

引用格式:曹婧祎,何永秀,周静涵,等.基于需求侧响应的不同时间尺度动态分时电价时段优化研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):242-250+268.
Citation:CAO Jingyi, HE Yongxiu, ZHOU Jinghan, et al. Time slot optimization of dynamic time-of-use tariffs under different time scales based on demand side response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 242-250+268.

基于需求侧响应的不同时间尺度动态分时 电价时段优化研究

曹婧祎, 何永秀, 周静涵, 何立苇, 龙成凤, 王 一

(华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

摘要:分时电价政策多以固定时段划分方案来执行,但随着供给侧可再生能源的大量接入,需求侧广义负荷的柔性逐渐增强,供需关系呈现出动态变化。因此,为了研究不同时间尺度下的动态分时电价峰谷时段优化问题,本文在综合考虑新能源大比例并网和需求侧响应的基础上,采用改进的模糊C均值(fuzzy-C means, FCM)聚类算法构建峰谷时段划分模型。该模型对不同时间尺度下的净负荷日变化曲线进行聚类分析,以确定最优的时段划分结果。基于辽宁省2021年4月—2022年3月的净负荷数据进行的算例分析结果表明,新能源具有反调峰特性,存在引起净负荷曲线的峰谷差增大的问题。同时,用户对于分时电价政策时段划分的响应具有滞后性和时效性,因此,建议每隔3~4个月动态调整峰谷分时电价政策的时段划分,以更好地挖掘用户需求侧的响应潜力,促进削峰填谷;但如果峰谷时段的调整过于频繁,用户可能会难以及时调整其用电行为进行响应。

关键词:动态分时电价;需求响应;FCM聚类;时段划分

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.025 **中图分类号:**TM73;F426.61 **文章编号:**1673-9140(2024)06-0242-09

Time slot optimization of dynamic time-of-use tariffs under different time scales based on demand side response

CAO Jingyi, HE Yongxiu, ZHOU Jinghan, HE Liwei, LONG Chengfeng, WANG Yi

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The time-of-use tariff policy is mostly implemented with a fixed time slot delineation scheme, but with the large access of renewable energy on the supply side and the enhanced flexibility of broad load on the demand side, the relationship between supply and demand shows dynamic changes. Therefore, in order to study the optimization of peak and valley time slots of dynamic time-of-use tariffs under different time scales, this paper adopts the improved fuzzy-C means (FCM) clustering algorithm to construct peak and valley time slot delineation model based on the comprehensive consideration of the large proportion of renewable energy connected to the networks and the demand-side response. The model determines the optimal time slot delineation results through the clustering analysis of the daily change curves of the net load under different time scales. According to the example analysis of Liaoning Province's net load data from April 2021 to March 2022, renewable energy has anti-peaking characteristics, which causes the peak-to-valley difference of the net load curve to increase, and users' response to the time slot delineation of the time-of-use tariff policy has a lag and timeliness. Therefore, it is recommended to dynamically adjust the time slot delineation of the time-of-peak tariff policy every 3-4 months to better tap the potential of users' demand side response and promote peak shaving and valley filling. However, if the peak and valley time slots are frequently adjusted, it will be difficult for users to adjust their electricity consumption in time to respond.

Key words: dynamic time-of-use tariff; demand response; fuzzy C-means clustering; time slot delineation

收稿日期:2024-01-23;修回日期:2024-04-17

基金项目:国家自然科学基金(71973043)

通信作者:曹婧祎(1998—),女,硕士研究生,主要从事电力技术经济与管理、电力市场、能源经济等研究;E-mail:2517903912@qq.com

分时电价作为电力需求侧管理的重要组成部分,承担着通过价格变动来调节社会用电需求的重要任务^[1-3]。随着中国经济的快速发展、产业结构的调整以及电力供需形势的不断变化,电力用户对峰谷分时电价的响应动态特征日益显著,峰谷时段的划分作为制定峰谷分时电价的基础,直接影响用户的需求响应程度,进而影响分时电价的实施效果^[4-5]。为了进一步激发用户需求响应潜力,国家发展改革委发布了《关于进一步完善分时电价机制的通知》,提出要根据前2年当地电力系统最高负荷的95%及以上用电负荷出现的时段,合理确定尖峰时段;尖峰电价在峰段电价基础上的上浮比例原则上不低于20%,并根据当年电力供需情况、天气变化等因素进行灵活调整,从而建立分时电价动态调整机制。

目前,学者们对峰谷时段划分已有了广泛的研究。最常用的时段划分方法为利用模糊隶属度函数挖掘各时间节点处负荷大小的关系而得到峰谷时段^[6-7],该方法能充分分析负荷数值大小,但忽略了时段划分与用户响应行为及电价制定的关系。为使分时电价能充分发挥削峰填谷的作用,基于长短期记忆神经网络的改进型K-means聚类算法的居民峰谷时段划分模型被提出^[8],但该研究模型计算复杂度高。用户响应度属性指标可以修正仅根据峰谷隶属度得到的峰谷时段划分结果^[9],并且该方法不仅降低了模型计算的复杂度,还兼顾了系统负荷曲线的峰谷形态特征和用户侧的响应需求。但这些模型无法适用于新能源大比例并网的场景,且其聚类方法也无法完全解决初始聚类中心以及数量对其模型的限制。文献[10]提出通过分析新能源发电冗余度确定低谷时段,可充分发挥需求侧响应资源,促进可再生能源消纳,但需要每日日前预测新能源出力并动态调整分时电价时段。文献[11-14]综合考虑光伏出力特点,分析了新能源出力波动的影响,建立了基于净负荷曲线的分时电价优化模型,但随着大规模新能源不断接入电力系统,新能源的波动性和反调峰特性会加大净负荷曲线峰谷差,固定分时电价难以缓解新能源波动带来的系统压力^[15-16]。为了避免固定分时电价时段划分结果局限新能源消纳能力,文献[17-20]通过电动汽车需求侧响应仿真分析,验证考虑实时负荷反馈的动态分时电价可以有效地应对负荷波动,并且对于减小峰谷差和降低用户用电成本的效果更明显。文献[21]提出一种考虑源荷不确定性的分时电价动态修正

