

基于熵分析的温控负荷潜力评估与竞价策略研究

孟诗语¹,史文博¹,邹风华¹,曹 骏²,陈爱康¹,王 淞³

(1. 国网(苏州)城市能源研究院有限责任公司,江苏 苏州 215163;2. 国网江苏省电力有限公司 苏州供电公司,江苏 苏州 215200;3. 东南大学,南京 210096)

摘要:温控负荷一般需要进行潜力分析与聚合调控,但现有对温控负荷直接管控的调度模式影响用户的使用隐私。提出一种基于熵分析的温控负荷潜力评估与竞价策略研究。首先,通过熵分析得到人体的热舒适温度区间以精确评估居民温控负荷的调峰能力区间,进而确定居民温控负荷的响应能力;然后,考虑以虚拟电厂作为调控多个温控负荷的主体;基于温控负荷用户的效用函数得到价格-功率竞价曲线,提交用户侧温控负荷响应调节能力信息。最后,VPP接收多个用户的竞价曲线后,以虚拟电厂收益最大化为优化目标,以收购电价为决策变量,获取温控负荷的优化调度策略。仿真结果验证了基于熵分析的温控负荷潜力评估与竞价策略研究的有效性。

关键词:熵分析;温控负荷;竞价曲线;效用函数;虚拟电厂

Research on the assessment of temperature control loads potential and bidding strategy based on human exergy analysis

MENG Shiyu¹, SHI Wenbo¹, ZOU Fenghua¹, CAO Jun², CHEN Aikang¹, WANG Song³

(1. State Grid(Suzhou)City and Energy Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215163, China;2. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215200,China;3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The potential analysis and aggregate control of temperature control loads are generally required, but the existing scheduling mode of direct control of temperature control load affects the user's privacy. Exergy analysis based on exergy power plant peak load potential assessment and regulation strategy is proposed. Firstly, exergy analysis shows that exergy comfort temperature range of human body can be accurately evaluated to determine the peak load capacity range of residential TCLs, and then determine the response capability of residential TCLs. Then, virtual power plant is considered as the main body for regulating multiple TCLs. Based on the utility function of the TCLs user, the price-power bidding curve is obtained, and the response adjustment capability information is submitted. Finally, after receiving the bidding curves of multiple users, VPP takes the revenue maximization as the optimization goal and the purchase price as the decision variable to obtain the optimal scheduling strategy of VPP. Exergy simulation results verify the effectiveness of exergy peak-load potential assessment and regulation strategy for a virtual power plant based on exergy analysis.

Key words: exergy analysis; temperature control load; bidding curve; utility function; virtual power plant

0 引言

新能源在电力系统中的大规模部署使得电力系统的结构与调度更加庞杂,对电网的平稳运行带来更大压力与挑战。因此,需要充分调动电力系统中的资源潜力,构建新型的用户侧资源的管理模式。对于用户侧资源而言,随着空调等温控负荷的普及推广,温控负荷数量众多、易于调控、反应快速的优势得以显现^[1]。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)

是智能电网中的管控温控负荷的重要手段^[2-3]。作为用户侧资源,VPP在调控温控负荷时,必须充分考虑并评估用户的响应意愿和温控负荷的调度潜力。

用户热舒适程度的评估准确度将对温控负荷的响应潜力有较大影响。对于安装空调的室内环境中,传统的评估人体热舒适的方法包括平均预测投票方法(predicted mean vote, PMV)方法及自适应模型^[4]。PMV方法并未考虑人体自身的行为对热舒适产生的影响^[5]。在文献[6]中,利用PMV方法考虑了温控负荷响应电网调控时人体的舒适度,但其参考的数据中未考虑人体自身情况。自适应模型方法基于在自由运行建筑中的实测和调查问卷得

收稿日期:2024-03-10;修回日期:2024-05-22

基金项目:国网(苏州)城市能源研究院有限责任公司项目
(CEKY23066)

出^[7],未完全考虑室内参数的影响。人体熵分析方法是一种已经在热环境研究领域得到广泛应用的评估方法,可以更精确的描述人体热舒适水平^[8]。熵分析方法关注能量在传递、转换和利用过程中所伴随的能量品质的变化情况,其中有用的能量成为熵。人体熵分析方法基于室内与室外的多种环境参数和人体自身的行为、衣着水平,以熵损失速率反映人体的热舒适状态,相比于PMV方法和自适应模型更加准确^[9]。

