的负荷调节需求. 首先,建立了空调负荷的弹性优化模型. 其次,通过引入辅助变量,将舒适变量与辅助变量之间的关系定义为弹性约束,并将线性化处理后的舒适度惩罚成本加入目标函数中. 最后,采用混合整数线性规划求得最优解. 优化结果表明,基于弹性约束的空调负荷优化结果具有更显著的削负荷效果. 变频空调和定频空调的仿真结果都验证了所提方法的有效性.

[关键词] 空调负荷,优化策略,混合整数线性规划,舒适度变量,弹性约束

[中图分类号] TM73 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2023)02-0008-08

Research on Energy Consumption Optimization Considering Elastic Constraints of Air-Conditioning Loads

Pei Minxi, Bao Yuqing, Liu Qiliang

(NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the power imbalance problem on the supply and demand side, air conditioning loads (ACLs) can participate in the optimization of the power system as flexible load resources. Making full use of the thermodynamic characteristics of ACLs can not only exert optimization effect of ACLs, but also ensure the comfort of users. Existing optimization methods define the thermodynamic constraints of the ACLs as rigid constraints. In this paper, the rigid comfort variables are relaxed, and an optimization strategy considering elastic constraints is proposed to meet the serious load shedding demand. By introducing auxiliary variables, the relationships between comfort variables and auxiliary variables are redefined as elastic constraints, and penalty costs are added to the objective function. Finally, the optimal solution is obtained by mixed linear integer programming. The optimization results show that the load optimization results based on elastic constraints have more peak loads. Both simulation results of inverter ACLs and fixed frequency ACLs show the effectiveness of the proposed method.

Key words: air conditioning loads, optimization strategy, mixed linear integer programming, comfort variables, elastic constraints

随着可再生能源大规模并网,可再生能源输出具有的间歇性和波动性给电网的安全稳定运行带来了巨大挑战^[1-2],仅靠传统的发电侧资源已难以满足电力系统的调控需求. 随着通讯技术和信息技术的发展,通过调节柔性负荷的用电功率或转移用电时段可达到削峰填谷、消纳可再生能源的目的^[3-5]. 空调负荷(air conditioning loads, ACLs)作为柔性负荷的一种,一方面,由于其具有良好的储热、储冷特性,既可以保证用户的舒适度要求,又具有良好的调节能力,是一种经济可靠的需求响应资源^[6]. 另一方面,由于其占夏季负荷高峰的比重达 30%~50%,在削峰填谷、消纳新能源方面体现出强大的调节能力^[7]. 空调负荷成为需求响应研究的重点对象.

针对 ACLs 的优化问题,文献[8-9]建立了空调负荷的聚合模型,文献[10-12]建立了空调负荷的等效热参数模型,既可以灵活调节 ACLs 的用电功率参与系统削负荷,又能满足终端用户的舒适度要求. 一般来说,

收稿日期:2022-05-17.

基金项目:2022 年研究生科研与实践创新课题项目(1812000024997)、2021 年研究生科研与创新计划项目(1812000024577).

通讯作者:包宇庆,博士,副教授,研究方向:电力系统的运行和调度、电力需求侧管理. E-mail:baoyuqing@njjnu.edu.cn

ACLs 的控制方法包括开关控制法^[7,13-14]和温度设定值控制法^[15-17]. ACLs 的优化信号主要包括电价信号和激励信号^[13,18-19]. 基于电价的 ACLs 优化方法可以更好地引导用户参与削峰填谷、改善电力供需状况^[19]. 文献[20]在分时电价的基础上,利用蒙特卡罗算法提出了一种节约电费的优化策略. 文献[21]设计了一种针对聚合空调负荷的作用时段差别化尖峰电价机制,可以降低峰值负荷并有助于避免聚合后的负荷反弹. 文献[22]以最小化购买费用和最大化销售利润为目标研究了空调负荷优化问题. 文献[23]建立了空调负荷聚合模型,并在保证用户舒适度的前提下根据动态价格调节空调温度从而实现电费最省.

针对电价型空调负荷优化策略,上述文献中[19-20,22-23]实现了降低电费成本,但空调模型将舒适条件视为刚性约束,即空调负荷运行时应始终严格满足舒适度条件. 尽管上述文献中的优化策略保证了终端用户的舒适度,但在应对极高的尖峰电价或极大的削负荷需求等突发事件时缺乏灵活性,导致其无法按需响应^[24].