机制,但没有考虑其他需求侧广义负荷接入对负荷曲线的影响。综上可知,现有研究在优化峰谷时段划分时,较少考虑不同时间尺度下新能源出力特性以及用户需求响应行为对系统负荷曲线的影响,峰谷时段划分有待进一步优化。

目前,中国大部分地区实施的分时电价是全年分时电价且长期不变,只有少数省份提议征收季节性分时电价^[22]。随着具有随机性、波动性和反调峰特性的新能源大比例并网,电力系统供需平衡特性会发生显著变化^[23-24],依据不同时间尺度负荷数据的时段划分结果可能会产生变化。为了有效发挥峰谷分时电价机制的作用,需要定期监测峰谷分时电价的实施情况,根据新能源出力和用户的需求响应情况进行动态调整。基于此,本文为促进新能源消纳而选取净负荷划分时段,使用改进的模糊C均值(fuzzy-c means, FCM)聚类算法^[25]对基于全年、基于季节和基于月度不同时间尺度下的净负荷日变化曲线计算峰谷时段划分结果,分析不同时间尺度下用户对峰谷电价政策的需求响应行为,进而优化峰谷时段划分,充分挖掘用户需求响应潜力。

1 基于改进型FCM聚类算法峰谷时段划分模型

FCM聚类算法是一种基于函数最优的聚类算法,其本质是基于模糊数学理论对数据集进行聚类划分。相比于基于隶属度函数的方法,FCM聚类算法不需要一个精确的数学统计模型;相比于K-means聚类算法,FCM聚类算法可以得到更加灵活的聚类结果。FCM聚类算法的目标函数为

$$J(U, c_1, c_2, \dots, c_K) = \sum_{i=1}^K J_i = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (1)$$

式中, u_{ij}^m 为第j个净负荷数据观测点对第i个聚类中心在 $[0, 1]$ 的隶属度值 $\sum_{i=1}^K u_{ij} = 1, 0 \leq u_{ij}^m \leq 1, u_{ij}^m$ 构成隶属度矩阵 $U = [u_{ij}^m]_{K \times N}$; c_1, c_2, \dots, c_K 为模糊组1到模糊组K的聚类中心; $d_{ij} = \|c_i - c_j\|$ 为第i个聚类中心与第j个净负荷数据观测点之间的欧几里得距离; m 为一个加权指数, $m \in [1, \infty)$ 。

构造拉格朗日约束条件:

$$\bar{J}(U, c_1, c_2, \dots, c_K, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N u_{ij}^m d_{ij}^2 + \sum_{j=1}^N \lambda_j \left(\sum_{i=1}^K u_{ij} - 1 \right) \quad (2)$$

式中, λ_j 为N个拉格朗日乘子约束式。

对式(2)进行求导得:

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^N u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^N u_{ij}^m} \quad (3)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)}} \quad (4)$$

式(3)为聚类中心计算公式,式(4)为隶属度值计算公式,2个公式都是求取函数极值的必要条件,求取函数极值是一个反复迭代的过程。

传统FCM算法需要依据先验知识并指定聚类类别数,算法的灵活性受到限制。由于模拟退火算法和遗传算法可以互相取长补短,有效克服早熟现象,本文将模拟退火遗传算法用于FCM聚类,对初始聚类中心选取进行优化。本文改进FCM聚类算法,采用二进制编码方式,每条染色体由 c 个聚类中心组成,则对于 m 维的样本,待优化的变量数为 $c \times m$,算法具体步骤如下。

1) 初始化最大聚类数(即时段类别数) c_{\max} 、迭代停止阈值 ϵ 和模糊聚类隶属度基数阈值 ϵ_1 。

2) 初始化控制参数:初始温度 T_0 、冷却系数 q 、终止温度 T_{end} 、种群大小 s 、迭代次数 L 。

3) 确定好自变量后,生成初始化种群,计算种群中各个体的适应度值 f_i ,其中 $i=1,2,\dots,s$,并进行循环计数变量初始化。

4) 对遗传算法中种群的个体进行选择、交叉、变异等操作,产生新的种群,并计算新种群个体的适应度值 f'_i 。若 $f'_i > f_i$,则以新的个体代替旧个体;否则,以概率 $p = \exp\left[\frac{f_i - f'_i}{T}\right]$ 接受新个体,舍弃旧个体。

5) 若 $T_i = T_{\text{end}}$,则算法结束,返回最优解;否则,执行降温函数 $T_{i+1} = qT_i$,转至步骤2)。

6) 令聚类数(时段类别数) $c = c_{\max}$,初始化模糊矩阵 U ,置迭代次数 $b = 0$ 。

7) 获取一天之中 $N(N=24)$ 个观测点,每个点向量 $\mathbf{x}_j = (x_{j1}, x_{j2})$ 是包括时间 x_{j1} 和对应净负荷值 x_{j2} 的二维变量;

8) 构造数据观测矩阵 \mathbf{X} ,矩阵的每一行代表一个数据样本,矩阵的每一列代表数据观测值:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} \\ x_{2,1} & x_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{24,1} & x_{24,2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

9) 设定聚类组数 $K=4$,分别代表峰平谷时段集合,幂指数 $m > 1$ 。初始化隶属度矩阵 U ,保证每个聚类模糊组的隶属度和为1,即保证 $\sum u_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, 24$ 。本文选取 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数构造隶属度矩阵;

10) 利用式(3)计算4个聚类中心 c_1, c_2, c_3, c_4 ;

11) 利用式(4)计算隶属度值形成隶属度矩阵 U ;