目前的研究中,VPP需要对所属的温控负荷进行完全控制,即VPP下发指标-用户侧资源响应指标。文献[10]中虚拟电厂通过智能终端直接控制用户侧资源出力,并聚合所有下属资源作为可参与需求响应的整体。文献[11]介绍了多种自上而下集中管控灵活资源的聚合技术架构,通过在用户侧资源部署智能终端,直接获取用户侧资源工作状态,并依据VPP优化结果下发对用户侧资源的控制指令。对用户侧资源而言,目前的管控模式均试图影响用户的用能方式^[12]。但用户侧资源与电源侧发电机组不同在于,用户与虚拟电厂的合作基于经济利益而非管制,因此考虑用户侧的隐私和响应偏好存在其必要性。

基于上述文献所提及的内容,本文将自下而上地构建基于熵分析的虚拟电厂调峰潜力评估与调控策略。首先利用人体熵模型计算人体最舒适温度区间并作为居民类温控负荷的控制量,评估温控负荷的响应潜力;其次基于用户消耗电能获得的效用,构建用户向虚拟电厂提出的响应价格—响应功率曲线;最后以虚拟电厂为调控温控负荷的主体,通过收集多个下属用户的竞价曲线,构建温控负荷参与电网调峰过程的调控策略。

1 人体熵分析与温控负荷调节潜力评估

1.1 人体熵模型的建立

当外界环境发生显著变化时,人体自身将从前一稳态调节至后一稳态,在此过程中消耗的最大有用功被称为人体熵。由于该过程不可逆,即在状态转换过程中实际消耗的有用功与人体熵之间存在差值,此差值被称为人体熵损失速率。

人体熵损失速率计算方法为

$$E_{x,\text{cons}} = E_{x,s} + E_{x,\text{Res}} + E_{x,\text{skin}} - E_{x,M} - E_{x,w} \quad (1)$$

式中: $E_{x,\text{cons}}$ 为熵损失速率; $E_{x,M}$ 为新陈代谢熵; $E_{x,w}$ 为做功熵; $E_{x,s}$ 为储存熵; $E_{x,\text{Res}}$ 为呼吸熵; $E_{x,\text{skin}}$ 为皮肤换热熵。单位均为W/m²。皮肤换热熵又可由式(2)表示

$$E_{x,\text{skin}} = E_{x,\text{eva}} + E_{x,c} + E_{x,rad} \quad (2)$$

式中: $E_{x,\text{eva}}$ 为蒸发熵; $E_{x,c}$ 为对流熵; $E_{x,rad}$ 为辐射熵。

(1) 新陈代谢熵 $E_{x,M}$

新陈代谢熵代表人体的物质代谢和能量转化。新陈代谢熵一般包含以下3部分:新陈代谢本身的热能熵,代谢过程中核心层产生的液态水熵及皮肤层产生的液态水熵

$$\begin{aligned} E_{x,M} = & (M - M_w)(1 - \frac{T_o}{T_{cr}}) + V_{w-\text{core}} \rho_w \left[C_{pw}(T_{cr} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cr}}{T_o}) + \right. \\ & 0.4606 T_o \ln \frac{p_{vs}(T_o)}{p_{vo}} \left. \right] + V_{w-\text{skin}} \rho_w \left\{ C_{pw}(T_{sk} - T_o - T_o \ln \frac{T_{sk}}{T_o}) + \right. \\ & 0.4606 T_o \left[\ln \frac{p_{vs}(T_o)}{p_{vo}} + \frac{p - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \frac{p - p_{vr}}{p - p_{vo}} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: M 为新陈代谢率,W/m²; M_w 为湿代谢率,W/m²; ρ_w 为水的密度,kg/m³; C_{pw} 为水比热容,J/(kg·K); C_{pv} 为水蒸气比热容,J/kg; T_o 为室外参考温度,K; T_{cr} 为核心层温度,K; $V_{w-\text{core}}$ 为核心层代谢水量,m³/(s·m²); m_{res} 为呼吸换气量,kg/s; $V_{w-\text{skin}}$ 为皮肤层代谢水量,m³/(s·m²); E_{max} 为人体最大蒸发换热量,W/m; w 为皮肤湿度,无量纲; p_{vo} 为室外水蒸气分压,kPa; p_{vr} 为室内水蒸气分压,kPa; $p_{vs}(T_o)$ 为室外温度 T_o 下饱和水蒸气分压,kPa; p 为环境大气压,kPa。