综上所述,为了提高空调负荷调节的灵活性,在现有研究的基础上,本文提出一种基于弹性约束的空调负荷用能优化策略,该策略将原有的刚性舒适约束转换为弹性约束,采用松弛变量法使舒适变量能够越出舒适度边界,越出舒适度区间的部分转化为附加的舒适度成本. 在弹性策略下一般情况参与调度时空调仍可满足舒适度条件,而在极高的电价下该策略可释放空调负荷调节潜力,更多的空调负荷功率响应电价的变化从而具有更大的削负荷能力,且节省用电成本,相比于传统刚性优化策略具有明显优势. 此外通过对控制信号的转换,所提出的基于弹性约束的 ACLs 优化策略可以有效地应用于变频空调和定频空调中.

1 基于弹性约束的 ACLs 优化模型

本章介绍了考虑刚性舒适约束的传统优化策略,在此基础上建立了弹性约束的 ACLs 优化模型.

1.1 ACLs 的热力学模型及优化策略

ACLs 具有良好的热能存储特性. ACLs 的等效热参数(equivalent thermal parameter,ETP)模型常被用来描述建筑物室内温度与 ACLs 制冷(热)量的时变关系. ETP 模型将室内环境、室外环境和 ACLs 制冷(热)量等参数等效成电路中的相关电气参数,其简化模型可以表示为^[9]:

$$T_{in}(t+1) = T_{in}(t) \cdot e^{-\Delta t/RC} + (1 - e^{-\Delta t/RC}) \cdot (T_o(t+1) - Q(t)R). \quad (1)$$

式中, T_{in} 为室内温度; R 为等效热阻; C 为等效热容; T_o 为室外环境温度; $Q(t)$ 为制冷量, $P(t)$ 为功率,且

$$Q(t) = \eta \cdot P(t). \quad (2)$$

式中, η 为空调制冷能效比.

ACLs 的传统动态调节过程如图 1(a)所示,其中,室内温度 T_{in} 和负荷功率调整次数 n_a 为本文考虑的用户舒适变量. 价格上升引导用户侧下调空调负荷功率,使得室内温度 T_{in} 上升. 随后 ACLs 负荷功率将反弹一段时间,使得室内温度回到温度设定值 T_{set} . 类似地,价格下调引导用户侧增大空调功率, T_{in} 下降. 且

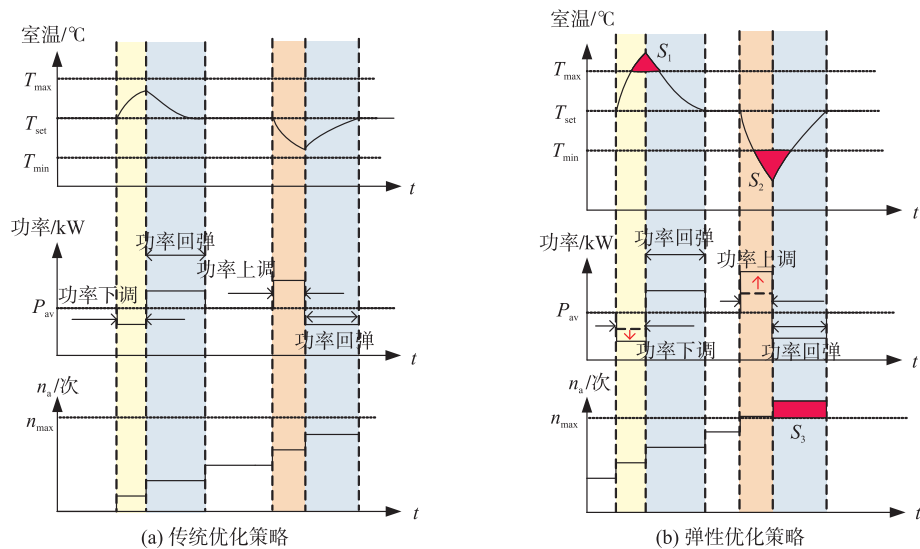


图 1 空调负荷的优化策略

Fig. 1 Optimization strategies of ACLs

n_a 随着空调功率的变化而增加. 刚性策略将 T_{in} 恒保持在舒适区间 $[T_{min}, T_{max}]$, 并保持 n_a 不超过设定的调节次数上限.

