

吕延哲,衡俊良,高洪涛,等.基于弹性限负荷及非线性定价的柔性负荷控制策略研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):488-494.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240202
LYU Yanzhe,HENG Junliang,GAO Hongtao,et al.Study on flexible load control strategy based on elastic load limit and nonlinear pricing[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):488-494.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240202

基于弹性限负荷及非线性定价的柔性负荷 控制策略研究

吕延哲,衡俊良,高洪涛,王向宇

(国网辽宁省电力有限公司 铁岭供电公司,辽宁 铁岭 112000)

摘要:针对柔性负荷在电价低谷时段集中需求响应不佳等问题,采用弹性限负荷算法实现对柔性负荷的混合控制。提出一种用非线性价格参数来调节负荷需求曲线高次项的控制方法,通过惩罚负荷柔性来提高负荷需求曲线的平滑度,抑制低价时段的电采暖需求高峰,降低负荷响应的控制偏差,并对东北某地社区 1 032 户居民的电采暖开展负荷响应控制实验,验证方法的有效性。研究结果表明:柔性负荷控制方法可有效抑制电价低谷时段的负荷需求高峰。与采用线性参数进行负荷控制的传统方法相比,柔性负荷控制方法能使负荷需求曲线平滑度提升 56.3 个百分点,使负荷响应控制偏差降低 16.8 个百分点。弹性限负荷区间随负荷需求的增加而变宽,在电价分界时段,为保证负荷响应速度,弹性限负荷区间会急剧缩窄。研究结论为提高电力供应的稳定性提供参考。

关键词: 柔性负荷; 电采暖; 非线性定价; 弹性限负荷; 人工免疫; BP 神经网络

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0488-07

Study on flexible load control strategy based on elastic load limit and nonlinear pricing

LYU Yanzhe, HENG Junliang, GAO Hongtao, WANG Xiangyu

(Tieling Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Company Limited,
Tieling 112000, China)

Abstract: To address issues such as poor response to concentrated demand from flexible loads during low-price periods, a flexible load limit algorithm is adopted to achieve hybrid control of flexible loads. A control method using nonlinear price parameters to adjust the higher-order terms of the load demand curve is proposed. By penalizing load flexibility, the smoothness of the load demand curve is improved, suppressing peak demand for electric heating during low-price periods and reducing control deviations in load response. A load response control experiment was conducted on electric heating for 1 032 households in a community in Northeast China to verify the effectiveness of the method. The research results show that the flexible load control method can effectively suppress peak load demand during low-price periods. Compared with traditional methods using hard and linear parameters for load control, the flexible load control method can improve the smoothness of the load demand curve by 56.3 percentage points and reduce the control deviation in load response by 16.8 percentage points. The elastic load limit interval widens as load demand increases, and during price demarcation periods, it narrows sharply to ensure the speed of load response. The research findings provide a reference for improving the stability of power supply.

Keywords: flexible load; electric heating; nonlinear pricing; elastic load limit; artificial immunity; BP neural network

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-08-22 接受日期: 2024-09-11 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司管理科技项目 (2023ZX-12)

作者简介: 吕延哲 (1986-), 男, 辽宁 铁岭人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电气工程及自动化方面的研究。E-mail: 2366216530@qq.com

0 引言

价格法通过分时段电价实现移峰填谷^[1-2],是当前使用较广泛的柔性负荷控制方法。然而,在寒冷地区,冬季电采暖负荷在低价时段易发生不连续集中响应,形成新的用电高峰,威胁当地电力供应的稳定性。有学者提出通过限制采暖设备功率水平来调节负荷,但这种对供暖直接干预的方式难以被用户接受,导致负荷期望和负荷响应偏差过大^[3-4]。特别是当限后功率无法满足用户的最低能量需求时,这种方法将彻底失效。文献[5]提出通过惩罚负荷柔性来提高负荷需求曲线的平滑度,但由于对负荷阶次和惩罚系数的设定依赖经验,普适性和控制精度均不理想。目前对寒冷地区电采暖柔性负荷控制方法的研究仍处于探索阶段。