(2) 储存熵 $E_{x,s}$

储存熵一般指人体核心层以及皮肤层储存的热能,稳态时视为0。

(3) 呼吸熵 $E_{x,\text{Res}}$

呼吸换热主要在人体核心层与周围空气间进行,呼吸熵表示人体呼吸过程中的熵数值差异

$$\begin{aligned} E_{x,\text{Res}} = & \frac{m_{res}}{A_D} \left\{ (C_{pa} + W_{ex} C_{pv})(T_{cr} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cr}}{T_o}) + \right. \\ & R_a T_o \left[(1 + 1.608 W_{ex}) \ln \frac{1 + 1.608 W_o}{1 + 1.608 W_{ex}} + 1.608 W_{ex} \ln \frac{W_{ex}}{W_o} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: R_a 为气体常数,J/(kg·K); C_{pa} 为干空气比热容,J/(kg·K); W_{ex} 为人体呼出气体含湿量,g/kg; W_o 为室外空气含湿量,g/kg。

(4) 蒸发熵 $E_{x,\text{eva}}$

$$\begin{aligned} E_{x,\text{eva}} = & V_{w-\text{skin}} \rho_w \left[0.4606 T_o \left(\ln \frac{p_{vr}}{p_{vo}} + \frac{p - p_{vr}}{p_{vr}} \ln \frac{p - p_{vr}}{p - p_{vo}} \right) + \right. \\ & C_{pv}(T_{cl} - T_o - T_o \ln \frac{T_{cl}}{T_o}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: T_{cl} 为服装表面温度,K。

(5) 对流熵 $E_{x,c}$

$$E_{x,c} = f_{cl} h_{c,cl} (T_{cl} - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_{cl}}\right) \quad (6)$$

式中: f_{cl} 为人体着装面积与裸露体表面积之比, 无量纲; $h_{c,cl}$ 为服装表面平均对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 为室内空气温度, K ; I_{cl} 为服装热阻, clo 。

(6) 辐射熵 $E_{x,rad}$

$$E_{x,rad} = f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_r^4) \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_r} + \frac{1}{3} \frac{T_o^4}{T_r^4}\right) \quad (7)$$

式中: f_{eff} 为服装有效辐射面积系数, 无量纲, 坐态取 0.7; ε 为辐射系数; σ 为玻尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_r 为室内平均辐射温度, K 。

假设室内平均辐射温度与室内空气温度相等, 对不同的室内空气温度, 有不同的人体熵损失速率, 形成一条人体熵损失速率与室内空气温度之间对应关系。视熵损失速率最小时对应的温度为人体热舒适时的室内空气温度, 作为温控负荷调节时的目标温度 T_{set} , 即

$$T_{set} = \arg \min E_{x,cons} \quad (8)$$

由于人在一定的空气温度区间内对舒适度的变化感觉不敏感, 因此在此区间的室内空气温度下, 用户也可以接受此时的室内温度状态。因此, 在人体热舒适时的室内空气温度两端各扩展一定范围, 此范围记为 $[T_{min}, T_{max}]$, 作为温控负荷的工作区间温度, 即

$$\begin{cases} T_{min} = T_{set} - \Delta T_1 \\ T_{max} = T_{set} + \Delta T_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_{min} 为用户人体热舒适状态所能忍受的最低温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{max} 为用户人体热舒适状态下所能忍受的最高温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_1 、 ΔT_2 分别为扩展温度范围。

1.2 温控负荷调节潜力评估

以变频空调系统为例, 空调的初始设定温度一般为人体熵模型中所求取的热舒适温度。当空调运行于初始设定温度 T_{set} 时, 消耗功率为功率基值 $P_{baseline}$ 。功率基值 $P_{baseline}$ 的求取方法为式(10)所示

$$P_{baseline} = \frac{k_1(T_{out} - T_{set})}{k_2 R} + \frac{k_2 l_1 - k_1 l_2}{k_2} \quad (10)$$