然而, 一旦电网出现极端情况, 系统需要降低尖峰时刻用电负荷, 刚性优化方法将 T_{in} 严格限制在 $[T_{min}, T_{max}]$ 内, 导致负荷调用的灵活性大大降低且用电成本大幅增加. 为了解决这个问题, 本文将传统的刚性约束转换为弹性约束, 如图 1(b) 所示. 当遇到极高的尖峰电价时, 终端用户可以牺牲舒适度来降低电费. 可以观察到, 图 1(b) 中 ACLs 功率可以调整为低于或高于图 1(a) 所示传统的刚性策略中的功率, T_{in} 将超过舒适范围, 如区域 S_1 和 S_2 所示. 在优化过程中, 惩罚分量与不适区域 (S_1 和 S_2) 成正比. 此外, 新策略需根据 S_3 对 n_a 的松弛约束进行惩罚.

1.2 弹性优化问题的模型建立

优化问题的目标函数由舒适度成本和电费两部分构成, 表示为:

$$f = \min [\alpha C_p + (1-\alpha) C_d]. \quad (3)$$

式中, C_p 和 C_d 分别表示整个优化期间的用电费用和终端用户舒适度受到影响时的惩罚成本 (即舒适度成本). 系数 α 为用户自定义的经济模式, 该值范围为 $[0, 1]$, 其数值越高则表示用户更倾向于经济型用电模式.

负荷的电费成本表示为:

$$C_p = \sum_t P(t) \cdot p(t) \cdot \Delta t. \quad (4)$$

式中, $P(t)$ 为第 t 个优化时段的平均功率; $p(t)$ 为 t 时刻的电价.

舒适度成本 C_d 表示为:

$$C_d = \sum_t (\eta_1 (c_{T_b}(t) + c_{T_d}(t))) + \eta_2 c_a. \quad (5)$$

式中, $c_{T_b}(t)$ 为 T_{in} 越出舒适度区间的惩罚成本; $c_{T_d}(t)$ 为 T_{in} 偏离温度设定值的惩罚成本; c_a 为对功率调整次数的惩罚成本. η_1 、 η_2 为舒适度惩罚因子. 各惩罚成本分别表示如下:

$$c_{T_b}(t) = \begin{cases} 0, & T_{min} \leq T_{in}(t) \leq T_{max}, \\ -k_1 (T_{in}(t) - T_{min}), & T_{in}(t) < T_{min}, \\ k_1 (T_{in}(t) - T_{max}), & T_{in}(t) > T_{max}. \end{cases} \quad (6)$$

$$c_{T_d}(t) = \begin{cases} \lambda (T_{set} - T_{in}(t)), & T_{in}(t) < T_{set}, \\ \lambda (T_{in}(t) - T_{set}), & T_{in}(t) \geq T_{set}. \end{cases} \quad (7)$$

$$c_a = \begin{cases} 0, & n_a \leq n_{max}, \\ k_2 (n_a - n_{max}) + \delta, & n_a > n_{max}. \end{cases} \quad (8)$$

式中, k_1 、 λ 为温度惩罚系数; k_2 为功率调整次数的惩罚系数.

在式中, 由于频繁调整空调负荷会影响用户的用电舒适度, 因此当 n_a 超过调节上限时, 随即产生一个惩罚 δ .

此外, 空调运行满足功率限值约束:

$$0 \leq P(t) \leq P_{max}. \quad (9)$$

2 ACLs 的弹性线性优化模型

文献[21-22]中提出的优化模型满足刚性约束:

$$\begin{aligned} T_{min} &\leq T_{in} \leq T_{max}, \\ 0 &\leq n_a \leq n_{max}. \end{aligned} \quad (10)$$

本文将不等式组所给出的刚性约束转化为弹性模型. 在解决空调负荷的优化问题时, ACLs 的优化问题受到分段函数的约束, 而混合整数线性规划 (mixed integer linear programs, MILP) 无法求解该问题. 因此, 将对这些非线性形式转换为线性形式, 使得该弹性模型转换为线性优化模型, 从而可通过 MILP 求得最优解.

2.1 温度约束的弹性转换

为了将式(6)转换为等价的线性形式, 定义了一组辅助变量, 用 v_{down}^+ 、 v_{down}^- 、 v_{up}^+ 和 v_{up}^- 表示, 均为非负实变量.