除需考虑有效的限负荷方法外,柔性负荷控制精度的另一关键问题是提高中央控制器(central controller, CC)和用户侧能源管理系统(energy management system, EMS)之间的协调性^[6-7]。传统控制架构中,中央控制器常采用集中式决策模式直接干预用户侧负荷控制调控,但因限制了用户自主性而难以被接受^[4]。鉴于此,有学者提出通过弹性区间来实现用户对负荷控制的参与,但用户群体数量庞大且需求各异,该方法负荷控制精度较差且用户友好性不理想^[8-10]。目前,提高控制方法的协调性已成为柔性负荷控制乃至用户友好型网络领域的研究热点。人工免疫算法作为在能源网络安全、电力系统规划以及电力设备故障诊断中广泛应用的智能方法,能较好地实现多目标优化与聚类分析^[11-14]。该方法可基于用户需求优化负荷阶次与惩罚系数,通过非线性定价抑制低价时段柔性负荷需求峰值。BP神经网络则为弹性区间核心参数的确定提供多元、非线性拟合工具,不仅可实现用户及中央控制器对柔性负荷的混合控制,还可在移峰填谷的同时提高负荷响应的控制精度^[15-17]。

为提高负荷响应的控制精度,本文提出一种基于非线性定价的柔性负荷控制方法,以人工免疫算法来惩罚负荷柔性,提高功率需求曲线的平滑度。结合BP神经网络优化弹性区间,实现对柔性负荷的混合控制。以东北某地区的电采暖改造项目为例,针对1 032户居民的电采暖负荷开展响应控制实验,验证方法的有效性,以期为进一步降低负荷响应控制偏差,以及有效抑制低价时段

柔性负荷高峰提供参考。

1 问题描述

CC侧各用户电采暖负荷的价格响应子问题^[5]为

$$\begin{cases} \min_{\{p_t\}} \sum_t \lambda_t p_t & 0 \leq p_t \leq \omega p_t^{\max} \\ E_t^{dr} = \eta p_t t + E_{t-1} - E_t \\ E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} & \forall t \in T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: p_t 为采暖周期 t 内的有功需求,即总电采暖负荷,可表征限功率结果,kW; λ_t 为有功电价,元/(kW·h); $p_t^{\max}$ 为周期 t 内的最大加热功率,kW; E_t 为用户采暖的能量需求,可表征能量平衡以及由用户舒适度决定的能耗范围,kW·h; E_t^{dr} 为周期 t 结束时的总能量,kW·h; η_t 为电采暖装置的能量转换效率; $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别为最低和最高能耗,kW·h; T 为总用电周期,h。

为避免负荷在低价时段发生不连续集中响应,在式(1)中引入限负荷系数 ω , ω 越大,负荷限制越大^[4-5]。但这种措施较强硬,常因用户抗拒引发需求反弹,导致CC侧 p_t 曲线波动较大^[5,8,18-21]。特别是当采暖设备满负荷运行时, ω 将失去效力^[5],在柔性负荷控制方面存在较大局限性。

此外,在已有研究中,CC一般会为用户 A 设定柔性负荷期望 $P_A(t)$ ^[8]。用户 A 需依据 $P_A(t)$ 自觉约束用电行为来平衡总负荷需求与发电设备的总出力,满足

$$\int_0^T P_A(t) dt = E_A, \quad (2)$$

式中, E_A 为各用户在周期 t 内的能量需求,kW·h。

在实际应用中,用户数量多且需求各异,常导致柔性负荷期望被忽视甚至拒绝,造成控制信号偏离轨迹,产生较大偏差。为此,本文采用非线性价格信号 α 替代式(1)中的线性负荷系数 ω ,并在用户侧用弹性区间 P_A^+ 和 P_A^- 替代式(2)中的负荷需求轨迹 P_A ,以提高需求曲线平滑度以及负荷响应的控制精度。

2 控制策略

2.1 基于人工免疫算法的柔性负荷惩罚方法

根据倾斜定价原理,价格边界随着消费量的变化而调整^[5,21]。利用非线性价格信号 α 对 P_t 的高次项进行约束,则式(1)中功率控制的目标函数可改写为

$$\min_{\{p_t\}} \sum_t \lambda_t p_t + \alpha P_t^n \quad 0 \leq p_t \leq \omega p_t^{\max}, \quad (3)$$