式中: 根据文献[13], 变频空调压缩机频率与消耗的有功或无功存在线性关系, k_1 、 k_2 、 l_1 、 l_2 为线性关系参数; T_{out} 为室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为空调负荷的等效阻抗, $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$ 。

电功率的偏移量定义为虚拟发电机的发电功率 P_c

$$P_c = P_v - P_{baseline} \quad (11)$$

当实际的空气温度 T_i 与最理想的热舒适温度 T_{set} 差距越大时, P_c 越大, 即

$$P_c = \frac{(T_i - T_{set})}{R} \frac{k_1}{k_2} \quad (12)$$

由于空调的运行, 实际的空气温度 T_i 将在 $[T_{min}, T_{max}]$ 区间内发生变化, 因此, 虚拟发电机的发电功率 P_c 也将在 T_i 取不同值时发生变化。

由于变频空调具有功率上下限, 则发电功率 P_c 满足约束条件

$$-(P_{baseline} - P_{min}) \leq P_c \leq P_{max} - P_{baseline} \quad (13)$$

式中: P_{max} 和 P_{min} 分别为变频空调的消耗电功率最大值和最小值, kW 。

在满足人体热舒适的条件下, 可以将发电功率 P_c 作为调峰能力进行需求响应。虚拟发电机组既可以发出正有功, 也可以发出负有功。因此空调系统可以由此参与需求响应, 其需求响应潜力即为 $[P_{c,min}, P_{c,max}]$ 。

2 温控负荷优化调度与竞价策略

2.1 用户竞价曲线的生成

对每个普通用户而言, 其目标函数应该是最大的用户收益, 用户的效用函数一般表示为一个凹效用函数^[14], 本文选择二次函数对用户效用函数描绘, 合计后的用户效用函数 F_{fm} 可表示为

$$\begin{cases} \max F_{fm} = F_{usr} + F_{fm_vpp} - C_{pg_fm} \\ F_{usr} = a(P_0 + P_c)^2 + b(P_0 + P_c) + c \\ F_{fm_vpp} = \lambda P_c \\ C_{pg_fm} = \lambda_0(P_0 + P_c) \end{cases} \quad (14)$$

式中: F_{usr} 为用户总计使用电器所得到的收益, 空调在人体熵模型损失速率最小时会保证人体热舒适程度最高; $P_0 = P_{convload} + P_{baseline}$, 为传统的负荷和空调的基线负荷的和值; F_{fm_vpp} 为用户出售给 VPP 的调峰收益; λ 为 VPP 的收购价格; C_{pg_fm} 为从电网购电的成本, 即用户的电费; λ_0 为电网的电价。

由于 P_0 是一个不会发生变化的功率, 而 P_c 会随着空调压缩机频率变化而变化, 而在某一区间内浮动, 故计算竞价曲线时, 若使总的用户效用函数 F_{fm} 取值最大, 可以直接对 F_{fm} 求偏导, 从而偏导为 0 时得到 VPP 收购价格 λ 与 P_c 的线性函数关系, 进而形成竞价曲线。即

$$\frac{\partial F_{fm}}{\partial P_c} = 0 \quad (15)$$

因此, 得到 λ 与 P_c 的函数关系为

$$P_c = -\frac{1}{2a} \lambda + \frac{1}{2a} (\lambda_0 - 2aP_0 - b) \quad (16)$$

此关系为一个线性关系, 即用户提交给 VPP 的

竞价曲线。

由于每个用户的温控负荷虚拟机组均有其功率上下限 $[P_{c,\min}, P_{c,\max}]$, 故对于 P_c 有如下约束

$$P_c = \begin{cases} P_{c,\max} & \lambda > \lambda_0 - 2a(P_0 + P_{c,\max}) - b \\ -\frac{1}{2a}\lambda + \frac{1}{2a}(\lambda_0 - 2aP_0 - b) & \lambda_0 - 2aP_0 - b < \lambda < \\ & \lambda_0 - 2a(P_0 + P_{c,\max}) - b \\ 0 & 0 < \lambda < \lambda_0 - 2aP_0 - b \\ -\frac{1}{2a}\lambda + \frac{1}{2a}(\lambda_0 - 2aP_0 - b) & \lambda_0 - 2a(P_0 + P_{c,\min}) - b < \lambda < 0 \\ P_{c,\min} & \lambda < \lambda_0 - 2a(P_0 + P_{c,\min}) - b \end{cases} \quad (17)$$