12) 根据式(5)计算目标函数,如果第 l 次目标函数值 U^l 与上一次目标函数值 $U^{(l-1)}$ 变化之差小于某一阈值 ϵ ,即满足 $\max\{\|U^l - U^{(l-1)}\|\} \leq \epsilon$,则计算停止,否则转入步骤10)。

改进的FCM算法流程如图1所示。

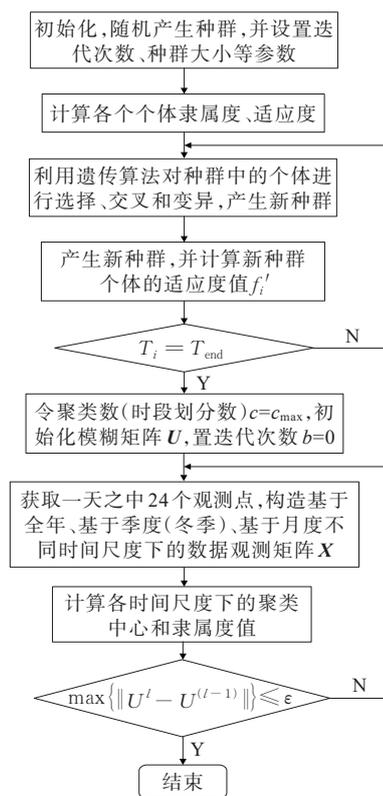


图1 改进的FCM算法流程

Figure 1 Flow of improved FCM algorithm

在区分季节的情况下,以前10%为高负荷、后10%为低负荷作为分析基础对基于全年、基于季节(冬季)和基于月度不同时间尺度下的峰谷时段划分进行分析,充分考虑新能源大比例并网下净负荷

曲线的变化特性。引入性能评估指标精准率(precision)和召回率(recall),其中,精准率代表检测出的异常值的正确率,召回率代表实际为异常的样本被检测出来的比例。在尖峰召回率计算中设定尖峰时段和非尖峰时段,高峰召回率计算中设定高峰时段和非高峰时段,低谷召回率计算中设定低谷时段和非低谷时段。场景即对应任选一天中各时段时长的一种方案,不同的选择方案构成不同的场景。这里引入尖峰精准率、尖峰召回率、高峰精准率、高峰召回率、低谷精准率、低谷召回率指标,计算如下:

$$P_{rush} = P_{rush}^i / (P_{rush}^i + P_{rush}^f) \quad (6)$$

$$R_{rush} = P_{rush}^i / (P_{rush}^i + N_{rush}^f) \quad (7)$$

$$P_{peak} = P_{peak}^i / (P_{peak}^i + P_{peak}^f) \quad (8)$$

$$R_{peak} = P_{peak}^i / (P_{peak}^i + N_{peak}^f) \quad (9)$$

$$P_{trough} = P_{trough}^i / (P_{trough}^i + P_{trough}^f) \quad (10)$$

$$R_{trough} = P_{trough}^i / (P_{trough}^i + N_{trough}^f) \quad (11)$$

式中, P_{rush} 为尖峰精准率; P_{rush}^i 为高负荷落在所设定的尖峰时段的数量; P_{rush}^f 为非高负荷落在所设定的尖峰时段的数量; R_{rush} 为尖峰召回率; N_{rush}^f 为高负荷落在所设定的非尖峰时段的数量; P_{peak} 为高峰精准率; P_{peak}^i 为高负荷落在所设定的高峰时段的数量; P_{peak}^f 为非高负荷落在所设定的高峰时段的数量; R_{peak} 为高峰召回率; N_{peak}^f 为高负荷落在所设定的非高峰时段的数量; P_{trough} 为低谷精准率; P_{trough}^i 为低负荷落在所设定的低谷时段的数量; P_{trough}^f 为非低负荷落在所设定的低谷时段的数量; R_{trough} 为低谷召回率; N_{trough}^f 为低负荷落在所设定的非低谷时段的数量。

通常情况下,一个分类模型的精准率和召回率是此消彼长的,提升精准率的同时往往会降低召回率,反之提升召回率的同时往往会降低精准率。本文引入综合考虑精准率和召回率的指标“ F_1 评分”,该指标是精准率和召回率的调和平均数,一般认为该值越大模型越好。本文引入尖峰 F_1 评分、高峰 F_1 评分、低谷 F_1 评分指标,计算如下:

$$F_{1,rush} = \frac{2 \times P_{rush} \times R_{rush}}{P_{rush} + R_{rush}} \quad (12)$$

$$F_{1,peak} = \frac{2 \times P_{peak} \times R_{peak}}{P_{peak} + R_{peak}} \quad (13)$$

$$F_{1,trough} = \frac{2 \times P_{trough} \times R_{trough}}{P_{trough} + R_{trough}} \quad (14)$$

式(12)~(14)中, $F_{1,rush}$ 为尖峰 F_1 评分; $F_{1,peak}$ 为高峰 F_1 评分; $F_{1,trough}$ 为低谷 F_1 评分。

2 实证分析

2.1 基础数据

图2展示了辽宁省2021年4月—2022年3月用户四季典型日用电负荷(2022年3月18日、2021年7月28日、2021年11月21日和2021年12月24日)。从四季跨度来看,10:00会出现一个次高峰,11:00—17:00相对是一个低谷,但目前的划分是平时段,2021年7月28日、2021年11月21日和2021年12月24日的17:00—19:00出现一个最高峰,2022年3月18日的最高峰出现在21:00。