式中, n 为高次项的阶数。

与式 (1) 中 ω 对 P_i 的直接限制不同, 式 (3) 中, α 只作用于 P_i 的高次项, 由于高次项代表 P_i 的柔性, 则式 (3) 在限制高负荷需求时表现出更软的特性, 且不影响式 (1) 中原目标函数的线性, 只在电价低谷时期出现新高峰时产生效用。由于目标函数变为高次, 式 (3) 具有更多的可行解, 使 CC 制定的总负荷期望 P_i 曲线更为平滑。引入用户不满意度函数 $\beta(\alpha, n)$ 来量化 α 和 n , 即

$$\beta(\alpha, n) = \frac{1}{T_i K_1 K_2} \sum_{j=1}^{K_1} \sum_{i=1}^{K_2} t_{n,i,j}, \quad (4)$$

式中: K_1 为测试次数; K_2 为用户数量; $t_{n,i,j}$ 为阶次为 n 时, 用户 i 第 j 次测试的时长, h ; T_i 为单次测试时长, h 。

如果以总负荷需求曲线的平滑度 $\sum_{i \in T} (p_i - \bar{p}_i)^2$ 及函数值 $\beta(\alpha, n)$ 最小为目标函数, 则可通过求解式 (5) 的优化问题来确定合适的 α 和 n 。

$$\min_{\{\alpha, n\}} k_1 (p_i - \bar{p}_i)^2 + k_2 \beta(\alpha, n), \quad (5)$$

式中: k_1 和 k_2 为权重; $\bar{p}_i$ 为 P_i 的平均值。

与式 (1) 相比, 由于式 (5) 引入了函数 $\beta(\alpha, n)$, 参数 α 、 n 更易被用户接受, 在负荷响应控制中具有更好的协调性。一般情况下, 柔性负荷的数量越多, 负荷柔性越大, α 越大, 则对柔性负荷的控制问题即可转换为对惩罚参数 α 、 n 的寻优问题。基于人工免疫算法获得上述参数的全局最优解, 计算式^[13]为

$$\left\{ \begin{aligned} A_v &= 1 / \left\{ \sum_i \sum_j w_i d_{ij} Z_{ij} - \right. \\ &\quad \left. C \sum_i \min \left[\left(\sum_j Z_{ij} \right) - 1, 0 \right] \right\}, \quad (6) \\ S_{v,s} &= k_{v,s} / L \\ C_v &= \sum_{j \in N_s} S_{v,s} / N_s \\ P_s &= \alpha_s A_v / \sum A_v + (1 - \alpha_s) C_v / \sum C_v \end{aligned} \right.$$

式中: A_v 为抗原抗体亲和度; $S_{v,s}$ 为抗体亲和度; C_v 为体浓度; P_s 为期望繁殖率; N_s 为全部可行解的序列集合; M_j 为搜索结果与期望值的差值小于 $S_{v,s}$ 的集合; W_i 为需求量; d_{ij} 为长度; Z_{ij} 为二进制逻辑变量; $k_{v,s}$ 为抗体 v,s 的总亲和度; L 为抗体长度; α_s 为常熟变量。

根据负荷控制方法计算流程, 进行每个时间点 t 的 α 、 n 寻优, 见图 1。

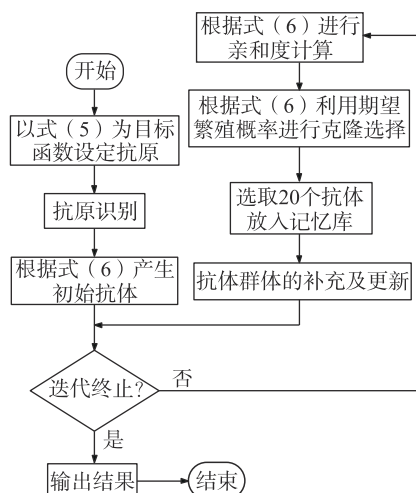


图 1 负荷控制方法计算流程

Fig.1 calculation process of load control method

2.2 基于 BP 神经网络的弹性限负荷方法

式 (2) 中, 由用户侧能源管理系统确定的负荷期望 $P_A(t)$ 因干涉采暖行为而难以被用户接受。因此, 采用式 (7) 中的期望区间 $[P_A^-(t), P_A^+(t)]$ 来实现弹性限负荷。 P_A^- 、 P_A^+ 可被设计为由用户参与制定的可调参数控制的弹性区间下限和上限, 实现用户与 CC 一同参与负荷调节的柔性负荷混合控制^[8]。

$$\left\{ \begin{aligned} \int_0^T P_A^+(t) dt &= E_A + \Delta E_A \\ \int_0^T P_A^-(t) dt &= E_A - \Delta E_A \\ \Delta E_A &= \eta_A T E_A \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中, η_A 为用户 A 在时间 t 内能允许偏离总消耗能量 E_A 的比例。