2.2 基于虚拟电厂的温控负荷优化调度策略

考虑一种风力发电不确定性的电网调度 VPP 及 VPP 调度温控负荷的调度场景: VPP 可调度分布式风电及用户侧聚合温控负荷资源。风电需提前提供给电网功率预测曲线。因风电具有其不确定性, 故实际发出的功率并不完全与功率曲线重合, 此时需调度 VPP 中的温控负荷进行调峰操作。故 VPP 的总利润应包括 4 部分, 风电发电收益、温控负荷调峰收益、温控负荷调用成本及风电发电偏差所受的电网考核成本。

用户向 VPP 提供的竞价曲线为 $P_c = f(\lambda)$ 。故在第 t 小时, 第 i 个用户向 VPP 提供的竞价曲线为 $P_{c,i,t} = f_{i,t}(\lambda)$ 。

VPP 的目标函数为

$$\max F_{vpp} = |F_{wd,t} + F_{vpp-pd,t} - C_{fm-vpp,t} - C_{wd-sche,t}| \Delta t \quad (18)$$

$$\begin{cases} F_{vpp-pd,t} = \lambda'_t P_{c,t} \\ C_{fm-vpp,t} = \lambda_t \sum_{i \in I} P_{c,i,t} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $F_{wd,t}$ 为 t 时刻风电出力出售给电网的收益; $F_{vpp-pd,t}$ 为 t 时刻 VPP 出售给电网的收益; λ'_t 为 t 时刻出售给电网的响应价格; 集合 I 为所有用户的集合; $P_{c,i,t}$ 为第 i 个用户 t 时刻的响应功率; $C_{fm-vpp,t}$ 为 VPP 在 t 时刻购买各用户功率的成本; $C_{wd-sche,t}$ 为风电发电偏差所受的电网考核成本; λ_t 为 t 时刻从各用户中收购的功率价格。

此时存在约束条件

$$P_{c,t} = \sum_{i \in I} P_{c,i,t} \quad (20)$$

即电网向 VPP 购买的调峰能力与 VPP 从各用户收购的温控负荷调峰能力之和应当保持一致。

另外每个用户提供的调峰能力应各自满足公式(16)的约束, 即每个用户的可用调峰能力不超过温控负荷虚拟机组功率上下限。

由于 $C_{fm-vpp,t}$ 为非线性的项, 令 $W_L = C_{fm-vpp,t}$ 并对 W_L 进行线性化。

设立集合 p_{l_1,i,t,s_1} 和集合 p_{l_2,i,t,s_2} , 其中

$$p_{l_1,i,t,s_1} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s_1 \in S_1 \quad (21)$$

$$p_{l_2,i,t,s_2} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s_2 \in S_2 \quad (22)$$

分别有以下关系

$$\sum_{s_1 \in S_1} p_{l_1,i,t,s_1} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{s_2 \in S_2} p_{l_2,i,t,s_2} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (24)$$

集合 p_{l_1,i,t,s_1} 与集合 p_{l_2,i,t,s_2} 之间的关系为

$\forall i \in I, \forall t \in T$ 时

$$\begin{cases} p_{l_1,i,t,1} \leq p_{l_2,i,t,1} \\ p_{l_1,i,t,s_2} \leq p_{l_2,i,t,s_2-1} + p_{l_2,i,t,s_2} \quad 2 \leq s_2 \leq s_{2,0} \\ p_{l_1,i,t,s_1+1} \leq p_{l_2,i,t,s_1} \end{cases} \quad (25)$$

由此, 可将 λ_t 线性化为

$$\lambda_t = \sum_{s_2 \in S_2} p_{l_1,i,t,s_2} \lambda_{i,t,s_2}^0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (26)$$

由于对于每个 λ_t , 各用户都充分响应价格信号并向 VPP 提供对应价格的调峰功率, 可知

$$P_{c,i,t} = \sum_{s_2 \in S_2} p_{l_1,i,t,s_2} P_{c,i,t,s_2}^0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (27)$$

因此对 $W_{L,i,t}$ 的线性化结果为

$$W_{L,i,t} = \sum_{s_2 \in S_2} p_{l_1,i,t,s_2} W_{L,i,t,s_2}^0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (28)$$

