

考虑响应稳定度的峰谷型售电套餐决策方法

张浩¹,王宣元¹,宁卜¹,刘蓁¹,刘亚²,黄红伟²

(1.冀北电力交易中心有限公司,北京 100054;2.北京清大科越股份有限公司,北京 100102)

摘要:为提升电力用户售电套餐决策的实际效用,避免盲目选择所产生的违约风险,研究了电力用户按照其购电合约用电的响应稳定性,提出了一种考虑响应稳定度的峰谷型售电套餐决策方法。峰谷型售电套餐的特点在于用户电价随峰谷时段电量比例的降低而降低。选择该类型套餐的电力用户趋向于低谷用电,以获得更好的用电收益,但同时也将面临更高的违约风险。提出了响应稳定度指标,以量化用户按照套餐规定用电的发生概率。在此,考虑预期违约风险设计了综合效用指标。以此为优化目标,构建了考虑响应稳定度的峰谷型售电套餐决策模型。最后,基于用户实际数据构造算例,验证所提出方法的有效性。与传统方法相比,所提出方法能规避用户盲目选择高回报套餐的违约风险。结果表明,在峰谷型售电套餐决策过程中,用户必须充分考虑自身用电实际,理性选择售电套餐,以降低违约风险。

关键词:峰谷型售电套餐;响应稳定度;综合效用;违约风险;电力用户

中图分类号:TM743

文献标识码:A

DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd23727

A Decision-making Method for Peak-valley Power Electricity Package Considering Response Stability

ZHANG Hao¹, WANG Xuanyuan¹, NING Bo¹, LIU Zhen¹, LIU Ya², HUANG Hongwei²

(1. Jibei Power Exchange Center Co., Ltd., Beijing 100054, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: In order to improve the actual utility of power electricity package decision and avoid the default risk caused by blind choice, the response stability of power users according to their purchase contract was studied, a peak-valley power electricity package decision-making method considering response stability was proposed. The characteristic of peak-valley package is that the price of electricity is decreased with the decrease of the proportion of electricity during peak and valley periods. Power users who choose this type of package tend to use power at low prices to get better revenue, but at the same time they will face higher risk of default. The index of response stability was put forward to quantify the probability that the users use electricity according to the provisions of the package. A comprehensive utility index was designed considering the expected default risk. Taking this as the optimization objective, a peak-valley power package decision model considering response stability was established. Finally, an example was constructed based on the actual data of a user to verify the effectiveness of the proposed method. Compared with the traditional method, the proposed method can avoid the default risk of users blindly choosing high return packages. The results show that in the decision-making process of peak-valley type electricity package, users must fully consider their own actual electricity consumption and rationally choose the electricity package to reduce the risk of default.

Key words: peak-valley power electricity package; response stability; comprehensive utility; default risk; power user

中发9号文及其配套文件拉开了我国本轮电力体制改革的序幕。售电侧开放并允许电力用

户参与市场交易是本轮电力体制改革的重要内容。2021年全国两会明确提出:允许所有制造业

基金项目:国家电网公司科技项目(0601002019030103XT00020)

作者简介:张浩(1983—),男,硕士,高级工程师,Email:zhang.hao.b@jibei.sgcc.com.cn

通讯作者:黄红伟(1983—),男,本科,高级工程师,Email:hhwsjy@189.cn

企业参与电力市场化交易。可以预见,下阶段将有更多的中小用户参与电力市场,由此产生电力用户售电套餐决策问题,即电力用户如何有效选择售电套餐服务^[1-2]。

从国外成熟电力市场的实践经验来看,用电规模较大的电力用户往往具有较高的议价能力,能够采用双边协商等交易形式直接与发电企业交易购电;而中小用户由于规模较小,无较强的议价能力,一般需要向售电公司购买售电套餐,委托其购电^[3]。以美国、日本等成熟电力市场为例,售电公司能够提供种类繁多的售电套餐^[4-6]。文献[5]介绍了日本售电市场的套餐设计情况,自2016年全面放开用电侧市场以来,所有电力用户均需要向售电公司或发电企业购电,售电公司的售电套餐既包括电-网-气等多种客户需求打捆的综合型套餐,也包括峰谷型售电套餐等电力需求专一性套餐。文献[7-8]研究了售电套餐设计与决策中用户效用问题,提出了考虑有限理性选择行为的售电套餐设计模型。文献[9-10]研究了用户选择售电套餐过程中的从众性心理,提出了基于深度强化学习的售电套餐决策方法。近年来,随着我国电力体制改革的不断深化,售电套餐领域相关的研究也越来越丰富。文献[11]研究了用户用电需求的差异化特征,提出了基于客户画像的电价套餐差异化划分方法。文献[12]研究了不同用电时期的用户用电需求,提出了考虑淡旺季用户效用的居民套餐设计方法。