如果室内温度低于 T_{min} 时, 则

$$\begin{cases} v_{\text{down}}^-(t) = T_{\min} - T_{\text{in}}(t), \\ v_{\text{up}}^-(t) = T_{\max} - T_{\text{in}}(t), \\ v_{\text{down}}^+(t) = v_{\text{up}}^+(t) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

如果室内温度在舒适度区间内,则

$$\begin{cases} v_{\text{down}}^+(t) = T_{\text{in}}(t) - T_{\min}, \\ v_{\text{up}}^+(t) = T_{\max} - T_{\text{in}}(t), \\ v_{\text{down}}^-(t) = v_{\text{up}}^-(t) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

如果室内温度高于 T_{\max} 时,则

$$\begin{cases} v_{\text{up}}^+(t) = T_{\text{in}}(t) - T_{\max}, \\ v_{\text{down}}^+(t) = T_{\text{in}}(t) - T_{\min}, \\ v_{\text{up}}^-(t) = v_{\text{down}}^-(t) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中, v_{down}^- 表示 T_{in} 低于 T_{\min} 的温度量; v_{down}^+ 表示 T_{in} 高于 T_{\min} 的量; v_{up}^- 表示 T_{in} 低于 T_{\max} 的量; v_{up}^+ 表示 T_{in} 高于 T_{\max} 的量.

当公式的条件满足时,分段函数中 T_{in} 超出温度界限的量可以用 v_{down}^- 代替,等式 $v_{\text{down}}^- - v_{\text{down}}^+ = v_{\text{down}}^-$ 和 $v_{\text{up}}^- - v_{\text{up}}^+ = v_{\text{up}}^-$ 成立. 因此,式(11)中的第一个和第二个等式可以分别转换为:

$$v_{\text{down}}^-(t) - v_{\text{down}}^+(t) = T_{\min} - T_{\text{in}}(t), \quad (14)$$

$$v_{\text{up}}^-(t) - v_{\text{up}}^+(t) = T_{\max} - T_{\text{in}}(t). \quad (15)$$

当 T_{in} 在舒适范围区间时,等式 $v_{\text{down}}^+ - v_{\text{down}}^- = v_{\text{down}}^+$ 和 $v_{\text{up}}^- - v_{\text{up}}^+ = v_{\text{up}}^-$ 成立. 且式(11)等价于式(14)和式(15). 当 T_{in} 高于 T_{\max} 时,等式 $v_{\text{down}}^+ - v_{\text{down}}^- = v_{\text{down}}^+$ 和 $v_{\text{up}}^- - v_{\text{up}}^+ = v_{\text{up}}^+$ 成立. 综上所述,不管任何温度条件下的约束方程都等价于式(14)和式(15).

将上述辅助变量代入中,则函数 $c_{T,b}(t)$ 可化为:

$$c_{T,b}(t) = k_1(v_{\text{down}}^-(t) + v_{\text{up}}^+(t)). \quad (16)$$

类似地,为了将温度偏差成本线性化,引入了辅助变量 v_d^+ 和 v_d^- . 其中, v_d^- 表示 T_{in} 低于 T_{set} 的量, v_d^+ 表示 T_{in} 高于 T_{set} 的量,则辅助变量与温度的关系经过线性化变换后可以表示为:

$$T_{\text{in}}(t) - T_{\text{set}} = v_d^+(t) - v_d^-(t). \quad (17)$$

温度偏差成本转换为:

$$c_{T,d}(t) = \lambda(v_d^+(t) + v_d^-(t)). \quad (18)$$

2.2 功率调整次数约束的弹性转换

该部分将式(8)进行转换. 首先,由于 n_a 为功率调整次数,可以表示如下:

$$n_a = \sum_t x_p(t). \quad (19)$$

式中, $x_p(t)$ 表示 t 时刻的功率调整信号,若功率在 t 时刻发生变化,则该变量值为 1. 若功率在 t 时刻没有发生变化,则该变量值为 0, $x_p(t)$ 表示为:

$$x_p(t+1) = \begin{cases} 1, & P(t+1) \neq P(t), \\ 0, & P(t+1) = P(t). \end{cases} \quad (20)$$

上式为分段非线性函数,空调负荷的功率 $P(t)$ 和二进制变量 $x_p(t)$ 之间的关系可以用大 M 法表示为如下的等价线性形式:

$$-M_p \cdot x_p(t) \leq P(t+1) - P(t) \leq M_p \cdot x_p(t). \quad (21)$$

式中, M_p 是一个较大正数.

x_a 为另一组描述 n_a 是否超过上限的二进制变量,

$$x_a = \begin{cases} 1, & n_a > n_{\max}, \\ 0, & n_a \leq n_{\max}. \end{cases} \quad (22)$$

再次利用大 M 法,将上式转化为:

$$\begin{cases} 0 \leq s^+ \leq M_s \cdot x_a, \\ s^- \geq 0. \end{cases} \quad (23)$$