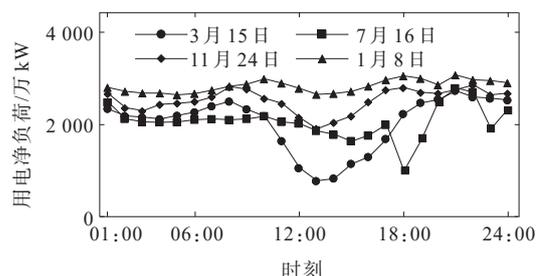


图2 2021年4月—2022年3月四季典型日用电负荷

Figure 2 Typical daily electricity load from April 2021 to March 2022

辽宁省2021年4月—2022年3月四季典型日风电出力情况如图3所示,波动幅度较大,不同月份中相同时刻的出力大小也具有较强的随机性;光伏出力情况如图4所示,由于光伏出力强度与光照强度相关,呈现出夜晚无出力、中午出力最大的趋势。夜晚时间风电、光伏总出力占总调负荷的比例较低,一般在20%左右,中午时段占总调负荷的比例最高,超过80%,即绝大部分负荷由非水可再生能源提供。考虑风电、光伏发电具有不可控性,为促进风电、光伏消纳,同时降低系统调度运行压力,设置分时电价的目的应使可控机组如火电、水电的出力峰谷差降低,以保障有充足的备用及爬坡资源应对风电、光伏出力的不确定性。在扣除风电、光伏后,辽宁省净负荷曲线呈现出“鸭子曲线”的形式,常规机组将面临较大的调度运行压力。

为减少其他因素的影响,本部分选取辽宁省2020年12月24日与2021年1月4日作为典型日,基于这两日用电负荷数据和调整前后的电价数据,采用量价弹性法,对辽宁省大工业用户尖峰、高峰、平段、低谷的电力需求价格弹性系数进行测算,其中未执行尖峰电价政策时期,尖峰时段划分及尖峰电价计算方法与现行政策保持一致,在高峰电价基础

上上浮25%，计算结果如表1所示。

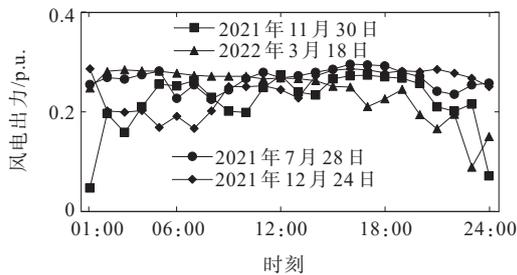


图3 2021年4月—2022年3月四季典型日风电出力

Figure 3 Typical daily wind power output from April 2021 to March 2022

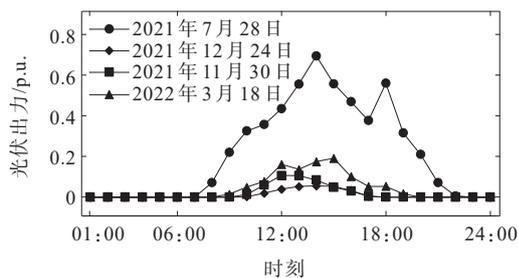


图4 2021年4月—2022年3月四季典型日光伏出力

Figure 4 Typical daily PV output from April 2021 to March 2022

表1 辽宁省大工业用户尖峰、高峰、平段、低谷的电力需求价格弹性系数及电价

Table 1 Price elasticity coefficients and price of power demand of large industrial users at critical peak, peak, flat, and valley hours in Liaoning Province

时段	时刻	典型日电力需求 价格弹性系数	电价/ (元·(kW·h) ⁻¹)	
谷段	01:00	0.012 1	0.296 090	
	00:00	0.045 8	0.296 090	
	03:00	0.036 0	0.296 090	
	04:00	0.031 2	0.296 090	
	05:00	0.016 6	0.296 090	
平段	06:00	0.116 8	0.558 355	
	07:00	0.007 5	0.558 355	
	07:30	-0.092 7	0.558 355	
	08:00	-0.083 3	0.820 620	
	09:00	-0.081 9	0.820 620	
	高峰	10:00	-0.001 9	0.820 620
		11:00	-0.007 1	0.820 620
11:30		-0.007 0	0.820 620	
12:00		-0.041 0	0.558 355	
平段	13:00	-0.034 2	0.558 355	
	14:00	-0.017 3	0.558 355	
	15:00	0.009 3	0.558 355	
	16:00	0.021 4	0.558 355	
	17:00	-0.056 0	0.558 355	

续表 1

时段	时刻	典型日电力需求 价格弹性系数	电价/ (元·(kW·h) ⁻¹)
尖峰	18:00	0.130 3	1.017 319
	19:00	0.093 2	1.017 319
高峰	20:00	0.001 4	0.820 620
	21:00	0.002 8	0.820 620
平段	22:00	0.074 7	0.558 355
谷段	23:00	0.003 4	0.296 090
	24:00	-0.020 0	0.296 090

2.2 不同时间尺度情景设计

为了研究不同时间尺度下动态分时电价峰谷时段优化,本文采用改进的FCM聚类算法峰谷时段划分模型,对基于不同时间尺度下的净负荷日变化曲线进行分析,确定最优时段划分结果。不同时间尺度情景设置包括:基于全年(不区分季节)的峰谷时段划分,基于季节(冬季)数据的峰谷时段划分,以及基于月度数据的峰谷时段划分。

其中,基于季节数据的峰谷时段划分依据辽宁省冬季整点调度用电净负荷数据进行测算。一方面,辽宁省自2021年10月27日施行尖峰电价政策,据此可以分析实施尖峰电价对用户用电负荷的影响;另一方面,通过辽宁四季典型日风光出力曲线可知,冬季典型日风光并网渗透率低,仅在较小程度上引起净负荷曲线峰谷差增大,相较于其他季节的典型日,基于冬季典型日净负荷曲线划分的时段更有效。

在3个情景下均设置时段类别数量为4,包括尖峰、高峰、低谷和平时段。在尖峰精准率和召回率计算中设定尖峰时段(2 h)和非尖峰时段,高峰精准率和召回率计算中设定高峰时段(12 h)和非高峰时段,低谷精准率和召回率计算中设定低谷时段(4 h)和非低谷时段。根据改进的FCM聚类算法计算时段划分结果,并通过 F_1 评分验证方法确认最优时段划分结果。