可以看出,当前我国电力市场改革还处于起步阶段。目前的研究主要集中于售电套餐设计方面,对电力用户如何有效选择售电套餐的研究还相对较少^[13]。为此,本文将以外电力市场应用较为广泛的峰谷型售电套餐为案例,研究其筛选方法。首先,将介绍峰谷型售电套餐的基本概念和主要特征。接着,从用户效用的角度出发,综合考虑购电预期收益和违约预期风险,提出了一种考虑响应稳定性的峰谷型售电套餐决策方法。最后,基于某用户实际用电曲线构造算例,验证了所提出方法的有效性。

1 峰谷型售电套餐概念与效用分析

1.1 基本概念

峰谷型售电套餐是当前国外售电市场应用较为广泛的售电套餐类型,其主要特点在于将全天划分为高峰、低谷两个运行时段,用户根据需

要可以购买不同份额的高峰、低谷时段用电需求,其购电价格不仅与购电量有关,而且与高峰、低谷时段购电量比例有关;在实际用电中,若峰谷电量比例超过一定偏差幅度,则将支付违约电费^[14-15]。

而对于特定电力用户,其整体用电需求一定的前提下,其峰谷时段电价仅与峰谷电量比例有关。峰谷电量比例越高,电价相对越高;峰谷电量比例越低,电价相对越低。电价与峰谷电量比例关系一般为分段线性关系如图1所示,可表示为

$$p_u^{PV} = p_u^{PV,B} \varphi_u^{PV} \quad (1)$$

式中: $p_u^{PV,B}$, p_u^{PV} 分别为电力用户 u 用电需求确定的基本电价和考虑峰谷电量比例后的电价; φ_u^{PV} 为该用户峰谷电量比例电价修正系数。

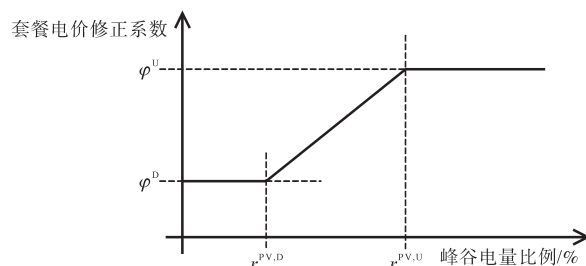


图1 套餐电价修正系数与峰谷电量比例关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between the package price correction factor and peak-valley electricity ratio

参考图1,套餐电价修正系数可表示为

$$\varphi^{PV} = \begin{cases} \varphi^U & \frac{E^P}{E^V} > r^{PV,U} \\ \varphi^a \frac{E^P}{E^V} + \varphi^b & r^{PV,U} \geq \frac{E^P}{E^V} \geq r^{PV,D} \\ \varphi^D & \frac{E^P}{E^V} < r^{PV,D} \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ^{PV} 为售电套餐电价修正系数; E^P , E^V 分别为电力用户套餐协议中高峰、低谷时段电量需求; φ^U , φ^D 分别为修正系数取值上、下限; $r^{PV,U}$, $r^{PV,D}$ 为对应峰谷电量比例取值上、下限; φ^a , φ^b 分别为一次线性部分的一次项和常数项系数。

若实际用电峰谷电量比例不满足套餐协议要求,且超出允许的偏差范围,则电力用户将承担一定的电价违约处罚。考虑到实际峰谷电量比例低于协议值时,对售电商来说更有助于降低购电费用。当前峰谷型售电套餐设计中规定,若实际峰谷电量比例低于其允许范围,则不予处罚;而若超过其允许范围,则将按照实际峰谷电

量比例对应套餐电价修正系数重新计算套餐电价,并按照重新计算的套餐电价进行结算。因此,电力用户实际结算的电价可表示为

$$p_u^{PV,S} = \begin{cases} p_u^{PV} & \frac{E_u^{P,S}}{E_u^{V,S}} < \frac{E_u^P}{E_u^V} + \varepsilon \\ p_u^{PV,B} \varphi_u^{PV,RC} & \frac{E_u^{P,S}}{E_u^{V,S}} \geq \frac{E_u^P}{E_u^V} + \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p_u^{PV,S}$ 为电力用户 u 实际结算电价; ε 为峰谷套餐电价允许值; $E_u^{P,S}, E_u^{V,S}$ 分别为电力用户 u 高峰、低谷时段实际用电量; $\varphi_u^{PV,RC}$ 为根据实际峰谷电量比例计算得到的套餐电价修正系数。

