

引用格式:汤波,林静涛,杨鹏,等.基于交互式实时电价机制的用电优化研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):105-114.

Citation: TANG Bo, LIN Jingtao, YANG Peng, et al. Research on power consumption optimization based on interactive real-time price mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 105-114.

基于交互式实时电价机制的用电优化研究

汤波¹, 林静涛¹, 杨鹏¹, 余光正¹, 钟宇军², 陆丹丹²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000)

摘要:为满足对新能源消纳和电力供需平衡的要求,以新能源为主体的新型电力系统需要最大程度发挥负荷侧调节能力。针对当前用户侧调节能力未充分挖掘的问题,提出一种基于交互式实时电价机制的用电负荷优化方法。首先,基于区域电网内新能源总和建立广义标杆新能源出力曲线,提出一种基于改进时间序列形态相似度的用电负荷与广义新能源标杆曲线的源荷相似度计算方法,并构建负荷与电价的关联模型;进而提出基于源荷相似度的交互式实时电价机制引导用户参与响应;最后,构建多目标优化模型进行负荷优化。仿真结果表明,所提交互式实时电价机制的负荷优化效果更好,能够有效提高用户参与需求侧响应的积极性,相似度变化值能够准确衡量新能源与负荷曲线的相似度水平,使净负荷功率趋于平稳,促进新能源的高质量消纳。

关键词:交互式实时电价机制;负荷优化;需求响应;源荷相似度;调节能力

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.010 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0105-10

Research on power consumption optimization based on interactive real-time price mechanism

TANG Bo¹, LIN Jingtao¹, YANG Peng¹, YU Guangzheng¹, ZHONG Yujun¹, LU Dandan¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan 316000, China)

Abstract: To meet the requirements of accommodating new energy sources and balancing power supply and demand, a new type of power system dominated by new energy sources needs to maximize the load-side regulation capability. To address the problem of insufficient exploitation of load-side regulation capability, this study proposes an electricity load optimization method based on an interactive real-time electricity price mechanism. Firstly, a generalized benchmark new energy output curve is established based on the total new energy within a regional power grid. Secondly, a source-load similarity calculation method based on improved time series morphological similarity is proposed to calculate the similarity between electricity load and the generalized new energy benchmark curve, and a model for the correlation between load and electricity price is constructed. Then, an interactive real-time electricity price mechanism based on source-load similarity is proposed to guide user participation in response. Finally, a multi-objective optimization model is constructed for load optimization. Simulation results show that the proposed interactive real-time electricity price mechanism achieves better load optimization results, effectively increases user participation in demand-side response, and accurately measures the similarity between new energy and load curves. This approach stabilizes the net load power and promotes the high-quality integration of new energy.

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(52207121); 上海市科委项目(22DZ1206802)

通信作者: 汤波(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事配电网规划、电力系统数据分析等方面的研究; E-mail: tangbo@shiep.edu.cn

Key words: interactive real-time price mechanism; load optimization; demand response; source load similarity; regulatory capacity

在可持续发展的严峻压力下,电力行业作为碳排放的主体,进一步加快构建适应高比例可再生能源发展的新型电力系统战略^[1],为“碳达峰、碳中和”目标的实现奠定坚实基础^[2-3]。在这种形势下,新能源装机占比增加,负荷侧各类新型负荷不断接入,源荷两侧的不确定性均不断增加,电网调节能力捉襟见肘。单纯依靠传统机组难以满足系统调节需求,储能等灵活调节资源投资巨大,通过需求响应调节用户负荷特性,对于弥补新型电力系统调节资源的不足^[4-5],实现电力系统供需平衡以及绿色发展具有重要意义^[6-9]。

需求响应可分为价格型需求响应和激励型需求响应。价格型需求响应是用户参与需求响应的主要方式。文献[10-11]对价格型需求响应进行了详细介绍,指出相较于分时电价和尖峰电价,实时电价在缓解容量短缺和供需紧张方面独具优势,同时具备更强的灵活性和经济性,是电力系统的理想定价机制。文献[12]提出了一种基于信用机制的实时电价方案,以经济性和满意度为目标,在居民用户中进一步证明了该方案的可行性,然而该电价模型是单向的,未能考虑到用户在响应过程中的贡献;文献[13]提出了一种考虑折扣因子的价格型需求响应机制,以售电商利益最大为目标,引导用户调节用电行为并根据负荷变化对电价进行修正。仿真实验表明能够有效提升售电商的收益以及用户的效益,并且具有较强的鲁棒性;文献[14]提出一个以聚合商利益最优为目标的实时电价模型,将节省的用电成本作为奖励返还给用户,算例结果显示该模型能够在不牺牲电力消费者利益的情况下显著降低能源成本。

上述文献对价格型需求响应进行了充分研究,但从用户角度考虑电价机制的实用性和可行性的研究较少,并且缺乏对供需双方相互作用的考虑,导致电价方案的吸引力和灵活性不足。这样的电价机制削弱了用户参与需求响应的意愿和效果。

目前,对各类电价机制参与用电优化已有一定研究。文献[15]建立了考虑需求响应的多时间尺度滚动优化模型,实现了对灵活资源的合理配置,促进了风电消纳。文献[16]基于主从博弈原理,提

出了一种改进的分时电价策略,旨在减小功率波动,同时提高供需双方的经济性。文献[17]提出了一种考虑满意度的户用型微网日前优化调度模型,为用户提供更合理的用电方案,降低上级电网的供电压力。文献[18]充分考虑了可中断负荷的负荷特性,通过需求响应缓解用电高峰时的电力供需平衡问题,减少源侧冗余安装容量,降低高峰负荷和运营成本。上述研究主要以促进新能源消纳、提升经济性等为目标,但未明确设置用户的优化目标,缺乏对用户的引导,使得优化效果不够理想。随着新型电力系统的建设,新能源比例大幅增加,电网侧海量灵活资源处于沉睡状态,对电力调度和功率平衡带来了新的挑战,需要精确掌握负荷曲线的变化情况,有效引导用户调节负荷特性接近新能源出力,实现对新能源的高质量消纳并缓解供需平衡压力。