根据式 (7), 可获得固定带宽的弹性区间。综合考虑分时电价对用户操作的影响以及用户用电行为的随机性和差异性, 基于 BP 神经网络, 进一步设定可变带宽的弹性区间, 以提高负荷响应控制的协调性和用户友好性。设 $\eta_A^{\min}$ 为任何时间 t 内允许能量偏离比例的最小值, 系数函数为 $f(t)$, 其计算式为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{P_A(t) - P_A^-}{m_A - P_A^-} \eta_A + \frac{m_A - P_A(t)}{m_A - P_A^-} \eta_A^{\min} & \left(m_A \neq P_A^-, \frac{dP_A(t)}{dt} > 0 \right) \\ \frac{P_A^+ - P_A(t)}{P_A^+ - m_A} \eta_A + \frac{P_A(t) - m_A}{P_A^+ - m_A} \eta_A^{\min} & \left(m_A \neq P_A^+, \frac{dP_A(t)}{dt} \leq 0 \right) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: m_A 为 $P_A(t)$ 在总用电时间 T 内的均值。

式(8)的工作原理是在保证 E_A 与控制目标基本一致的前提下尽量扩大 ΔE_A , 来给用户提供更的可操作区间, 弹性区间的上、下限分别为 $P_A^+(t)$ 、 $P_A^-(t)$, 满足

$$\begin{cases} P_A^+(t) = P_A(t) + f(t) \frac{E_A}{\Delta t} \\ P_A^-(t) = P_A(t) - f(t) \frac{E_A}{\Delta t} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Δt 为用电时间间隔, 取 1 h。

由式(9)可知, 弹性区间主要由 EMS 的控制信号 $P_A(t)$ 及用户接受度变量 η_A 和 $\eta_A^{\min}$ 决定。其中, $P_A(t)$ 根据式(2)中基于价格的理想负荷需求计算方法来设计, η_A 和 $\eta_A^{\min}$ 取决于用户决策。将影响用户的 4 个关键变量 (用户收入 u_A 、用电时刻 t 、室外温度 T_{out} 和室内温度 T_{in}) 作为网络输入, 将 η_A 和 $\eta_A^{\min}$ 作为网络输出, 以 tansig 为传递函数、trainlm 为训练函数, 搭建 BP 神经网络。通过记录、统计网内用户行为来量化用户对负荷响应控制的影响, 实现对用户端弹性区间参数的预测。

柔性负荷控制方法的计算流程见图 2。式(3)中基于非线性定价的柔性控制信号 $P(t)$ 会平均分配至 EMS, 并由 EMS 制定各用户的控制信号 $P_A(t)$ 。基于式(7)~式(9)的弹性限负荷方法将 $P_A(t)$ 转化为用户端的期望负荷信号 $P_A^-(t)$ 和 $P_A^+(t)$, 用户在区间内自主决定用电消耗, 实现中心控制器及用户的混合控制。这种控制方法更具用户友好性, 可提高负荷响应控制的协调性, 降低负荷控制偏差。基于此, CC 的目标函数为

$$\min(\Delta P_A^-(t) + \Delta P_A^+(t)), \quad (10)$$

式中, ΔP_A^+ 和 ΔP_A^- 分别为弹性区间的上、下偏差, 表示从时间 t 到 $t+1$ 的负荷变化。

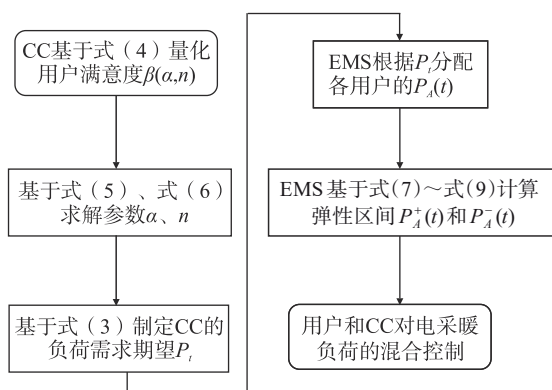


图2 柔性负荷控制方法计算流程

Fig.2 calculation process of flexible load control method

式(10)可限制用户的负荷变化要求, 使总需求 $P(t)$ 曲线尽可能平滑。定义 EMS 的目标函数为

$$\min \sum_t \lambda_t E_t + x \sum_t \lambda_t \sum_A (\Delta E_A^- + \Delta E_A^+), \quad (11)$$