本文通过研究3种情景下新能源出力及用户需求响应对时段划分结果的影响,分析峰谷时段划分优化方法。

2.3 基于全年(不区分季节)的峰谷时段划分结果

对辽宁省2021年全年净负荷曲线进行分析,高峰 F_1 评分最高的场景对应的时段为04:00—12:00、16:00—18:00和20:00—22:00,划分为峰时段;

同理计算出低谷 F_1 评分最高的场景,对应的时段 12:00—16:00,划分为谷时段;尖峰 F_1 评分的场景对应的时段为 18:00—20:00,划分为尖峰时段;平时段为 22:00—次日 04:00。

对依据净负荷划分的峰谷时段进行整理,与当前辽宁省时段划分政策进行对比,如图 5 所示。

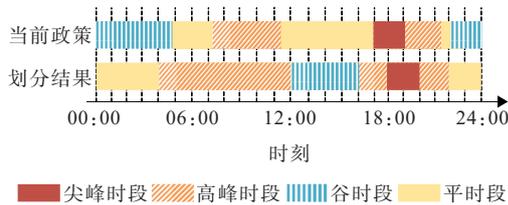


图 5 依据净负荷划分的峰谷时段与当前划分政策对比
Figure 5 Comparison between peak and valley time slots divided by net load and current delineation policy

本文结合辽宁省现行分时电价政策中的时段划分和 2021 年不同场景下净负荷下 F_1 评分,分析得出以下结论。尖峰时段的计算结果相比于现行政策滞后了 1 h,出现在 18:00—20:00;在谷时段的划分上差距较大,现行政策划分为 22:00—次日 5:00,而计算结果为 12:00—16:00,可能是因为辽宁省自 2021 年 10 月 27 日实行尖峰电价政策,进一步促进了辽宁工业用户在非尖峰时段用电的响应行为,导致了低谷时段的变化。基于表 1 所计算的典型日电力需求价格弹性系数,计算出时段划分后大工业用户响应前后对比如图 6、表 2 所示。

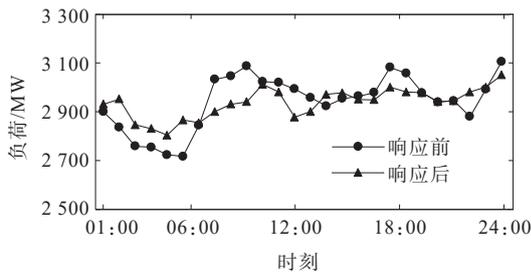


图 6 依据全年时段划分结果的用户响应前后对比
Figure 6 Comparison of users' responses based on annual time slot delineation results before and after adjustment

通过比较可知,当大工业用电峰谷分时电价调整后,电网的最大负荷降低为 3 050 MW,较调整前的最大负荷 3 105 MW 降低了 55 MW;调整后的电网峰谷差为 247 MW,较调整前的峰谷差 389 MW 减少了 142 MW,可见根据全年净负荷数据调整峰谷时段后,减少了最大负荷及峰谷差。

表 2 依据全年时段划分结果的用户响应前后对比

Table 2 Comparison of users' responses based on annual time slot delineation results before and after adjustment

时段	最大负荷/ MW	最小负荷/ MW	峰谷差/ MW	峰谷差率/ %
响应前	3 105	2 716	389	12.53
响应后	3 050	2 803	247	8.10

2.4 基于季节(冬季)数据的峰谷时段划分结果

对实施尖峰电价前(2021 年 1—3 月)的净负荷曲线进行分析,高峰 F_1 评分最高的场景对应的时段为 04:00—11:00、15:00—17:00 和 19:00—22:00,划分为峰时段;同理计算出低谷 F_1 评分最高的场景,对应时段为 11:00—15:00,划分为谷时段;尖峰 F_1 评分最高的场景对应的时段为 17:00—19:00,划分为尖峰时段;平时段为 22:00—次日 04:00。

对实施尖峰电价后(2022 年 1—3 月)的净负荷曲线进行分析,高峰 F_1 评分最高的场景对应的时段为 05:00—12:00、16:00—19:00 和 21:00—23:00,划分为峰时段;同理计算出低谷 F_1 评分最高的场景,对应时段为 12:00—16:00,划为谷时段;尖峰 F_1 评分最高的场景对应的时段为 19:00—21:00,划分为尖峰时段;平时段为 23:00—次日 05:00。

对实施尖峰电价前后依据净负荷划分的峰谷时段进行整理,与当前辽宁省时段划分政策进行对比,如图 7 所示。

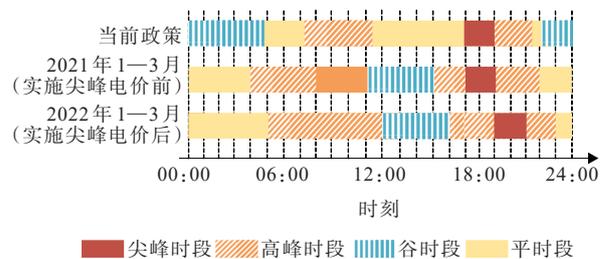


图 7 依据冬季(1—3月)净负荷划分的峰谷时段与当前政策对比

Figure 7 Comparison between peak and valley time slots divided by net load in winter (from January to March) and current delineation policy

从图 7 可以看出,在高峰时段上,现行政策的时段划分与实施尖峰电价前后冬季的计算结果基本一致,为 04:00—12:00,其中计算结果中的峰时段较为提前,为 04:00—12:00 和 15:00—23:00,同时可以看出,尖峰电价的实施使峰时段进一步延后。

在尖峰时段上,依据实施尖峰电价前冬季的时段划分计算结果为 17:00—19:00,与现行政策较为

一致,但实施尖峰电价后冬季的时段划分计算结果为19:00—21:00,比现行政策滞后了2 h。

在谷时段上,实施尖峰电价前后冬季的计算结果为11:00—16:00,与现行政策出现了较大的偏差。基于表1所计算的典型日电力需求价格弹性系数,计算时段划分后大工业用户响应前后对比如图8所示。