因此,针对上述问题,提出了基于交互式实时电价用电优化方法。综合考虑用电成本和满意度,构建了负荷优化模型。采用源荷相似度改变量来评价负荷优化过程中负荷特性的变化,进而优化电价,提高用户的积极性和认同感,并通过仿真案例验证了所提出电价机制的可行性。

1 交互式实时电价机制用电优化体系

电价机制的合理性直接关系到用户改变用电行为的积极性。在实际电网中,用户的用电负荷由其自身活动所决定,不同种类负荷的调节能力和方式存在巨大差异。交互式实时电价机制的核心在于对负荷进行细分,在有效参与的前提下以“参与越多收益越大”的思路充分调动各类用户的积极性。为促进新能源消纳,电价机制设计以新能源出力为出发点,计算区域内新能源出力总和曲线与负荷功率曲线间的相似度。由于单一用户的调节能力与意愿有限,通过调动大规模用户在不影响正常生活的前提下改变用电习惯,可以累积成数量可观的调节能力。

每个用户在调节过程中的用电改变不同,对应的电价奖惩也应有所区分。通过引入源荷相似度反映用电行为变化的价值,可以激发用户参与负荷优化的积极性。基于源荷相似度的交互式实时电价用电优化体系如图1所示。

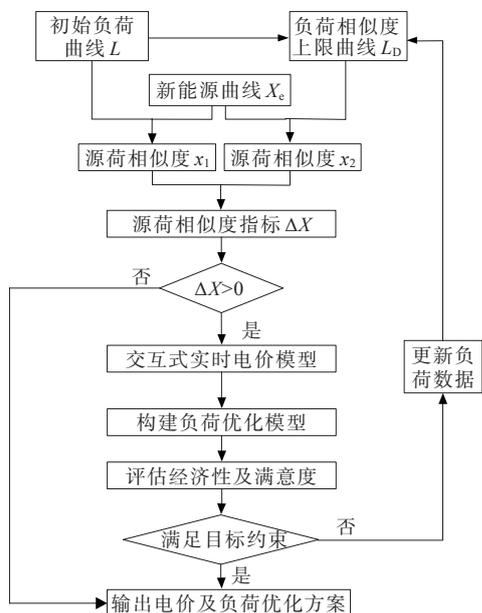


图1 基于交互式实时电价机制的用电优化研究框架

Figure 1 Research framework for electricity optimization based on interactive real-time price mechanism

2 负荷精细化响应建模

2.1 负荷特性分析

根据负荷特性可分为可调节负荷、可平移负荷、可转移负荷、基础负荷,其表达式为

$$L(t) = L_{\text{adjust}}(t) + L_{\text{shift}}(t) + L_{\text{tran}}(t) + L_{\text{stable}}(t) \quad (1)$$

式中, $L(t)$ 为 t 时刻总负荷功率; $L_{\text{adjust}}(t)$ 为 t 时刻可调节负荷总功率; $L_{\text{shift}}(t)$ 为 t 时刻可平移负荷总功率; $L_{\text{tran}}(t)$ 为 t 时刻可转移负荷总功率; $L_{\text{stable}}(t)$ 为 t 时刻基础负荷总功率。

2.1.1 可调节负荷

可调节负荷可以对负荷功率进行调节。可调节负荷的总功率由负荷总数、运行状态、调节前功率以及调节后功率共同决定,其表达式为

$$L_{\text{adjust}}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \cdot [P_{\text{initial}}^{\text{adjust},i}(t) - P_{\text{adjust},i}(t)] \quad (2)$$

式中, n 为可调节负荷的总数; $\alpha_i(t)$ 为可调节负荷的运行状态, 0 为不参与调节, 1 为参与调节; $P_{\text{initial}}^{\text{adjust},i}(t)$ 为可调节负荷 i 在 t 时刻的初始功率; $P_{\text{adjust},i}(t)$ 为可调节负荷 i 在 t 时刻的调节后功率。

2.1.2 可平移负荷

可平移负荷能够在允许的范围内, 整体平移用电时段, 假设可平移负荷平移前用电时段为 $[t_1, t_2]$, 平移后的起始时刻表示为 t_a , 则平移后用电时段可

表述为 $[t_a, t_a + t_2 - t_1]$, 表达式如下:

$$L_{\text{shift}}(t) = L_{\text{shift, initial}}(t) + L_{\text{shift, in}}(t) - L_{\text{shift, out}}(t) \quad (3)$$

$$L_{\text{shift, in}}(t) = \sum_{\substack{a=1 \\ a \neq t}}^{24} x_{a,t} P_{\text{shift}}(a) \quad (4)$$

$$L_{\text{shift, out}}(t) = \sum_{\substack{a=1 \\ a \neq t}}^{24} x_{t,a} P_{\text{shift}}(a) \quad (5)$$

式中, $L_{\text{shift, initial}}(t)$ 为 t 时刻可平移负荷的初始功率; $L_{\text{shift, in}}(t)$ 为其他时刻平移至 t 时刻的可平移负荷功率; $L_{\text{shift, out}}(t)$ 为 t 时刻平移至其他时刻的可平移负荷功率; $x_{a,t}$ 为 a 时刻平移至 t 时刻的可平移负荷数目; $x_{t,a}$ 为 t 时刻平移至 a 时刻可平移负荷的数目; $P_{\text{shift}}(t)$ 为 t 时刻某可平移负荷功率。