式中: θ 为全部用户合集; x 为负荷柔性惩罚系数, x 越大, 对负荷变化的抑制越明显, 本文 x 取 1。

式(11)综合考虑了用电成本项 $\lambda_t E_t$ 及负荷柔性项 $(\Delta E_A^- + \Delta E_A^+)$, 可较好地配合式(3)完成负荷控制工作。

3 案例分析

东北某地社区有 1 032 户居民参加冬季电采暖改造项目, 均统一安装了直热式电采暖设备。改造后采用 CC 进行功率平衡调节, 绘制负荷总期望曲线, 同时 EMS 监测和管理各用户的用电行为。用户电采暖改造项目示意图图 3。

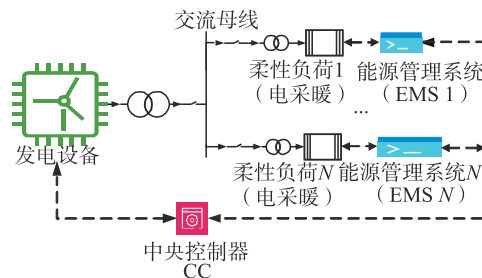


图3 用户电采暖改造项目示意

Fig.3 schematic of user electric heating renovation project

供暖设备负荷控制范围统计结果见图 4。由图 4 可知, 采暖设备可调负荷范围为 0~28 kW。

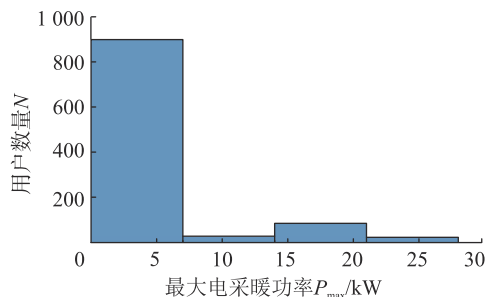


图4 供暖设备负荷控制范围统计结果

Fig.4 statistics of the load control range for heating equipment

目前该地区分时电价时段划分为: 高峰时段 7: 30—10: 30、16: 00—21: 00, 低谷时段 11: 30—12: 30、22: 00—次日 5: 00, 其余为平价时段。将电价 λ_t 进行正则化处理, 即将分时电价用相较于平价时段电价的百分比来表示, 高峰和低谷时段电价 λ_t 在平价基础上分别上下浮动 50%。24 h 分时电价见图 5。

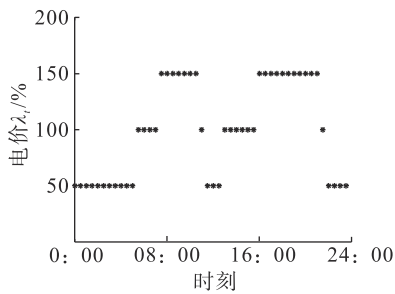


图5 24 h分时电价

Fig.5 24 h TOU price

基于24 h分时电价策略,当设备使用率为100%时,分别监测不考虑电价因素的电采暖情况(即用户电采暖需求)和考虑24 h分时电价策略的柔性负荷,绘制负荷曲线,见图6。

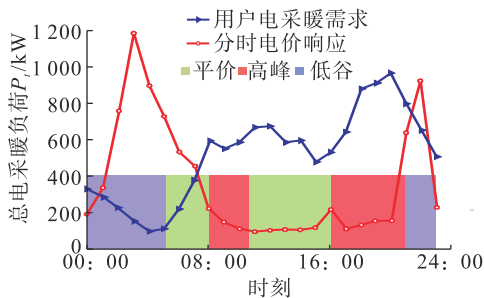


图6 居民采暖需求与分时电价响应

Fig.6 response of residents' heating demand and TOU price

由图6可知,用户电采暖用电需求与时段特性关联紧密,即在用电高峰时段特别是尖峰时段有较大的负荷响应;在平价时段,负荷响应相对平缓;在低谷时段,负荷响应较小。在电价政策的影响下,原本在尖峰时段的需求峰值延迟至高峰时段且持续时间明显缩短,在低谷时段发生负荷集中响应现象,形成新的需求高峰,给CC功率平衡控制带来巨大压力。为解决这一问题,根据式(3)~式(6),基于人工免疫算法计算柔性负荷控制参数 α 、 n (抗原抗体亲合度 A_v 满足要求时停止寻优,此时,人工免疫算法的输出结果即为 t 时