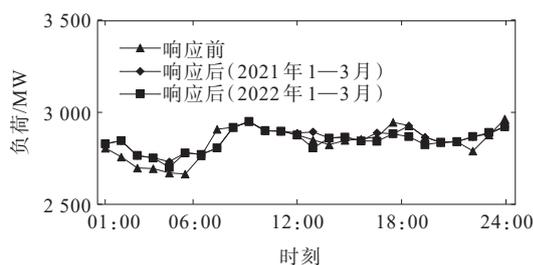


图8 依据季节(冬季)时段划分结果的大工业用户响应前后对比

Figure 8 Comparison of large industrial users' responses based on (winter) time slot delineation results before and after adjustment

如表3所示,当大工业用电峰谷分时电价调整后,根据2021年1—3月的负荷数据的时段划分结果可知,电网的最大负荷降低为3 087 MW,较调整前的最大负荷3 105 MW降低了18 MW;调整后的电网峰谷差为284 MW,较调整前的峰谷差389 MW减少了105 MW。根据2022年1—3月的负荷数据的时段划分结果可知,电网的最大负荷降低为3 087 MW,较调整前的最大负荷3 105 MW降低了18 MW;调整后的电网峰谷差为324 MW,较调整前的峰谷差389 MW减少了65 MW,可见根据季节(冬季)净负荷数据调整峰谷时段后,减少了最大负荷及峰谷差。

表3 依据季节时段划分的用户响应前后负荷指标对比

Table 3 Comparison of load indicators of users' responses based on winter time slot delineation results before and after adjustment

时段	最大负荷/MW	最小负荷/MW	峰谷差/MW	峰谷差率/%
响应前	3 105	2 716	389	12.53
响应后(2021年1—3月)	3 087	2 803	284	9.20
响应后(2022年1—3月)	3 087	2 763	324	10.50

2.5 基于月度数据的峰谷时段划分结果

对2021年4月—2022年3月依据净负荷划分的峰谷时段进行整理,与当前辽宁省时段划分政策进

行对比,如图9所示。

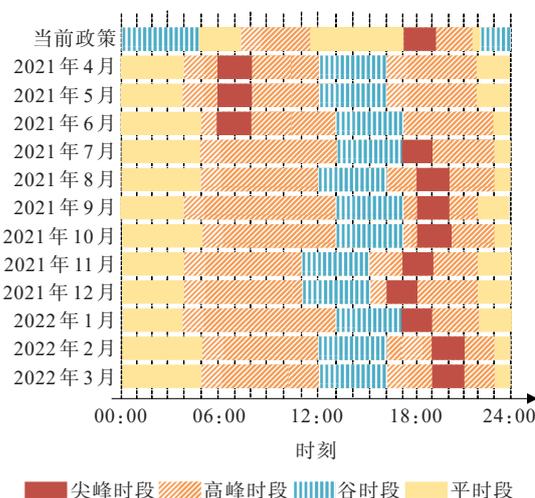


图9 依据月度净负荷划分的峰谷时段与当前政策对比
Figure 9 Comparison between peak and valley time slots divided by monthly net load and current delineation policy

从图9可以看出:在谷时段上,现行政策的时段划分与净负荷月度计算结果相差较大,在11:00—17:00反复波动,而现行政策中此时段为平时段,根据辽宁四季典型日风光出力曲线可知,该时段新能源出力较大,导致净负荷出现低谷,预计未来谷时段将继续为11:00—17:00。

在峰时段上,净负荷月度计算结果在04:00—12:00、15:00—19:00和21:00—23:00时间段均出现了高峰,与现行政策较为一致,但时段稍有延长,预计未来高峰时段将延迟至23:00。

在尖峰时段上,2021年4—6月,尖峰时段出现在06:00—08:00,与现行政策相差较大,根据辽宁四季典型日风光出力曲线可知,该时段新能源出力较小,导致净负荷出现尖峰;而2021年7—10月,尖峰时段转移至17:00—20:00,与现行政策较为一致;2021年11月—2022年1月,尖峰时段前移至16:00—19:00,可能由于辽宁省2021年10月27日实行尖峰电价政策,用户错峰用电,导致用电尖峰的前移,与现行政策出现偏差;2022年2月—3月,尖峰时段后移至19:00—21:00,与现行政策的差距进一步拉大。基于表1所计算的典型日电力需求价格弹性系数,计算时段划分后大工业用户响应情况如图10所示。

由表4可知,当大工业用电峰谷分时电价调整后,根据月度净负荷数据的时段划分结果可知,电网的最大负荷在6、7、9、10、1月升高至3 162 MW,较调整前的最大负荷3 105 MW提高了57 MW;调

整后的电网峰谷差最大为 399 MW,较调整前的峰谷差 389 MW 减少了 10 MW,可见根据月度净负荷数据调整峰谷时段后,最大负荷及峰谷差反而提高。一方面可能是因为大工业用户用电中刚性负荷占比大,若分时电价的时段调整过于频繁,大工业用户将难以及时调整用电行为进行响应;另一方面可能是由于新能源固有的反调峰特性,存在新能源大发时段与用户负荷曲线低谷时段难以匹配的现象,引起净负荷曲线峰谷差增大,影响了峰谷时段的划分。