式中, s^+ 表示 n_a 高于 n_{\max} 的值; s^- 表示 n_a 低于 n_{\max} 的值. 则 n_a 和 n_{\max} 的关系可表示为

$$n_a = n_{\max} + s^+ - s^-. \quad (24)$$

通过上述线性化转换, 将 n_a 的惩罚成本表示为

$$c_a = (\delta x_a + k_2 s^+). \quad (25)$$

2.3 线性优化模型

舒适度成本表达为如下形式:

$$C_d = \eta_1 \sum_t (k_1 (v_{\text{down}}^-(t) + v_{\text{up}}^+(t)) + \lambda (v_d^+(t) + v_d^-(t))) + \eta_2 (\delta x_a + k_2 s^+). \quad (26)$$

基于弹性约束的空调负荷优化模型可以概括如下:

目标函数:

$$f = \min \left(\alpha \sum_t P(t) \cdot p(t) \cdot \Delta t + (1 - \alpha) \times \left(\eta_1 \sum_t (k_1 (v_{\text{down}}^-(t) + v_{\text{up}}^+(t)) + \lambda (v_d^+(t) + v_d^-(t))) + \eta_2 (\delta x_a + k_2 s^+) \right) \right). \quad (27)$$

约束条件: 式(9)、式(14)、式(15)、式(17)、式(21)、式(23)和式(24).

3 仿真与结果分析

对变频空调和定频空调分别进行了算例验证, 以证明弹性策略在尖峰电价下的有效性. 将尖峰电价设定为分时电价的十倍作为极限电价情况. 整个调度周期为 24 h, 采样间隔为 15 min.

3.1 基于 MILP 的空调负荷优化结果

本文设置的 ACLs 参数如表 1^[9] 所示, 温度设定值为 25 °C, 允许偏差为 ± 1 °C.

尖峰电价的峰值设置为分时电价峰值的两倍 ($p_{\text{CPP}} = 2$ 元/kW·h), 如图 2 所示, 终端用户自定义用电偏好. 表 2 得到不同 α 值对应的弹性模型中各项成本.

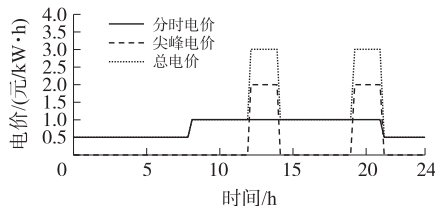


图 2 电价曲线

Fig. 2 Electricity price curve

如表 2 所示, 随着 α 值的增加, 电费呈现下降趋势(负相关), 但温度惩罚的成本越来越大. 在下文中设 $\alpha = 0.6$.

随着 p_{CPP} 的上升, 刚性模型和弹性模型的成本比较如图 3 所示. 当尖峰电价处于正常水平时, 弹性约束的优化策略和刚性约束的优化策略下的成本基本没有差别. 随着 p_{CPP} 上升至 10 元/kW·h 时, 弹性策略的成本低于刚性策略的成本, 尤其是电费成本.

3.2 不同控制下的结果比较

为了进行对比研究, 采用了以下两个优化方法进行比较:

表 1 ACLs 的参数

Table 1 The parameters of the ACLs

参数	值	参数	值	参数	值
T_{set}	25 °C	C	4 kW·h/°C	η	3.6
R	2 °C/kW	P	1.5 kW		

表 2 考虑不同用户偏好 α 的各项成本对比

Table 2 Comparisons of costs considering different α

	α	电费/元	温度越限惩罚	温度偏离惩罚
舒适型	0	36.81	0	0
	0.3	34.38	0	0.66
多目标	0.6	32.62	0.09	2.23
	0.9	30.02	3.56	5.17
经济型	1	30.02	23.87	8.77

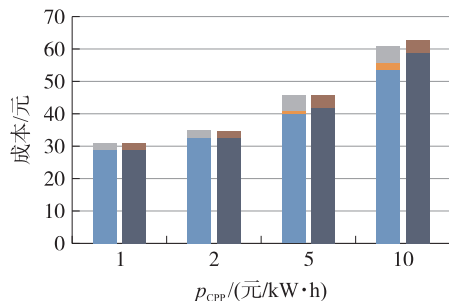


图 3 弹性模型和刚性模型的成本

Fig. 3 Costs of elastic and rigid optimization methods

(1)方法一:使用刚性约束的空调用户优化方法^[21-22].

(2)方法二:本文提出的使用弹性约束代替刚性约束的空调负荷优化方法.