刻的最优参数解, α 和 n)。将 α 、 n 与文献[5]提供的 ω 作为控制信号,对用户电采暖负荷进行限制。基于人工免疫算法的控制参数寻优过程见图7,负荷响应曲线 $P(\alpha,n,t)$ 和 $P(\omega,t)$ 见图8。

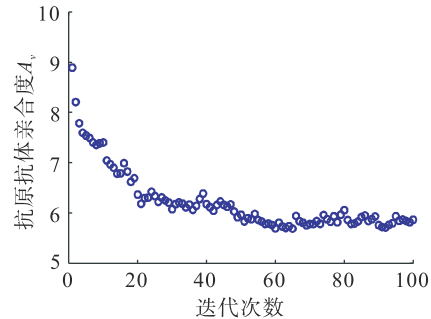
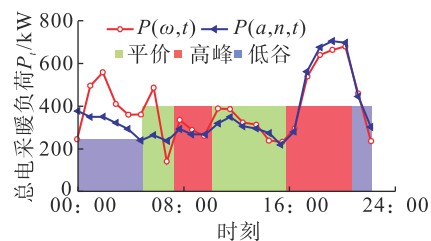


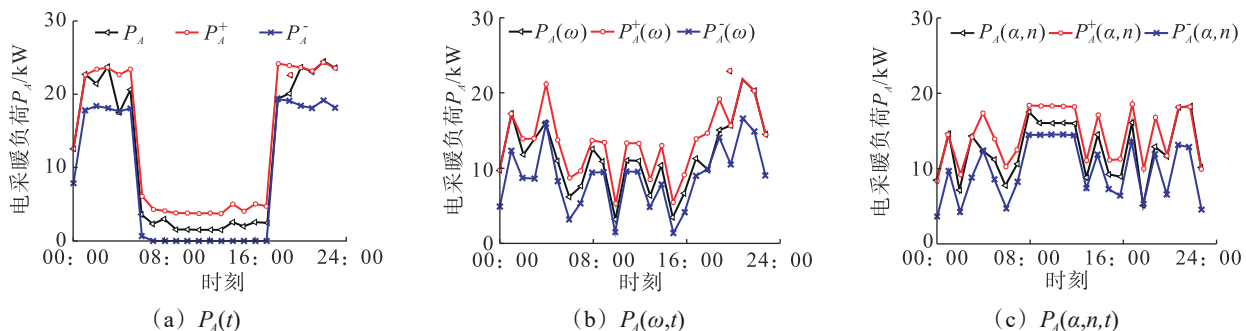
图7 基于人工免疫算法的控制参数寻优过程

Fig.7 optimization process of control parameters by artificial immunity

图8 $P(\alpha,n,t)$ 和 $P(\omega,t)$ 曲线Fig.8 $P(\alpha,n,t)$ and $P(\omega,t)$ curves

对比图6和图8可知,传统分时电价策略 $P(\omega,t)$ 和柔性负荷惩罚方法 $P(\alpha,n,t)$ 均能有效抑制电价响应导致的低谷时段需求峰值,且高峰时段的电采暖需求可有效分配至低谷和平价时段,但 $P(\alpha,n,t)$ 曲线比 $P(\omega,t)$ 曲线更平滑。峰峰值 $\Delta P(\omega,t)$ 为320 kW, $\Delta P(\alpha,n,t)$ 为140 kW,下降了56.3个百分点。

根据式(7)~式(11)提供的弹性限负荷方法以及柔性负荷控制方法计算流程,对各用户侧EMS设置最佳需求轨迹,以负荷最大的用户A为例,分别得到 $P_A(t)$ 、 $P_A(\omega,t)$ 和 $P_A(\alpha,n,t)$ 的24 h弹性区间波形,见图9。

图9 $P_A(t)$ 、 $P_A(\omega,t)$ 和 $P_A(\alpha,n,t)$ 24 h弹性区间波形Fig.9 24 h elastic interval waveform of $P_A(t)$, $P_A(\omega,t)$ and $P_A(\alpha,n,t)$