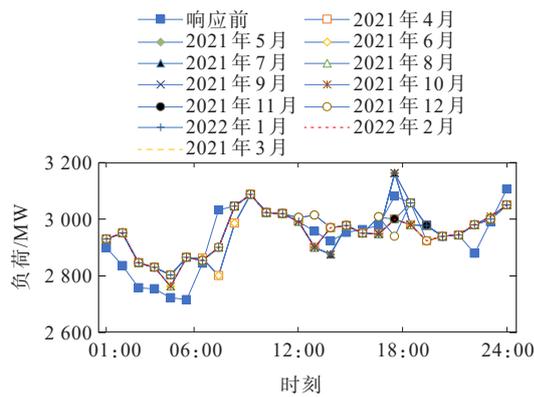


图 10 依据月度时段划分结果的用户响应前后对比
Figure 10 Comparison of users' responses based on monthly time slot delineation results before and after adjustment

表 4 依据月度时段划分的用户响应前后负荷指标对比
Table 4 Comparison of load indicators of users' responses based on monthly time slot delineation results before and after adjustment

时段	最大负荷/MW	最小负荷/MW	峰谷差/MW	峰谷差率/%
响应前	3 105	2 716	389	12.53
1月	3 162	2 803	359	11.35
2月	3 087	2 763	324	10.50
3月	3 087	2 763	324	10.50
4月	3 087	2 801	286	9.26
5月	3 087	2 801	286	9.26
6月	3 162	2 763	399	12.62
7月	3 162	2 803	359	11.35
8月	3 087	2 763	324	10.50
9月	3 162	2 803	359	11.35
10月	3 162	2 763	399	12.62
11月	3 087	2 803	284	9.20
12月	3 087	2 803	284	9.20

3 结语

本文基于改进的 FCM 聚类算法,针对不同时间尺度下的净负荷日变化曲线计算峰谷时段划分结果,在辽宁省 2021 年 4 月—2022 年 3 月全年净负荷数据不同时间尺度上的测试结果如下。

1) 该模型相比于传统聚类模型具有更高的 F_1 评分,能够较精确地实现不同时间尺度下尖峰、高峰、低谷和平时段的划分。

2) 通过分析不同时间尺度下的时段划分结果,对比时段划分前后用户的需求响应情况可知,一方面,用户对于分时电价政策时段划分的响应具有动态性,会因政策调整自己的用电时间;另一方面,风电、光伏等不确定性电源具有反调峰特性,存在引起净负荷曲线峰谷差增大的情况,不仅会影响峰谷时段的划分,也会对新新能源消纳产生负面作用。因而,不再单独以负荷高低作为峰谷时段划分的依据,充分考虑净负荷曲线的变化特性,根据用户的需求响应结果动态调整峰谷时段划分,可以降低峰谷差,获得削峰填谷的效果;但若分时电价的时段调整过于频繁,用户会难以及时调整用电行为进行响应。

3) 本文建议根据用户的需求响应结果,适应新新能源出力变化,每隔 3~4 个月调整峰谷分时电价政策的时段划分,以更好地挖掘用户需求侧响应潜力,促进新新能源消纳。

随着电力市场建设的不断完善,分布式电源和储能不断发展,未来用户负荷曲线将更加复杂,为激励用户需求响应的电价政策也有所不同,用户的响应潜力将进一步提升,如何对未来更加复杂的用户负荷曲线和需求响应激励政策进行峰谷时段划分将是后续的研究重点。

参考文献:

[1] YANG H J, WANG L, ZHANG Y Y, et al. Reliability evaluation of power system considering time of use electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(3):1991-2002.
[2] 李艳梅,任恒君,张致远,等.考虑储能系统调度与风电消纳的峰谷分时电价优化模型研究[J].电网技术,2022,46(11):4141-4149.
LI Yanmei, REN Hengjun, ZHANG Zhiyuan, et al. Optimization model of peak-valley time-of-use