2.1.3 可转移负荷

可转移负荷能在保证总功率不变情况下, 合理调节各时段功率, 表达式为

$$L_{\text{tran}}(t) = L_{\text{tran, initial}}(t) + L_{\text{tran, in}}(t) - L_{\text{tran, out}}(t) \quad (6)$$

$$L_{\text{tran, in}}(t) = \sum_{\substack{a=1 \\ a \neq t}}^{24} y_{a,t} P_{\text{tran}}(a) \quad (7)$$

$$L_{\text{tran, out}}(t) = \sum_{\substack{a=1 \\ a \neq t}}^{24} y_{t,a} P_{\text{tran}}(a) \quad (8)$$

式中, $L_{\text{tran, initial}}(t)$ 为 t 时刻可转移负荷的初始功率; $L_{\text{tran, in}}(t)$ 为其他时刻转移至 t 时刻的可转移负荷功率; $L_{\text{tran, out}}(t)$ 为 t 时刻转移至其他时刻的可转移负荷功率; $y_{a,t}$ 为 a 时刻转移至 t 时刻的可转移负荷数目; $y_{t,a}$ 为 t 时刻转移至 a 时刻可转移负荷的数目; $P_{\text{tran}}(t)$ 为 t 时刻某可转移负荷功率。

2.1.4 基础负荷

基础负荷不参与优化, 对使用时间、功率要求严格, 其表达式为

$$L_{\text{stable}}(t) = \sum_{i=1}^n P_{\text{stable},i}(t) \quad (9)$$

式中, n 为 t 时刻基础负荷的总数; $P_{\text{stable},i}$ 为 t 时刻某基础负荷功率。

2.2 用户满意度模型

在相对稳定的电价水平下, 用户将会自主选择满意度最大的用电方式, 若不考虑用户的满意度, 将难以调动用户响应积极性, 假定在初始情况下用户的用电方式满意度最大^[19]。根据负荷特性分别确定对应的满意度模型^[17], 并根据负荷比重确定总满意度模型。满意度计算公式为

$$C = a_{\text{adjust}} C_{\text{adjust}} + a_{\text{shift}} C_{\text{shift}} + a_{\text{tran}} C_{\text{tran}} + a_{\text{stable}} C_{\text{stable}} \quad (10)$$

式中, C 为负荷总满意度; a_{adjust} 为可调节负荷的用电量占比; a_{shift} 为可平移负荷的用电量占比; a_{tran} 为可转移负荷的用电量占比; a_{stable} 为基础负荷用电量占比; C_{adjust} 为可调节负荷满意度; C_{shift} 为可平移负荷满意度; C_{tran} 为可转移负荷满意度; C_{stable} 为基础负荷满意度。

1) 可调节负荷满意度。

$$C_{\text{adjust}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{initial}}^{\text{adjust},i}(t) - |P_{\text{adjust},i}(t)|)}{n \sum_{i=1}^{24} P_{\text{initial}}^{\text{adjust},i}(t)} \quad (11)$$

式中, $|P_{\text{adjust},i}(t)|$ 为可调节负荷 i 在 t 时刻的用电改变量。

2) 可平移负荷满意度。

$$C_{\text{shift}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{t_{\text{shift},i}}{t_{a,i}}\right)}{n} \quad (12)$$

式中, $t_{\text{shift},i}$ 为某个可平移负荷平移时长; $t_{a,i}$ 为某个可平移负荷可平移时长上限。

3) 可转移负荷满意度。

$$C_{\text{tran}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{initial}}^{\text{tran},i}(t) - |P_{\text{tran},i}(t)|)}{n \sum_{i=1}^{24} P_{\text{initial}}^{\text{tran},i}(t)} \quad (13)$$

式中, $|P_{\text{tran},i}(t)|$ 为某个可调节负荷在 t 时刻的转入及转出的功率绝对值; $P_{\text{initial}}^{\text{tran},i}(t)$ 为可转移负荷 i 在 t 时刻的初始功率。

4) 基础负荷满意度。基础负荷满意度不发生变化, 为初始值 1。

$$C_{\text{stable}} = 1 \quad (14)$$

3 基于源荷相似度的交互式实时电价模型

在新型电力系统中需要充分挖掘负荷侧资源的调节潜力, 使负荷曲线尽量接近新能源出力曲线, 从而达到功率平衡的目标。在本节通过改进动态时间弯曲距离来衡量新能源出力总和曲线与负荷功率曲线间的相似度以评估负荷曲线在优化过程中的变化, 同时与电价机制结合引导负荷追踪新能源出力, 实现净负荷功率趋于平稳, 为有效消纳新能源提供保障。

3.1 源荷相似度

动态时间弯曲 (dynamic time warping, DTW)

是一种准确率高、鲁棒性强的时间序列相似性度量方法^[20], 较欧氏距离、余弦相似度等传统度量方法, DTW 可以通过弯曲时间序列的时域对时间序列的数据点进行匹配, 能够得到更好的形态度量效果。已被应用于电力系统的故障检测^[21]、负荷辨识^[22]等研究。

给定 2 条电力负荷曲线 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 构建 $n \times n$ 的距离矩阵 $D_{n \times n}$, 矩阵中的元素 $d(a_i, b_j)$ 表示负荷曲线 A 在 a_i 与负荷曲线 B 在 b_j 处的功率差值, 该差值一般采用欧氏距离计算, 元素计算公式为

$$d(i, j) = \sqrt{(a_i - b_j)^2}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \quad (15)$$