$W_{L,t}$ 的线性化结果为

$$W_{L,t} = \sum_{i \in I} W_{L,i,t} \quad \forall t \in T \quad (29)$$

3 算例分析

3.1 初始参数设置

选择一个典型夏季日作为温控负荷的室外运行温度环境^[15], 假设人体在空调房间中为静坐状态, 取人体新陈代谢率 M 为 1 met。室内模拟的人体体重 65 kg; 身高 175 cm。室内相对湿度 60%; 风速 0.1 m/s; 室内空气温度和平均辐射温度相同; 室外相对湿度 65%; 服装热阻设定为 0.61 clo。温控负荷的参数和风电预测曲线来自于文献[14]。为模拟现实场景, 不同温控负荷的 k_1, k_2, l_1, l_2 和 R 等参数存在一定的随机浮动。效用函数的参数来自文献[15]。

3.2 烬模型在人体热舒适状态分析的应用

以室外气温为 28 °C 时为例, 分别计算此时人体熵损失速率与目前常用于评估热舒适状态的 PMV 指标。PMV 指标越接近 0, 人体越感到舒适^[16]。PMV 指标的计算方式如式(30)所示

$$P_{\text{MV}} = 0.303e^{(-0.036M+0.0275)} \{ M - W - 0.305[5.733 - 0.007(M-W) - P_a] - 0.42(M-W-58.15) - 1.73 \times 10^{-2}M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{\text{cl}}(T_{\text{el}}^4 - T_r^4) - f_{\text{cl}}h_{\text{c,cl}}(T_{\text{el}} - T_a) \} \quad (30)$$

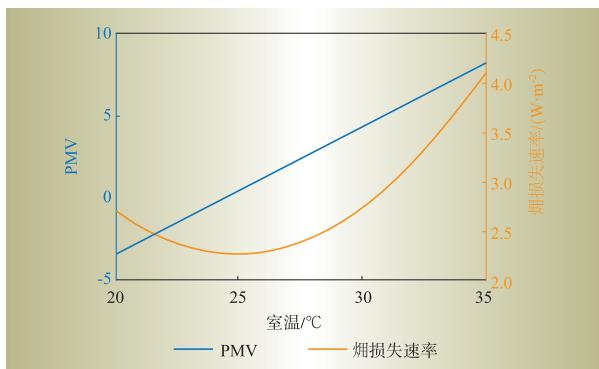


图1 PMV指标与人体熵模型的比较

Fig. 1 Comparison of PMV and human exergy model

图1表现了在同一室外温度下人体熵损失速率与PMV的关系,可以发现在熵损失速率最小时,对应人体最舒适温度为25.1 °C,这与PMV指出的最舒适温度接近,但由于人体熵分析同时考虑了室内、室外及人体自身的热参数,因此在更为准确的同时,具有更好的普适性,易于推广到不同环境,描绘人体热舒适状态。

3.3 基于虚拟电厂的温控负荷调度策略分析

考虑虚拟电厂管辖200个可调节温控负荷的用户。温控负荷设定温度,即人体最舒适温度 T_{set} 由熵分析求得。根据相关文献对住宅用户热舒适区的计算^[17],当 ΔT_1 、 ΔT_2 分别为-1.5 °C、+1.5 °C时,可在保证人体处于热舒适状态的同时,最大化温控负荷的调节区间。

图2表现了不同温控负荷用户的不同竞价曲

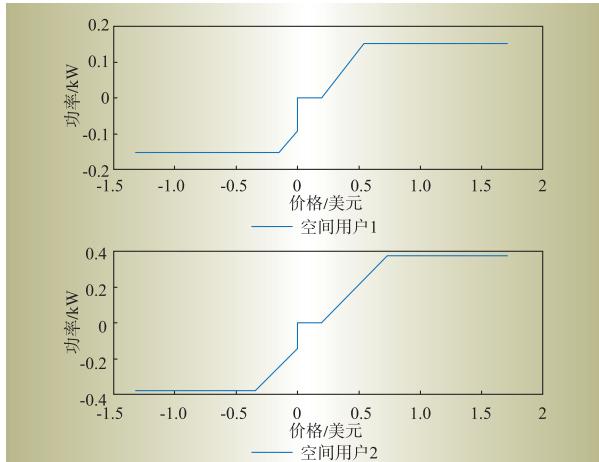


图2 用户竞价曲线
Fig. 2 Bidding curve of users

线。由于温控负荷参数不同,因此每个用户的最大或最小输出功率都不相同,且具有不同的边际收益。用户响应虚拟电厂调节的意愿随虚拟电厂收购调节能力的价格升高,最终达到可调节能力的上限。当需求响应价格绝对值过大时,用户提供的调节能力被温控负荷调节潜力上下限所限制。