为了检验两种模型的优化差别,电价设置如图4(a1)所示.从图4得到以下观察结果:图4(c1)为刚性模型中电功率在调整次数上限的作用下只调整了4次,并且 T_{in} 始终控制在 $[T_{min}, T_{max}]$ 内.而弹性模型中 n_a 为7次,超过了设定的功率调整次数上限,温度也超出舒适范围.根据图1(b)所示的弹性优化策略,图4中区域 S_1 和 S_3 受到惩罚.

3.3 聚合 ACLs 的优化结果

为了验证所提出的聚合 ACLs 弹性模型较刚性模型的优越性,算例对 100 台参数呈正态随机分布的变频空调进行仿真. R 、 C 和 T_{in} 的期望分别设置为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{kW}$ 、 $4\text{ kW}\cdot\text{h}/^{\circ}\text{C}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,方差分别为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{kW}$ 、 $0.1\text{ kW}\cdot\text{h}/^{\circ}\text{C}$ 和 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.电价形式如图2所示.温度归一化后的舒适划分区间如表3所示.

表3 温度舒适区间等级

Table 3 The temperature comfort zone level		
舒适度等级	温度区间/ $^{\circ}\text{C}$	归一化区间
舒适	$[24, 26]$	$[0, 1]$
较舒适	$[23, 24) \cup (26, 27]$	$[-0.5, 0) \cup (1, 1.5]$
不舒适	$(-\infty, 23) \cup (27, +\infty)$	$(-\infty, -0.5) \cup (1.5, +\infty)$

本文所提出的弹性优化策略会在尖峰电价高时适当牺牲舒适度,但不会进入“不舒适”区域,从而获得更低的聚合功率,如图5所示.当 $p_{\text{COP}}=1\text{ 元}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 时,两种方法的电费基本相等.当 $p_{\text{COP}}=10\text{ 元}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 时,采用弹性约束的优化方法(方法二)相比于传统刚性优化方法(方法一)节省了4.6%的电费.

为了验证两种策略的削负荷能力,本文选取华北某城市夏季配电网的负荷基线,ACLs的聚合负荷曲线如图6所示,设置 $p_{\text{COP}}=10\text{ 元}/\text{kW}\cdot\text{h}$.从图6可以得到,所提出的方法(弹性优化)比刚性方法缓解了更多峰值用电压力.因此,验证了所提出的弹性优化方案对电力运营商和用户双方都是有益的.

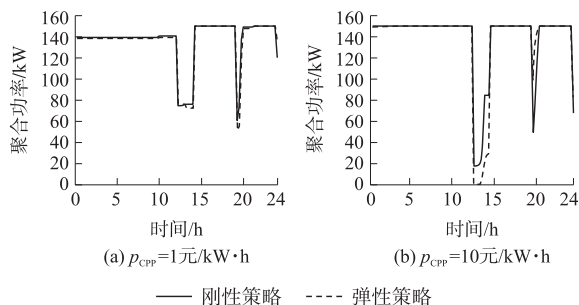
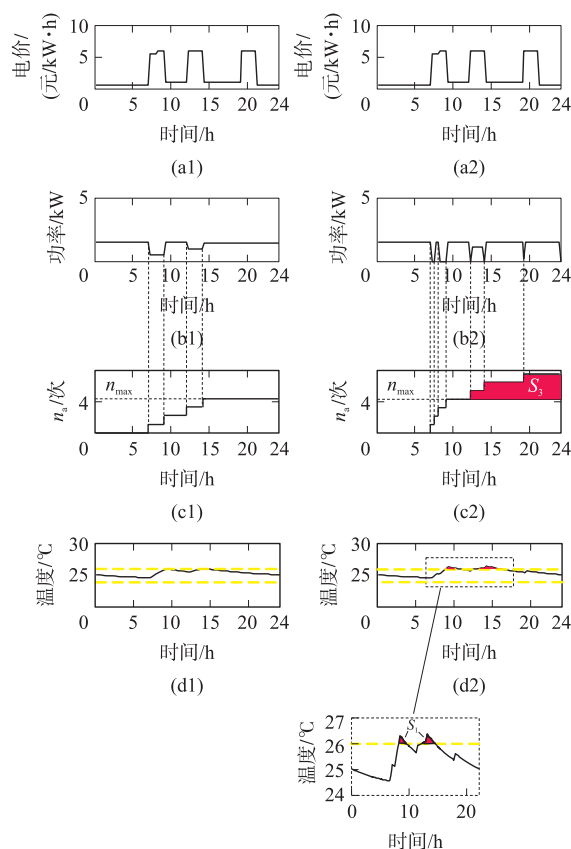