为防止源荷数值差距过大对相似度量产生影响, 本文通过分别将源荷曲线按各自的最大值求取标么值, 从而减小误差。

DTW 的目的在于找到一条从距离矩阵 $D_{n \times n}$ 的起点 $(1, 1)$ 到终点 (n, n) 的最佳路线 $\omega_k = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)$ 且满足边界性、单调性和连续性约束^[21], 使得累积距离 $\text{DTW}(A, B)$ 最小, 即

$$\text{DTW}(A, B) = \min_{s=1}^k d(\omega_s) \quad (16)$$

式中, ω_s 为最优路径元素的位置; $d(\omega_s)$ 为 ω_s 中从 a_i 到 b_j 的距离; k 为路径的长度。

在寻找最优路径的过程中, 需利用动态规划的思想, 构造一个累积距离矩阵 $D(i, j)$, 即

$$D(i, j) = d(i, j) + \min\{D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)\} \quad (17)$$

式中, $D(i, j)$ 为时间序列 A 和 B 的终点分别为 a_i 和 b_j 时的累计距离, 该数值越小越相似。

本文所提的源荷相似度为广义新能源与特定的负荷曲线之间的相似度, 即计算区域内新能源出力总和曲线与特定的负荷功率曲线间的相似度, 如图 2 所示。用户根据电价调整用电计划, 这时源荷曲线的相似程度会发生改变, 使用 ΔX 表征优化前后源荷曲线相似度变化量, 计算公式为

$$\Delta X = \chi_1 - \chi_2 \quad (18)$$

$$\chi_1 = D(X_e^*(t), L_1^*(t)) \quad (19)$$

$$\chi_2 = D(X_e^*(t), L_2^*(t)) \quad (20)$$

式(18)~(20)中, ΔX 为源荷曲线相似度变化值; χ_1 为响应前的源荷曲线相似度; χ_2 为响应后源荷曲线相似度; $X_e^*(t)$ 、 $L_1^*(t)$ 、 $L_2^*(t)$ 分别为 t 时刻新能源出力、初始负荷功率、优化后负荷功率的标么值。

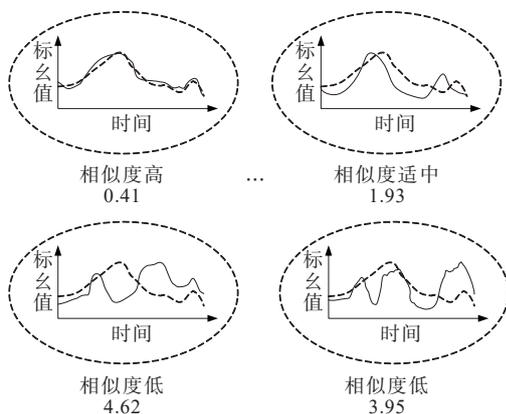


图2 源荷曲线相似程度

Figure 2 Similarity of source load curve

源荷相似度改变量为用户提供了一个明确的目标,它不追求负荷曲线与新能源曲线的绝对相似,更希望通过大量用户的参与发挥出规模化优势,从而实现显著的提升效果。

3.2 交互式实时电价模型

在负荷优化中,交互式实时电价能够根据用户的用电行为变化制定电价奖惩措施。将源荷相似度指标与实时电价结合,建立了基于源荷相似度的交互式实时电价模型,鼓励用户提高与新能源曲线的相似度水平,相似度改变量越大,电价的补偿就越多,保证了公平性同时促进新能源的有效消纳。

交互式实时电价本质上是一种动态的实时电价,它根据负荷优化前后的变化量调整初始电价,电价水平发生变化后用户负荷特性随之变化并再次引起电价的联动,如此循环往复,直到电价达到供需双方的平衡点。

具体表现为在满足相似度变化的前提下,鼓励用户在供需紧张时减少用电,供需充裕时增加用电。供大于需,电价激励为正,用户增加用电需求越多,电价折扣越大,用户享受的电价越低;供小于需时,电价激励为负,用户需减少用电需求从而降低用电成本;供需接近时,不鼓励用户改变用电行为,此时段奖惩措施不明显,用户一般会选择维持原有用电行为。这种评估模式通过制定一个全时段调节目标,引导用户有效消纳新能源,缓解供需压力。同时通过降低用电成本的方式提高用户参与需求响应的认同感和积极性,支撑新型电力系统对需求侧发挥调节能力的迫切要求^[23]。电价模型为

$$P_n(t) = P_{\text{initial}}(t) - \Delta P_n(t) \quad (21)$$

$$\Delta P_n(t) = \left[(X_c^*(t) - L_1^*(t)) \cdot \frac{L_2(t) - L_1(t)}{L_{\text{max}}(t)} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta X_{\text{max}}} \right] P_{\text{initial}}(t) \quad (22)$$

式(21)、(22)中, $P_n(t)$ 为优化后电价; $P_{\text{initial}}(t)$ 为初始电价; $\Delta P_n(t)$ 为用户根据评价指标获得的电价激励; $L_1(t)$ 为初始负荷功率; $L_2(t)$ 为响应后的负荷功率; $L_{\text{max}}(t)$ 为负荷理论最大值; ΔX_{max} 为理论相似度最大变化值。

4 基于交互式实时电价的用电优化模型

随着智能电表、信息技术的发展应用,用户配备的智能电表可以记录上传每小时的用电数据并获取实时的电力市场经济信息,这样用户就有能力参与电力市场运营。在广州南沙已建成具备最先进技术5G+高级量测体系应用示范区,实现了自动抄表、动态实时电价和用户双向互动,为本文所提的电价机制提供现实支撑。