1.2 效用分析

电力用户选购售电套餐的效用是指当该电力用户购买该套餐时,较原方式下所能增加的电能使用效益。文献[12-15]均研究了用户购买售电套餐的效用问题。在峰谷型售电套餐中,由于电力用户峰谷电量比例降低,其套餐电价随之下降。因此用户具有不断调整其生产用电习惯、降低峰谷电量比例、配合电网削峰填谷的驱动力。但随着调整生产用电习惯的程度不断增大,对其生产生活的影 响也随之增加。因此,传统模式下电力用户售电套餐效用既包括由于选购售电套餐所产生的购电成本降低,也需要考虑调整用电习惯而导致的不利因素,可表示为

$$U_u = U_u^1 - U_u^2 = (p_u^{PV} E_u - p_u^A E_u) - p_u^S (E_u^V - E_u^{V,A}) \quad (4)$$

式中: U_u 为电力用户 u 选购售电套餐的效用; E_u 为该电力用户预期用电量; U_u^1, U_u^2 分别为选购售电套餐所产生的购电成本降低和调整用电习惯而导致的不利影响; p_u^A 为原购电方式下的电价; $E_u^{V,A}, E_u^V$ 分别为原购电方式下低谷时段用电量和售电套餐中的低谷电量; p_u^S 为调整用电习惯而产生不良影响的价格系数。

传统售电套餐决策中,往往以式(4)所示的用户售电套餐效用为决策目标,构建决策模型,确定售电套餐签订中电力用户峰谷电量比例等关键指标。

然而,可以看出以上效用分析侧重于关注用户购买售电套餐之后的预期收益。由于售电套餐中高峰、低谷时段的价格均与峰谷用电量比例有关,且用户峰谷电量比例越低,电价越低,因此购电效用为目标的决策结果,倾向于驱使用户不断调整自身用电习惯,尽可能多地在低谷用电。但实际上,用户移峰填谷的能力是有限的,以一

般家庭用户而言,正常情况下移峰填谷电量仅占总用电量的20%左右。考虑到实际用电中,用户还存在惰性等因素影响,其响应还可能有一定偏差。但是若实际用电偏差超过给定范围,用户将承受用电违约处罚,可能导致实际效用与预期不相符,甚至导致电力用户购电成本上升的问题。

2 考虑响应稳定度的峰谷型售电套餐决策

为解决传统用户效用指标未能充分考虑用户违约风险的问题,本文将引入响应稳定度系数,以客观评估售电套餐决策中峰谷电量比例实际执行的风险及可能导致的违约费用,由此提出售电套餐综合效用指标,作为售电套餐决策的依据。

2.1 响应稳定度指标设计

所谓响应稳定度是指根据用户用电习惯,其峰谷用电量比例能稳定保持在套餐设定水平的概率。图2为根据电力用户历史用电曲线统计得到的峰谷电量比例分布概率直方图。不同气象环境和运行日条件下,电力用户的峰谷电量比例不同,并在一定范围内变化。该变动范围实际上反映了电力用户调整用电习惯的能力范围,即在该直方图中峰谷电量比例最小值到最大值之间的发生概率之和应等于1,可表示为

$$\int_{r_u^{PV,D}}^{r_u^{PV,U}} r dr = 1 \quad (5)$$

式中: $r_u^{PV,U}, r_u^{PV,D}$ 分别为电力用户 u 历史用电中峰谷电量比例最大值、最小值; r 为峰谷电量比例。

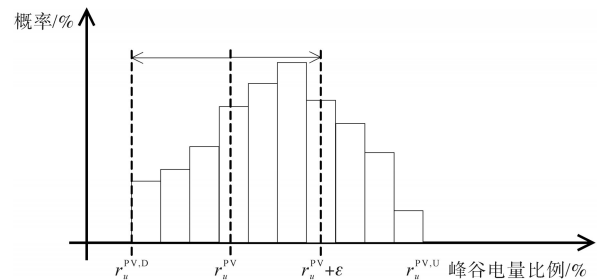


图2 峰谷电量比例分布直方图

Fig.2 Distribution histogram of peak-valley electricity ratio

图2中,未超过该用户选购售电套餐峰谷电量比例允许值范围的部分实际上表征了正常情况下电力用户能够满足该套餐协议要求的发生概率。同时考虑到电力用户在签署售电套餐协议后可能产生的锚定效应^[15],实际履约概率应为未超过允许范围发生概率与锚定效应影响概率