图5 ACLs的聚合功率

Fig. 5 Aggregate power of ACLs



(a) 电价; (b) ACLs 功率; (c) 调整次数; (d) 室内温度 (左列为刚性模型, 右列为弹性模型)

图4 优化结果对比

Fig. 4 Comparison of optimization results

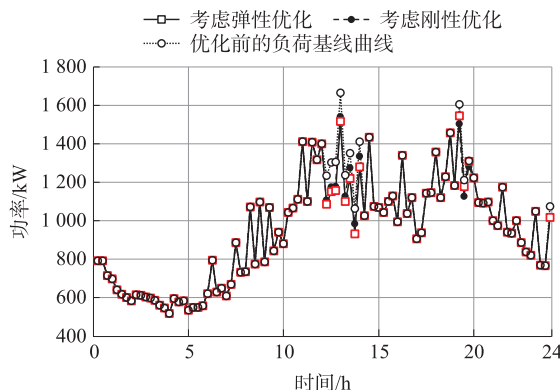


图6 优化前后的负荷曲线对比结果

Fig. 6 Comparison of load curves before and after optimization

3.4 弹性策略在占空比控制的定频空调中的应用

将弹性策略应用于固定频率 ACLs. 定频空调的工作状态由占空比控制,表示为:

$$D(i, t) = \frac{P(i, t)}{P_{\max}} = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} \quad (28)$$

式中, $D(i, t)$ 表示第 i 个 ACLs 在 t 时的占空比信号; $P(i, t)$ 表示第 i 个 ACLs 在 t 时的功率; t_{on} 表示一个周期内 ACLs 开启的时间; t_{off} 表示 ACLs 在一个周期内关闭的时间.

算例考虑了 100 台定频空调, 控制结果如图 7 所示, 功率和归一化温度为随机挑选的 20 台 ACLs 的观察结果. 定频空调只有“on”和“off”状态, 不能连续调节功率. 正常情况下, ACLs 会周期性地开启和关闭, 如图 7(a) 所示. 由图 7(b) 可知, 随着尖峰电价峰值的提高, 更多的空调负荷以更低的功率运行, 在节省相同电费(即节省 4.6% 电费)下, 聚合功率与图 5(b) 中弹性策略下的聚合变频空调功率基本一致, 从而验证了弹性策略对于定频空调同样是有有效的.