在本节构建基于交互式实时电价的用电优化模型并采用NSGA-II算法求解。

4.1 目标函数

模型的优化目标包括经济性目标和满意度目标。在求解过程中,以尽可能低的用电成本满足日常用电需求,并且保持较高的满意度,在权衡用电成本与满意度变化后做出利益最大化的决策。目标函数为

$$F_{\text{min}} = \frac{\partial \sum_{t=1}^{24} P_n(t) \cdot L_2(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_{\text{initial}}(t) \cdot L_1(t)} + (1 - \partial)(1 - C) \quad (23)$$

式中, F_{min} 为经济性和满意度指数和; ∂ 为权重因子,取0.5。

4.2 约束条件

1) 可调节负荷。可调节负荷运行功率应保持在约束范围内。

$$P_{\text{min},i} \leq P_{\text{adjust},i}(t) \leq P_{\text{max},i} \quad (24)$$

式中, $P_{\text{max},i}$ 、 $P_{\text{min},i}$ 分别为可调节负荷*i*在允许运行状态下的最大和最小功率。

2) 可平移负荷。可平移负荷只能整体平移运行时段。

$$\begin{cases} \lambda_{k,t,a} = 0, |t-a| > d_k \\ \lambda_{k,t,a} > 0, |t-a| \leq d_k \\ \prod_{j=1}^{d_k} \lambda_{k,t+j-1,a+j-1} = 1 \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{k,t,a} = P_{k,t}, |t-a| > d_k \quad (26)$$

式(25)、(26)中, $\lambda_{k,t,a}$ 为某可转移负荷 k 在 a 时刻的运行状态,1为运行,0为不运行; $P_{k,t,a}$ 为某可转移负荷 k 从 t 时刻转移到 a 时刻的功率; d_k 为运行周期。

3) 可转移负荷。可转移负荷需要保证转移的至其他时刻的功率以及未转移功率与初始功率保持一致。

$$P_{\text{tran},k}(t) = \sum_{t'=1}^{24} P_{\text{tran},k,t}(t') \quad (27)$$

式中, $P_{\text{tran},k}(t)$ 为某可转移负荷 k 在 t 时刻的初始功率; $P_{\text{tran},k,t}(t')$ 为某可转移负荷 k 从 t 时刻转移至其他时刻 t' 的功率。

4) 总功率约束。负荷的功率应该小于等于传统机组以及新能源机组的出力。

$$L(t) \leq P_N(t) + P_O(t) \quad (28)$$

式中, $P_N(t)$ 和 $P_O(t)$ 分别为新能源和传统机组出力。

5) 负荷功率约束。

$$L_{\min}(t) \leq L(t) \leq L_{\max}(t) \quad (29)$$

式中, $L_{\max}(t)$ 、 $L_{\min}(t)$ 分别为各时段负荷上、下限。

6) 源荷相似度指标约束。

$$\Delta X_{\min} \leq \Delta X \leq \Delta X_{\max} \quad (30)$$

式中, ΔX_{\max} 、 ΔX_{\min} 分别为源荷曲线相似度变化量上、下限值。不同负荷曲线对应的相似度变化量上限不同,下限为0时,起正向引导作用。

7) 单位用电成本约束。实施需求响应后的用户单位用电成本应该小于优化前的单位用电成本。

$$\frac{\sum_{t=1}^{24} P(t) \cdot L_2(t)}{\sum_{t=1}^{24} L_2(t)} \leq \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{\text{initial}}(t) \cdot L(t)}{\sum_{t=1}^{24} L(t)} \quad (31)$$

5 算例分析

5.1 算例简介

算例采用美国加州大学欧文分校数据库中具有相似负荷特性的200户智能家庭用户的实际用电数据以及电价数据,新能源出力数据参考文献[24]。假设各居民用户电器型号一致,同时根据文献[25-26]确定了负荷构成及电器运行间隔,电器具

体参数及数目如表1所示。

表1 负荷分类及参数
Table 1 Load classification and parameters

类别	电器	单台额定功率/ kW	合计数量/ 台
可调节负荷	空调	2.50	400
	洗碗机	0.15	180
可平移负荷	洗衣机	0.90	200
	烤箱	1.50	160
可转移负荷	热水器	2.50	240
	冰箱	0.20	200
固定负荷	灯具	0.03	800
	电视	0.30	280

5.2 用电优化效果分析

5.2.1 单用户用电优化效果分析

为了验证所提交交互式电价机制的有效性,设计了3个场景进行验证:场景1用户不参与调节,为原始功耗状态;场景2仅通过实时电价价格波动来优化用电计划;场景3利用交互式实时电价方法进行优化。

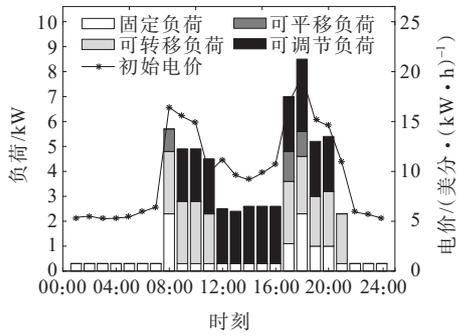
1) 不同电价机制优化效果分析。

各场景负荷功率及电价情况如图3所示。可知,与场景1和场景2相比,场景3用户通过调整各时段用电策略,用户用电成本显著降低。与场景1相比,场景2的成本降低了26.34%,场景3的成本降低了38.01%。因此,证明了本文提出的交互式实时电价机制降低用户的用电成本,验证了该电价机制的经济性。