由图9(a)可知,弹性区间随负荷期望 $P_d(t)$ 的调整而发生变化,以此来适应不同电价时段的控制需求。若仅考虑电价因素,在低价时段22:00—次日5:00,用户A有较高的负荷需求,此时,弹性区间相对较宽,用户有较大的操作区间来参与负荷控制。在负荷需求较低的6:00—16:00,弹性区间相对较窄,用户向CC释放权限。在价格分界时段,为抑制价格扰动下的负荷波动,弹性区间会急剧缩小,以确保用户和CC之间的协调性。由图9(b)可知,在 ω 的限制下,价格低谷的尖峰需求被移至其他时段,弹性区间随需求水平的变化而相应调整。为惩罚负荷柔性,保证CC侧总需求 $P(t)$ 曲线平滑,需求变化越频繁,弹性区间越紧缩。对比图9(b)和图9(c)可知,随着需求曲线趋于平缓,弹性区间也趋于均匀,用户对限负荷的接受度越高。通过以上分析可知,无论采用哪种控制方法,除价格分界时段,弹性限负荷方法均能确保用户参与负荷控制,可提高用户对负荷期望的接受度。

为评估各方法的负荷响应控制偏差,将 $P(\omega, t)$ 和 $P(\alpha, n, t)$ 作为功率需求曲线,采用文献[8]中的单轨迹法控制用户侧负荷响应,分别计算传统分时电价策略 $P(\omega, t)$ 和柔性负荷惩罚方法 $P(\alpha, n, t)$ 中,负荷期望与负荷响应的相对偏差百分比 $\Delta P(t)$,并利用本文提出的基于BP神经网络的弹性限负荷法,以 $[P(\alpha, n, t), P^*(\alpha, n, t)]$ 作为功率需求曲线,计算其负荷响应控制偏差。负荷控制结果对比见表1。

表1 负荷控制结果对比

Tab.1 comparison of load control results

控制方法	$\Delta P(t)/\%$
$P(\omega, t)$	26.5
$P(\alpha, n, t)$	17.7
$[P(\alpha, n, t), P^*(\alpha, n, t)]$	9.7

由表1可知,采用文献[5]提供的参数 ω 进行限负荷会产生26.5%的控制偏差,采用参数 α 、 n 进行限负荷可使 $\Delta P(t)$ 降至17.7%。与文献[8]提供的单轨迹法相比,采用本文提出的弹性限负荷法可使 $\Delta P(t)$ 进一步降至9.7%。通过以上分析可知,与传统 $P(\omega, t)$ 方法相比,弹性限负荷法可使负荷响应控制偏差 $\Delta P(t)$ 下降16.8个百分点,这是由于弹性限负荷的用户友好性更优,能显著提升CC和用户的协调性。

4 结论

针对柔性负荷在低价时段集中需求响应不佳等问题,提出一种基于非线性定价和弹性限负荷的控制方法,并以东北某地电采暖改造项目为例,对1032户居民的电采暖开展负荷响应控制,得出如下结论。

(1) 本文提出的基于非线性定价和弹性限负荷控制方法,可有效抑制低价时段的尖峰需求。与传统分时电价策略相比,功率曲线平滑度提升56.3个百分点,负荷响应控制偏差下降16.8个百分点。

(2) 惩罚负荷柔性可获取更平滑的负荷期望曲线,且弹性限负荷可实现用户和CC对负荷的混合控制,但惩罚参数和限负荷系数的确定依赖用户用电行为的样本特征。

(3) 采用人工免疫方法和BP神经网络进行相关参数的确定,可有效实现参数量化。柔性限负荷可使负荷响应曲线更平滑,有效抑制电价低谷时段的需求峰值。

(4) 弹性限负荷区间与分时电价有关。在电价分界时段,弹性限负荷区间非常狭窄,弹性限负荷区间随着用户负荷需求的增加而变宽。可在用户需求与负荷期望之间建立平衡点,以提升用户对CC指令的接受度,降低负荷响应控制偏差。

参考文献(References):

- [1] 陈刚,那广宇,王琛淇,等.考虑综合需求响应和储能的双阶段虚拟电厂交易策略[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(1):64-71.
CHEN Gang, NA Guangyu, WANG Chenqi, et al. Two-stage virtual power plant trading strategy considering comprehensive demand response and energy storage[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(1): 64-71.
- [2] 李香龙,赵乐,王瀚秋,等.基于柔性负荷和建筑多能源系统的电网峰谷调节算法[J].沈阳工业大学学报,2023,45(4):361-365.
LI Xianglong, ZHAO Le, WANG Hanqiu, et al. Power grid peak and valley adjustment algorithm based on flexible load and building multi-energy system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2023, 45(4): 361-365.
- [3] 姜婷玉,李亚平,鞠平,等.柔性负荷控制及模型研究综述[J].智慧电力,2020,48(10):1-8.
JIANG Tingyu, LI Yaping, JU Ping, et al. Overview of modeling method for flexible load and its control[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 1-8.
- [4] ULLAH K, ULLAH Z, ASLAM S, et al. Wind farms and flexible