图3表示虚拟电厂对温控负荷的调峰潜力收购价格。该价格在每小时内保持固定。当调峰潜力收购价格为正时,温控负荷虚拟机组将增加功耗;潜力收购价格为负时相反。图4表现了温控负荷参与调控前后的调峰效果比较,可见VPP调控下属用户侧温控负荷资源后可有效调节功率偏差。

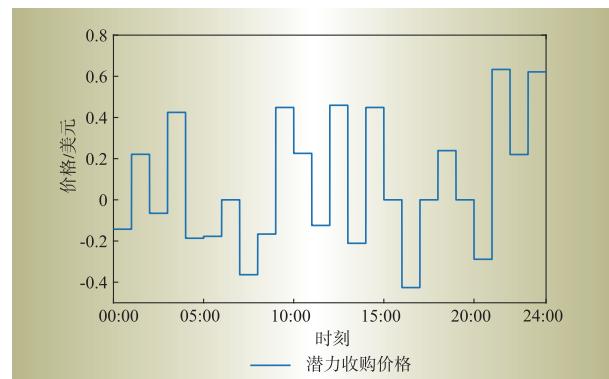


图3 温控负荷潜力收购价格
Fig. 3 Potential purchase price of TCLs

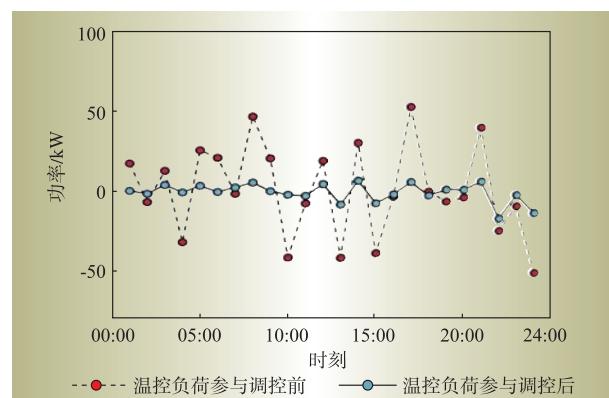


图4 温控负荷参与调控前后调峰效果的比较
Fig. 4 Comparison of peak regulation effect of TCLs before and after regulation

4 结语

本文提出了一种基于熵分析的温控负荷潜力评估与竞价策略研究。算例分析表明,人体熵分析与PMV指标所确定的人体最舒适温度接近,但人体熵分析方法具有更好的普适性,且在室外气温变化下人体最舒适温度不会发生较大改变,有利于精确分析温控负荷潜力。温控负荷响应虚拟电厂调节的

意愿随虚拟电厂收购调节能力的价格升高,最终达到可调节能力的上限。基于竞价曲线的调控方式不会影响用户舒适度,且可以在有效保护温控负荷设备数据及用能行为隐私的前提下,参与虚拟电厂的需求响应调度。算例验证了基于熵分析的温控负荷调控潜力评估与基于虚拟电厂与竞价曲线的温控负荷优化调度方法的有效性。**D**

参考文献:

- [1] 王飞,李美颐,张旭东,等.需求响应资源潜力评估方法、应用及展望[J].电力系统自动化,2023,47(21):173–191.
WANG Fei, LI Meiyi, ZHANG Xudong, et al. Assessment Methods for demand response resource potential and their application and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (21): 173–191.
- [2] 王健,郑峻峰,黄际元,等.虚拟电厂关键技术综述与发展展望[J].供用电,2023,40(12):43–54,86.
WANG Jian, ZHENG Junfeng, HUANG Jiyan, et al. Key technology and development prospects of virtual power plants [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40 (12): 43–54, 86.
- [3] 徐峰,何宇俊,李建标,等.考虑需求响应的虚拟电厂商业机制研究综述[J].电力需求侧管理,2019,21 (3):2–6.
XU Feng, HE Yujun, LI Jianbiao, et al. Review of research on commercial mechanism for virtual power plant considering demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21 (3): 2–6.
- [4] 王永杰,赵蕾,范可新,等.新人体分析模型在建筑热舒适评价中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2019, 51(10):186–193.
WANG Yongjie, ZHAO Lei, FAN Kexin, et al. Concept and development of virtual power plant [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10):186–193.
- [5] 张勇,李宁,丁昊晖,等.基于用户差异化热舒适度的空调负荷聚合调度策略[J].电力工程技术,2023,42 (4):133–140.
ZHANG Yong, LI Ning, DING Haohui, et al. Air-conditioning load aggregation scheduling strategy based on user differentiated thermal comfort [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42 (4): 133–140.
- [6] 金旭,张远实,李明,等.考虑热舒适度的居民空调负荷调控潜力差异化评估[J].电力系统自动化,2024, 48(1):50–58.
JIN Xu, ZHANG Yuanshi, LI Ming, et al. Differentiation evaluation of regulation potential for residential air conditioning load considering thermal comfort [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48 (1): 50–58.
- [7] 宋晓吉.基于自适应模型的非人工冷热源居住建筑热环境评价研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
SONG Xiaoji. Study on requirements for thermal environment in free- running residential building based on adaptive model [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [8] MASANORI S, TOSHIYA I, HI-DEO A. Development of human-body exergy balance model for a better understanding of thermal comfort in the built environment [J]. International Journal of Exergy 11 2012:493–507.
- [9] GUO H S, LUO Y Q, FORREST MEGGERS, et al. Human body exergy consumption models' evaluation and their sensitivities towards different environmental conditions [J]. Energy, 2019, 183: 1 075–1 088.
- [10] 庄重,孔月萍,杨世海,等.基于改进AUGMECON的配网虚拟电厂多目标优化运行[J].电力需求侧管理,2024,26(1):42–47.
ZHUANG Zhong, KONG Yueping, YANG Shihai, et al. Multi-objective optimization operation of distribution network virtual power plant based on AUGMECON2 [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(1): 42–47.
- [11] 王宣元,高洪超,张浩,等.面向新型电力系统的灵活资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J].电力需求侧管理,2022,24(1):73–80.
WANG Xuanyuan, GAO Hongchao, ZHANG Hao, et al. Analysis and enlightenment of aggregation technology application scenarios of flexible distributed energy resources oriented to new power system [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1): 73–80.
- [12] 陈心宜,胡秦然,石庆鑫,等.新型电力系统居民分布式资源管理综述[J/OL].电力系统自动化:1–19 [2024–02–27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231227.1126.002.html>.
CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system [J/OL]. Automation of Electric Power Systems:1–19[2024–02–27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231227.1126.002.html>.
- [13] 原冠秀,高岩,王宏杰.基于效用分类的智能电网实时电价算法[J].上海理工大学学报,2020,42(1):29–35.
YUAN Guanxiu, GAO Yan, WANG Hongjie. A real-time pricing algorithm based on utility classification in a smart grid [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 42(1): 29–35.
- [14] SONG M, GAO C W, YAN H G, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (6): 5 522–5 534.
- [15] VERONIKA FÖLDVÁRY LIČINA, TOBY CHEUNG, HUI ZHANG, et al. Development of the ashrae global thermal comfort database ii [J]. Building and Environment, 2018, 142:502–512.
- [16] XU Y, SINGH C. Operation strategies of the load aggregator with electric energy storage[C]// 2012 IEEE International Conference on Power System Technology(POWER-CON), October 30- November 2, 2012 Auckland, New Zealand.
- [17] 金振星.不同气候区居民热适应行为及热舒适区研究[D].重庆:重庆大学,2011.
JIN Zhenxing. Thermal adaptation behavior and thermal comfort zone for Chinese resident [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

作者简介:

孟诗语(1994),女,安徽淮北人,硕士,研究员,研究方向为电力市场、碳市场等;

史文博(1994),女,吉林吉林人,硕士,工程师,研究方向为微电网、虚拟电厂、电价机制等;

邹风华(1995),男,江苏苏州人,硕士,助理工程师,研究方向为综合能源系统运行优化。

(责任编辑 王 慈)