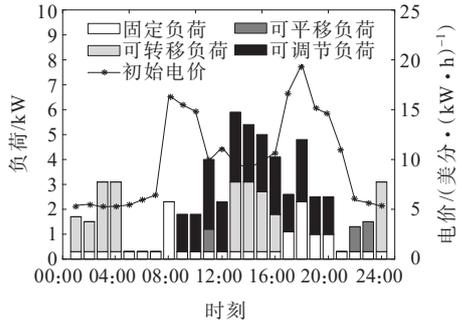
交互式实时电价变化情况如图4所示。可知,在源荷相似度水平提高的前提下,当源荷供需差大于零且用户增加用电,或源荷供需差小于零且用户减少用电时,用户享受较低的电价,用户通过缓解供需平衡压力从而获得较低的电价,通过这样的方式提高了用户参与响应的积极性与优化效果。

在满意度方面,与场景1相比,场景2降低了21.56%,场景3降低27.46%。可以看出本文所提的交互式实时电价机制相比其他方案在未造成过大的满意度损失的同时保持了较高的经济性。

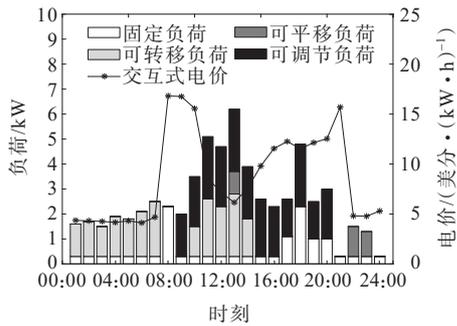
同时可以看出,用户为了节约用电成本,必须牺牲一定的满意度。如果更加注重用电的舒适性,那么他们就不承担更多的电费支出。因此,通过改变目标函数中的权重 θ 值,可以针对不同用户需求制定个性化用电方案。



(a) 场景 1 负荷功率及初始电价



(b) 场景 2 负荷功率及实时电价



(c) 场景 3 负荷功率及交互式实时电价

图 3 各场景负荷功率及电价情况

Figure 3 Load power and electricity price of each case

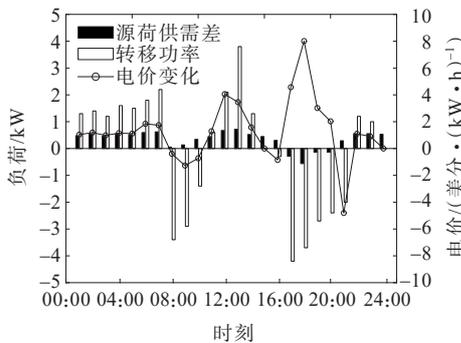


图 4 交互式实时电价变化情况

Figure 4 Interactive real-time electricity price changes

2) 源荷相似度变化值对负荷特性的影响。

各场景源荷曲线对比情况如图 5 所示。可知,较场景 1,场景 2、3 通过调整峰谷时段的负荷组成降低了峰谷差率,但相差不大;与场景 1、场景 2 相比,场景 3 用户的负荷分布更为平缓,负荷波动率分别

从场景 1 的 0.768 7、场景 2 的 0.503 2 下降到场景 3 的 0.424 2。

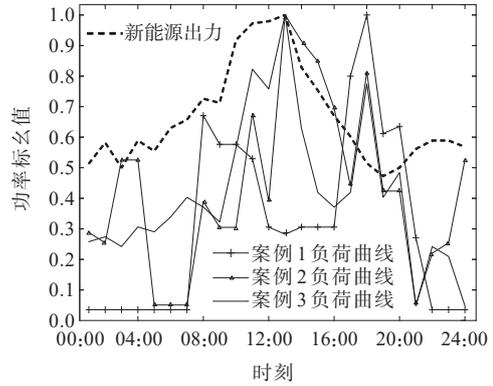


图 5 各场景源荷曲线对比情况

Figure 5 Comparison of source load curves of each case

源荷供需差如图 6 所示。可知,由于选取的是标幺值,18 点附近为负荷峰值,同时新能源出力较低,因此在这个时段源荷标幺差值较大,在该时段附近本文所提电价方案与实时电价方案优化效果的差距并不明显。但从其他时段和整体的曲线来看,场景 2 的曲线波动更大,特别在 01:00—12:00,场景 3 的曲线波动较场景 2 更平缓。同时场景 1、2、3 的源荷曲线相似度分别为 7.97、6.12、4.81,场景 2、3 均达到了提高源荷曲线相似度的目的。在场景 2,用户为了减小电费支出通过调整峰谷用电行为规避实时电价的波动,未能有效引导用户调节用电行为接近新能源出力,仅小幅度改善了相似度,这未能有效调动用户的调节潜力;场景 3 则通过引入相似度指标,引导用户合理调节用电行为,使用户负荷曲线接近新能源出力。综上可以得出本文所提出的基于源荷相似度的交互式实时电价机制可以实现在用户满意度未有明显变化的基础上,最大限度地提高源荷相似度和经济性水平。各场景结果如表 2 所示。

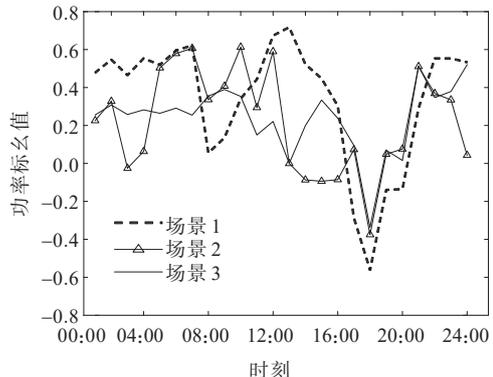


图 6 源荷供需差

Figure 6 Difference between supply and demand curves

表2 各场景的优化指标情况

Table 2 Optimization indicators of each case

场景	满意度	经济性	源荷相似度	负荷波动
1	1.000 0	1.000 0	7.97	0.768 7
2	0.784 4	1.263 4	6.12	0.503 2
3	0.725 4	1.380 1	4.81	0.424 2