- loads contribution in automatic generation control: an extensive review and simulation[J]. *Energies*, 2023, 16(14): 5498.
- [5] PAPADASKALOPOULOS D, STRBAC G. Nonlinear and randomized pricing for distributed management of flexible loads[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 1137-1146.
- [6] ÇİMEN H, BAZMOHAMMADI N, LASHAB A, et al. An online energy management system for AC/DC residential microgrids supported by non-intrusive load monitoring[J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118136.
- [7] SUO L, LIU G C. Research on source-load coordinated dispatching of flexible DC distribution network based on big data[J]. *Journal of High Speed Networks*, 2022, 28: 231-241.
- [8] SAAVEDRA A, NEGRETE-PINCETIC M, RODRÍGUEZ R, et al. Flexible load management using flexibility bands[J]. *Applied Energy*, 2022, 317: 119077.
- [9] LYU Z L, LAI Y F, YANG X, et al. Cooperative game consistency optimal strategy of multi-microgrid system considering flexible load[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2022, 44(3): 7378-7399.
- [10] JANGID B, MATHURIA P, GUPTA V A. A flexible load aggregation framework for optimal distribution system operation[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2023, 35: 101117.
- [11] 徐植, 陈俊, 张智勇, 等. 新型电力系统中基于人工免疫和隐马尔可夫的网络安全态势评估[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2023(5): 182-192.
- XU Zhi, CHEN Jun, ZHANG Zhiyong, et al. Network security assessment based on hidden Markov and artificial immunization in new power systems[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2023(5): 182-192.
- [12] 董文娜, 王增平, 赵乔, 等. 基于人工免疫聚类算法的配电网故障状态相似性分析方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(6): 60-66.
- DONG Wenna, WANG Zengping, ZHAO Qiao, et al. Fault state similarity analysis method for distribution network based on artificial immune clustering algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(6): 60-66.
- [13] DUDEK G. Artificial immune system with local feature selection for short-term load forecasting[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2017, 21(1): 116-130.
- [14] 董宸, 吴强, 黄河, 等. 基于免疫算法的电网拓扑结构识别[J]. *发电技术*, 2023, 44(1): 125-135.
- DONG Chen, WU Qiang, HUANG He, et al. Power grid topology identification based on immune algorithm[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(1): 125-135.
- [15] 李国庆, 刘钊, 金国彬, 等. 基于随机分布式嵌入框架及BP神经网络的超短期电力负荷预测[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 437-445.
- LI Guoqing, LIU Zhao, JIN Guobin, et al. Ultra short-term power load forecasting based on randomly distributive embedded framework and BP neural network[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 437-445.
- [16] YAN Y B, SHAO Y, WANG D, et al. Prediction of the whole society electricity consumption in northeast China based on the BP neural network and Markov[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024, 12: 1326525.
- [17] ZHAN W F, ZHANG L P, FENG X J, et al. An equivalent processing method for integrated circuit electrical parameter data using BP neural networks[J]. *Microelectronics Journal*, 2023, 139: 105912.
- [18] SHIN G S, KIM H Y, MAHSEREDJIAN J, et al. Smart vehicle-to-grid operation of power system based on EV user behavior[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2024, 19(5): 2941-2952.
- [19] LIU K, SUN S B, WU G H, et al. Power data sampling model based on multi-layer sensing and prediction[J]. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2023, 24(6): 807-815.
- [20] DATE J, CANDANEDO J A, ATHIENITIS A K, et al. Development of reduced order thermal dynamic models for building load flexibility of an electrically-heated high temperature thermal storage device[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2020, 26(7): 956-974.
- [21] 吴志强, 高岩, 王波. “负载-效用”两级均衡下智能电网实时电价定价策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(17): 65-73.
- WU Zhiqiang, GAO Yan, WANG Bo. Real-time pricing strategy for the smart grid under “load-utility” two-level balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(17): 65-73.