- electricity prices considering energy storage system dispatching and wind power consumption[J]. Power System Technology,2022,46(11):4141-4149.
- [3] 高原,杨贺钧,郭凯军,等.考虑负荷季节特性的电价型需求响应最优定价策略[J].电力建设,2023,44(1):55-63. GAO Yuan, YANG Hejun, GUO Kaijun, et al. Optimal pricing strategy of electricity price demand response considering seasonal characteristics of load[J]. Electric Power Construction,2023,44(1):55-63.
- [4] 何英静,叶泽,魏文.考虑用户需求价格弹性的峰谷分时电价时段划分研究[J].价格月刊,2022(12):1-9. HE Yingjing, YE Ze, WEI Wen. Research on time division of peak-valley TOU tariff considering price elasticity of user demand[J]. Prices Monthly,2022(12):1-9.
- [5] MA S C, YI B W, FAN Y. Research on the valley-filling pricing for EV charging considering renewable power generation[J]. Energy Economics,2022,106:105781.
- [6] 丁宁,吴军基,邹云.基于DSM的峰谷时段划分及分时电价研究[J].电力系统自动化,2001,25(23):9-12+16. DING Ning, WU Junji, ZOU Yun. Research of peak and valley time period partition approach and TOU price on dsm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (23):9-12+16.
- [7] 郑成,田宇,陈一怀.基于模糊聚类的峰谷时段划分[J].电气技术,2016,17(6):13-17. ZHENG Cheng, TIAN Yu, CHEN Yihuai. Research of peak and valley time period partition based on fuzzy clustering[J]. Electrical Engineering,2016,17(6):13-17.
- [8] 江兵,李国荣,孙赵盟,等.基于长短期记忆神经网络和改进型K-means聚类算法的居民峰谷时段划分模型[J].现代电力,2021,38(6):620-629. JIANG Bing, LI Guorong, SUN Zhaomeng, et al. A residential peak and valley time division model based on long short-term memory and improved K-means clustering algorithm[J]. Modern Electric Power, 2021, 38 (6):620-629.
- [9] 程瑜,翟娜娜.基于用户响应的分时电价时段划分[J].电力系统自动化,2012,36(9):42-46+53. CHENG Yu, ZHAI Nana. Electricity price peak and valley periods division based on customer response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 42-46+53.
- [10] 王尧,傅吉悦,曲绍杰,等.面向调峰弃风消纳的分时电价政策制定与评估[J].吉林电力,2018,46(4):1-5. WANG Yao, FU Jiyue, QU Shaojie, et al. Development and assessment of time-of-use electricity pricing policy for integrating wind power curtailment by peak load regulation[J]. Jilin Electric Power,2018,46(4):1-5.
- [11] 王守相,王瀚樟,赵倩宇,等.面向配电网光伏接纳能力提升的分时电价优化方法[J].电力系统自动化,2023,47(10):38-46. WANG Shouxiang, WANG Hanzhang, ZHAO Qianyu, et al. Optimization method of time-of-use electricity price for improving photovoltaic hosting capacity of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(10):38-46.
- [12] LI C R, DING G H, HE L X, et al. Peak-valley time-of-use tariff formulation method based on net load curve[C]// 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Shanghai, China. IEEE, 2022: 1196-1201.
- [13] 蒋向兵,汤波,余光正,等.面向新能源就地消纳的园区储能与电价协调优化方法[J].电力系统自动化,2022,46(5):51-64. JIANG Xiangbing, TANG Bo, YU Guangzheng, et al. Coordination and optimization method of park-level energy storage and electricity price for local accommodation of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(5):51-64.
- [14] 叶兴杰,徐永海,黄子桐,等.钢铁企业参与电力系统调度及风电消纳[J].电力自动化设备,2023,43(8):112-118. YE Xingjie, XU Yonghai, HUANG Zitong, et al. Iron and steel enterprises participating in power system scheduling and wind power consumption[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(8):112-118.
- [15] 章雪萌,孟祥娟,毛福斌,等.考虑多时间尺度的新能源特性对地区电网的影响评估[J].南方能源建设,2023,10(5):166-173. ZHANG Xuemeng, MENG Xiangjuan, MAO Fubin, et al. Impact assessment of new energy characteristics on regional power grid considering multiple time scales[J]. Southern Energy Construction,2023,10(5):166-173.
- [16] 孙建军,张世泽,曾梦迪,等.考虑分时电价的主动配电网柔性负荷多目标优化控制[J].电工技术学报,2018,33(2):401-412. SUN Jianjun, ZHANG Shize, ZENG Mengdi, et al. Multi-objective optimal control for flexible load in active distribution network considering time-of-use tariff[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (2):401-412.
- [17] ZHANG Z Y, LV L J, WANG X H. Research on dynamic time-sharing tariff orderly charging strategy based on NSGA2 in PV-storage-charging stations[J]. Electric Power Systems Research,2023,225:109784.
- [18] KAUR A P, SINGH M. Time-of-use tariff rates estimation for optimal demand-side management using electric vehicles[J]. Energy,2023,273:127243.
- [19] 邓慧琼,张晓飞,曾凡滢,等.基于动态分时电价的电动汽车有序充放电调度策略[J].河北科技大学学报,2022, 43(3):240-248.

- [19] SHAHSAVARIAN T, SHAHRTASH S M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015,9(6):661-670.
- [20] HE M, HAO M, CHEN G, et al. Numerical modelling on partial discharge in HVDC XLPE cable[J]. COMPEL-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2018,37(2):986-999.
- [21] ILLIAS H A, TUNIO M A, BAKAR A H A, et al. Partial discharge phenomena within an artificial void in cable insulation geometry: experimental validation and simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016,23(1):451-459.
- [22] GOUDA O E, ELFARSKOURY A A, ELSINNARY A R, et al. Investigating the effect of cavity size within medium-voltage power cable on partial discharge behaviour[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018,12(5):1190-1197.
- [23] ILLIAS H, CHEN G, LEWIN P L. Modeling of partial discharge activity in spherical cavities within a dielectric material[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011,27(1):38-45.
- [24] NASR ESFAHANI A, SHAHABI S, KORDI B. Partial discharge detection and identification at low air pressure in noisy environment[J]. High Voltage, 2021, 6(5): 850-860.
- [25] 庞圣养. 交联聚乙烯电缆局放检测技术综述[J]. 电力安全技术, 2021,23(10):17-21+25.
- PANG Shengyang. Overview on partial discharge detection technology for XLPE cable[J]. Electric Safety Technology, 2021,23(10):17-21+25.
- [26] 辛文成, 姚森敬, 陈浩敏, 等. 计及电磁模态高频信号的局部放电模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6):108-115.
- XIN Wencheng, YAO Senjing, CHEN Haomin, et al. Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(6):108-115.

(上接第 250 页 Continued from page 250)

- DENG Huiqiong, ZHANG Xiaofei, ZENG Fangan, et al. Orderly charging and discharging scheduling strategy of electric vehicle based on dynamic TOU price[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(3):240-248.
- [20] 陈嘉德, 徐海博, 孙瑞雪, 等. 基于多时段动态电价的电动汽车有序充电策略优化[J]. 东北电力技术, 2023, 44(2):40-46.
- CHEN Jiade, XU Haibo, SUN Ruixue, et al. Strategy optimization of electric vehicles orderly charging based on multi period dynamic electricity price[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(2):40-46.
- [21] 万玉良, 尚国政, 刘蒙聪, 等. 考虑源荷不确定性的分时电价动态修正机制研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 493-500.
- WAN Yuliang, SHANG Guozheng, LIU Mengcong, et al. Research on dynamic correction mechanism of time-of-use electricity price considering uncertainty of source and load[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(11): 493-500.
- [22] XUE W L, ZHAO X, LI Y, et al. Research on the optimal design of seasonal time-of-use tariff based on the price elasticity of electricity demand[J]. Energies, 2023, 16(4): 1625.
- [23] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):1-9.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [24] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8):11-24.
- BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8):11-24.
- [25] 于德新, 田秀娟, 杨兆升. 基于改进 FCM 聚类的交通控制时段划分[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(12):53-60.
- YU Dexin, TIAN Xiujuan, YANG Zhaosheng. Division of traffic control periods based on improved FCM clustering[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(12): 53-60.