5.2.2 总负荷用电优化效果分析

类推至全体用户,设计4个场景进行验证。场景1用户不参与调节;场景2通过分时电价进行用电优化;场景3通过实时电价进行用电优化;场景4通过交互式实时电价进行用电优化。电价曲线如图7所示。

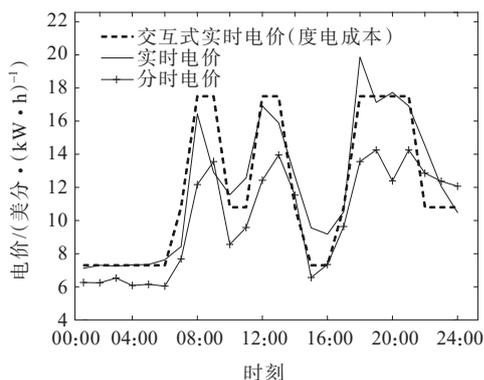


图7 电价曲线

Figure 7 Electricity curves

1) 经济性与满意度分析。

与场景1相比,场景2的经济性提高7.24%,场景3提高14.27%,场景4提高31.85%。在满意度方面,对比场景1,场景2的降低10.19%,场景3降低14.52%,场景4降低23.51%。

综合满意度及经济性变化可看出本文所提的交互式实时电价机制相比于分时和实时电价方案未造成过大的满意度损失同时能获得更大的经济效益,具有一定的优越性。

2) 用电优化效果分析。

各场景负荷曲线对比如图8所示。可知,各种电价机制均能达到降低峰谷差的目的,但交互式实时电价的优化效果更好,较场景2、3各降低了19.59%和26.52%。

在新能源全消纳的基础上,功率缺额部分由上级电网承担,各场景上级电网供电功率如图9所示。可知,优化后各场景均能提高源荷曲线相似度水平,但场景4的负荷曲线更接近新能源出力。由于

18:00附近为负荷高峰且新能源出力较低,在这个时段附近本文方案与分时电价、实时电价优化方案的优势并不明显。但在01:00—17:00,场景4的上级电网供电功率曲线较场景2、3有明显的优化。同时能看出通过引入源荷相似度变化量指标,使供电功率曲线更平稳,由场景2的0.294 6和场景3的0.254 8降低至0.186 9。这表明本文引入的相似度变化量指标能够有效调动用户调节用电曲线接近新能源出力,缓解供需平衡压力。各方案结果如表3所示。

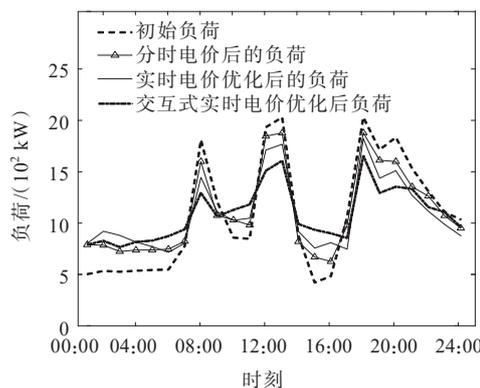


图8 各场景负荷曲线对比

Figure 8 Comparison of source load curves of each case

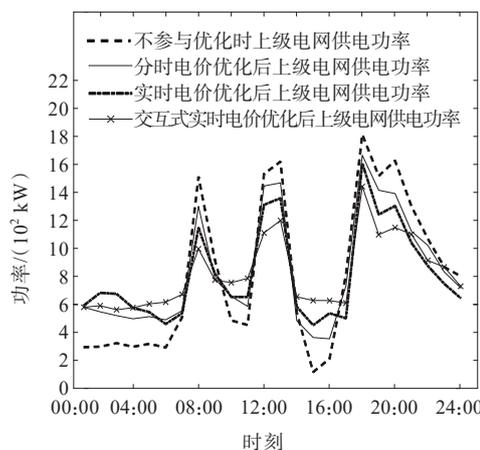


图9 各场景上级电网供电功率

Figure 9 Power supply of superior power grid in each case

表3 各场景的优化指标情况

Table 3 Optimization indicators of each case

场景	满意度	经济性	源荷相似度	负荷波动
1	1.000 0	1.000 0	4.78	0.421 6
2	0.898 1	1.072 4	3.34	0.294 6
3	0.854 8	1.142 7	2.96	0.254 3
4	0.764 9	1.318 5	1.87	0.186 9

6 结语

本文提出一种基于交互式实时电价机制的用电优化方法。通过对负荷精细化建模,建立基于源荷相似度的交互式实时电价模型,随后综合考虑用电成本和满意度构建用电优化模型,对该电价机制的实施效果进行分析。研究结论如下:

1) 基于交互式实时电价机制的用电优化方法可以综合考虑用户满意度与经济性,在兼顾满意度的基础上为用户获取更多经济效益,并在转移峰谷负荷、降低负荷波动等方面优化效果明显。

2) 交互式实时电价机制通过对用户的用电行为进行奖惩,充分调动用户参与用电优化的积极性,有助于充分挖掘负荷侧调节潜力。

3) 在交互式定价机制中引入源荷相似度变化量指标,能够更有效地引导负荷曲线跟随新能源曲线变化,用灵活负荷消纳随机出力,缓解电力供需平衡压力,助力“双碳”目标的实现。

本文提出的基于交互式实时电价机制的用电优化研究以居民负荷作为研究对象,后续可考虑拓展到工商业用户等大型用电主体,同时考虑电动汽车等柔性资源的协同优化展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.
- [2] 刘天蔚,边晓燕,吴珊,等.电力系统碳排放核算综述与展望[J].电力系统保护与控制,2024,52(4):176-187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [3] 范帅,危怡涵,何光宇,等.面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J].电力系统自动化,2022,46(7):1-12.
FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12.
- [4] 刘宇,刘丛笑,赵欣,等.基于维特比算法改进的稳态混合非侵入式负荷识别方法[J].电工技术学报,2023,38(19):5241-5255.
LIU Yu, LIU Conglin, ZHAO Xin, et al. An improved steady-and transient-state mixed non-intrusive load