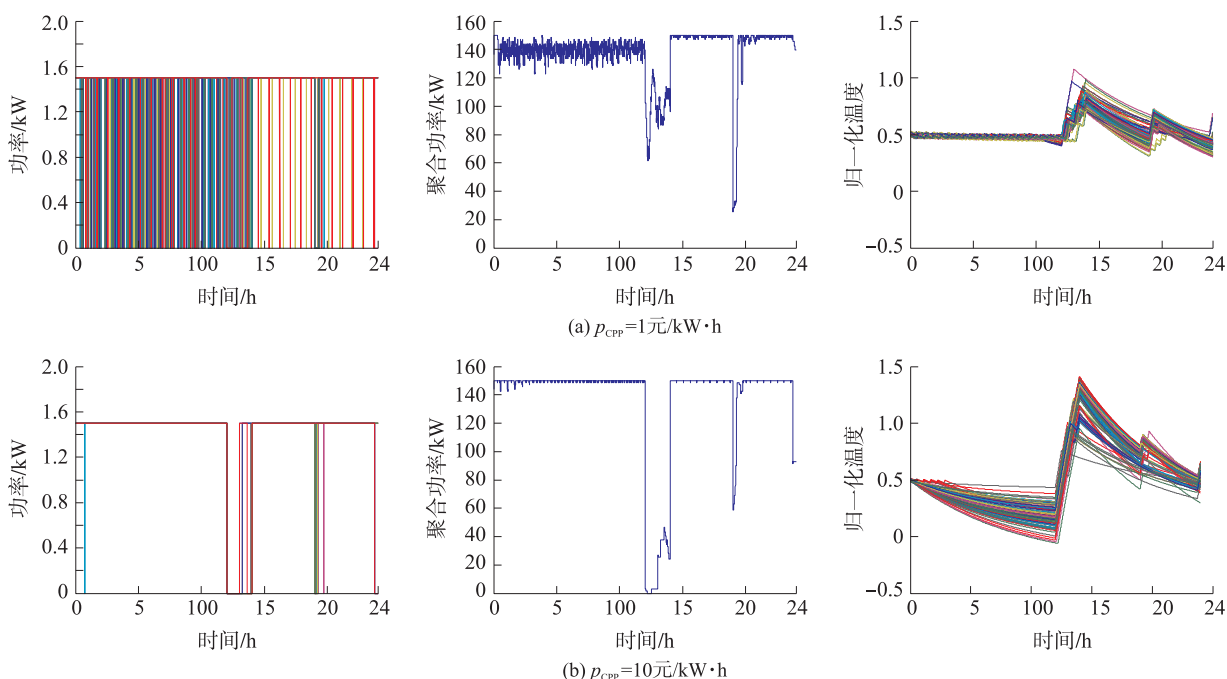


图 7 采用弹性策略的定频空调优化结果

Fig. 7 Optimal results of fixed-frequency ACLs with elastic strategy

4 结论

本文针对 ACLs 提出了一种利用弹性约束代替传统刚性约束的用能优化策略, 从而使优化能在节约电费的同时获得更好的削负荷效果.

(1) 建立了 ACLs 有效适应极端条件的弹性优化模型. 并且将所提出的弹性模型转换为线性优化模型, 从而可以通过 MILP 求得最优解. 与传统的刚性模型相比, 弹性优化模型在极高电价尖峰时, 使 ACLs 拥有更大的削负荷能力并且节省了更多的电费.

(2) 通过对控制信号的转换, 证明了所提出的 ACLs 弹性约束策略也可以有效地应用于定频空调负荷中.

[参考文献] (References)

- [1] WU H, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Thermal generation flexibility with ramping costs and hourly demand response in stochastic security-constrained scheduling of variable energy sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 2955-2964.
- [2] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.

- [3] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189–198.
- [4] 周明, 李琰, 李庚银. 基于随机生产模拟的日前发电——备用双层决策模型[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1606–1613.
- [5] 陈伟伟, 张增强, 张高航, 等. 计及需求响应及抽水蓄能的含风电系统鲁棒机组组合[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 75–82.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] MATHIEU J, KAMGARPOUR M, LYGEROS J, et al. Arbitraging intraday wholesale energy market prices with aggregations of thermostatic loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 763–772.
- [9] LU N. An evaluation of the HVAC Load Potential for Providing Load Balancing Service[J]. IEEE Transactions Smart Grid, 2012, 3(3): 1263–1270.
- [10] CALLAWAY D S. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation with application to wind energy[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1389–1400.
- [11] JEROME H K, DARREN R. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(4): 445–453.
- [12] 王栋, 徐青山, 陈亮, 等. 参与调峰控制的空调负荷建模仿真研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 80–86.
- [13] ZHANG W, LIAN J, CHANG C, et al. Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4655–4664.
- [14] SANANDAJI B M, VINCENT T, POOLLA K. Ramping rate flexibility of residential HVAC loads[J]. IEEE Trans Sustainable Energy, 2016, 7(2): 865–874.
- [15] BASHASH S, FATHY H. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management[J]. IEEE Transactions Control System Technology, 2013, 21(4): 1318–1327.
- [16] MAHDAVI N, BRASLAVSKY J, PERFUMO C. Mapping the effect of ambient temperature on the power demand of populations of air conditioners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1540–1550.
- [17] MAHDAVI N, BRASLAVSKY J, SERON M, et al. Model predictive control of distributed air conditioning loads to compensate fluctuations in solar power[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 3055–3065.
- [18] HUI H, DING Y, CHEN T, et al. Dynamic and stability analysis of the power system with the control loop of inverter air conditioners[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2725–2736.
- [19] JIANG A, WEI H, DENG J, et al. Cloud-edge cooperative model and closed-loop control strategy for the price response of large-scale air conditioners considering data packet dropouts[J]. IEEE Transactions Smart Grid, 2020, 11(5): 4201–4211.
- [20] 宋爽, 李中伟, 刘勇, 等. 住宅小区负荷群用电优化策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(8): 10.
- [21] LI Y W, SHEN Y W, ZHOU L, et al. Progressive time-differentiated peak pricing(PTPP) for aggregated air-conditioning load in demand response programs[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(1): e2664.
- [22] HONG Y, CHANG W, CHANG Y, et al. Optimal scheduling of energy consumptions for air conditioners in a smart community with renewables[J]. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016: 385–391.
- [23] WANG J Y, CHEN X Y, YU K, et al. Optimal scheduling of air conditioning loads by aggregator under dynamic price[J]. IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2019: 191–195.
- [24] 王蓓蓓, 亢丽君, 苗曦云, 等. 考虑可信度的新能源及需求响应参与英美容量市场分析思考[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1–16.

[责任编辑:陈 庆]