- monitoring using viterbi algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5241-5255.
- [5] 石梦舒,许小峰,张继广,等.考虑电—氢市场的虚拟电厂两阶段优化策略研究[J].发电技术,2023,43(5):645-655.
SHI Mengshu, XU Xiaofeng, ZHANG Jiguang, et al. A two-stage optimization strategy for virtual power plants considering the electricity-hydrogen market[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(5): 645-655.
- [6] 徐慧慧,田云飞,缪猛,等.计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J].智慧电力,2023,51(8):1-7.
XU Huihui, TIAN Yunfei, MIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 1-7.
- [7] 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.
- [8] 马晓燕,穆云飞,李树荣,等.数据中心综合能源系统优化运行研究综述[J].电力建设,2022,43(11):1-13.
MA Xiaoyan, MU Yunfei, LI Shurong, et al. Review on the optimal operation of integrated energy system in data center[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 1-13.
- [9] 黄福荣,许方园,刘国中,等.计及负荷需求响应的风光储氢系统容量优化配置[J].供用电,2023,40(2):45-51.
HUANG Furong, XU Fangyuan, LIU Guozhong, et al. Optimal capacity allocation of wind solar hydrogen storage system considering load demand response[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(2): 45-51.
- [10] 杨昆达,沈晓东.基于碳交易机制和需求响应的配电网重构研究[J].电网与清洁能源,2023,39(4):47-53.
YANG Kunda, SHEN Xiaodong. Research on distribution network reconfiguration based on carbon trading mechanism and demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 47-53.
- [11] HU M, XIAO J W, CUI S C, et al. Distributed real-time demand response for energy management scheduling in smart grid[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 99: 233-245.
- [12] SUN M, JI J, AMPIMAH B C. How to implement real time pricing in China? A solution based on power credit mechanism[J]. Applied Energy, 2018, 231: 1007-1018.
- [13] 刘迪,孙毅,李彬,等.计及调节弹性差异化的产消群价格型需求响应机制[J].电网技术,2020,44(6):2062-2070.
LIU Di, SUN Yi, LI Bin, et al. Price-based demand response mechanism of production and consumption groups taking into account the difference of adjustment

- elasticity[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2062-2070.
- [14] WANG L L, CHEN J J, PENG K, et al. Reward fairness-based optimal distributed real-time pricing to enable supply-demand matching[J]. Neurocomputing, 2021, 427: 1-12.
- [15] 包宇庆, 王蓓蓓, 李扬, 等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4589-4600.
BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4589-4599.
- [16] 谭玲玲, 汤伟, 楚冬青, 等. 基于主从博弈的电-热-氢综合能源系统优化运行[J/OL]. 中国电力: 1-10[2023-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231212.1614.012.html>.
TAN Lingling, TANG Wei, CHU Dongqing, et al. Optimal operation of electric-thermo-hydrogen integrated energy system based on Master-slave game[J/OL]. Electric Power: 1-10[2023-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231212.1614.012.html>.
- [17] 冯俊宗, 何光层, 代航, 等. “双碳”目标下基于合作博弈的“源-荷”低碳经济调度[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 120-127.
FENG Junzong, HE Guangceng, DAI Hang, et al. The "source-load" low-carbon economic dispatch based on cooperative game under the "double carbon" goal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 120-127.
- [18] WANG J S, ZHANG F, LIU H N, et al. Interruptible load scheduling model based on an improved chicken swarm optimization algorithm[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(2): 232-240.
- [19] 侯佳莹, 林振智, 杨莉, 等. 面向需求侧主动响应的工商业用户电力套餐优化设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 11-19.
HOU Jiaying, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Design of electricity plans for industrial and commercial customers oriented to active demand response on power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 11-19.
- [20] 金伟超, 张旭, 刘晟源, 等. 基于剪枝策略和密度峰值聚类行业的典型负荷曲线辨识[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 20-28.
JIN Weichao, ZHANG Xu, LIU Shenyuan, et al. Identification of typical industrial power load curves based on pruning strategy and density peak clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 20-28.
- [21] 童晓阳, 杨明杰, 张广骁. 基于改进DTW的行波波形相似性的高压直流输电线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3878-3888.
TONG Xiaoyang, YANG Mingjie, ZHANG Guangxiao. A protection scheme for HVDC transmission line based on traveling waveform similarity using improved DTW algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3878-3888.
- [22] 祁兵, 董超, 武昕, 等. 基于DTW算法与稳态电流波形的非侵入式负荷辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 70-76.
QI Bing, DONG Chao, WU Xin, et al. Non-intrusive load identification method based on DTW algorithm and steady-state current waveform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 70-76.
- [23] 范帅, 郑琨琪, 王芬, 等. 基于负荷准线的大规模需求响应[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 19-27.
FAN Shuai, ZHANG Kunqi, WANG Fen, et al. Large-scale demand response based on customer directrix load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 19-27.
- [24] 程杉, 陈诺, 徐建宇, 等. 考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 40-47+57.
CHENG Shan, CHEN Nuo, XU Jianyu, et al. Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 40-47+57.
- [25] WANG H X, FANG H, YU X Y, et al. How real time pricing modifies Chinese households' electricity consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 776-790.
- [26] QAYYUM F A, NAEEM M, KHWAJA A S, et al. Appliance scheduling optimization in smart home networks[J]. IEEE Access, 2015, 3: 2176-2190.