之和,可表示为

$$r_u^S = \int_{r_u^{PV,D}}^{r_u^{PV} + \varepsilon} r dr + r_u^A \quad (6)$$

式中: r_u^{PV} 为售电套餐中电力用户 u 协议签订的峰谷电量比例; ε 为协议允许的偏差范围; r_u^A 为电力用户签署售电套餐所产生锚定效应影响概率; r_u^S 为预期实际履约概率,也反映了该电力用户实际能够稳定履约的稳定程度,本文中将该指标规定为响应稳定性。

2.2 决策模型

受电力用户响应稳定度影响,实际执行中电力用户存在超过其售电套餐允许峰谷电量比例范围用电的概率。因此,电力用户在评估售电套餐效用,必须充分考虑这一因素带来的影响。为了区别传统研究中所提出的售电套餐用户效用,本文中考虑用户响应稳定度的售电套餐用户效用指标称为综合效用。考虑到实际执行中的复杂性,综合效用计算时超出响应稳定度部分建议仅考虑历史峰谷电量比例最大的情况下对电力用户的影响,以更加客观地反映预期最差运行情况。

基于以上前提设定,本文所提出的综合效用指标可表示为

$$\begin{aligned} U_u^S &= r_u^S U_u^1 + (1 - r_u^S) U_u^3 - U_u^2 \\ &= r_u^S (p_u^{PV} E_u - p_u^A E_u) + \\ &\quad (1 - r_u^S) (p_u^{PV,U} E_u - p_u^A E_u) - \\ &\quad p_u^S (E_u^V - E_u^{V,A}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: U_u^S 为考虑电力用户 u 响应稳定度的综合效用指标; U_u^3 为当实际峰谷电量比例超出允许范围后极端场景下所产生的购电费用变化; $p_u^{PV,U}$ 为实际峰谷电量比超过套餐允许范围后的违约电价,可参照式(3)计算得到。

以综合效用最大化为目标,综合考虑高峰电量平衡、低谷电量平衡、峰谷电量比例平衡等约束条件^[16-17],即可构建考虑用户响应稳定度的峰谷型售电套餐决策模型,可表示为

$$\begin{aligned} &\max U_u^S \\ &s.t. \begin{cases} \sum_{d=1}^{N^D} E_{u,d}^P = E_u^P \\ \sum_{d=1}^{N^D} E_{u,d}^V = E_u^V \\ r_u^{PV} = E_u^P / E_u^V \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: N^D 为售电套餐对应运行天数; $E_{u,d}^P, E_{u,d}^V$ 分别

为预计该电力用户 u 第 d 个运行日高峰、低谷时段用电量; E_u^P, E_u^V 分别为售电套餐中高峰、低谷时段总电量。

2.3 决策流程

该决策模型是电力用户开展售电套餐决策的核心,其决策流程如图3所示。

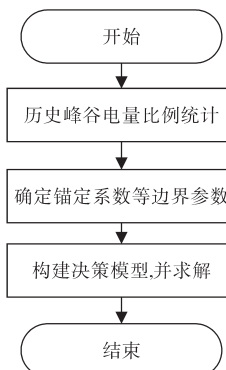


图3 决策流程

Fig.3 Decision-making process

决策流程主要实施要点如下:

1) 历史峰谷电量比例统计,统计历史同一时期该电力用户逐日峰谷电量比例,绘制分布直方图;

2) 确定锚定系数等边界参数,根据电力用户生产性质等参考历史经验,确定锚定系数等边界参数;

3) 构建决策模型并求解,参照式(8)所示的决策模型,构建电力用户峰谷型售电套餐决策模型,该模型本质上为非线性规划问题,可通过逐次线性化等方法将其转化为线性模型分步求解^[14-15]。

3 算例分析

3.1 基础数据

为了验证所提出决策方法的有效性,算例中选取了三个类型不同但用电量基本相当的电力用户。基本信息如表1所示,三个用户分别为大型商场、磨料加工厂、建材工厂,由于其月度用电量基本相同,通过售电公司购电时,售电套餐中基本电价相同。根据不同用电类型调整用电习惯的难易程度,磨料行业用电相对平稳,生产工艺决定了其难以调整用电习惯,调整价格系数最高,商场用电需要适应购物者需求,较难调整,调整系数居中,建材工厂生产灵活性较高,价格系数最低。锚定系数方面,重点考虑电量费用在整个企业生产经营中的影响,商场最高,磨料居中,建材最低。

表1 电力用户基本信息表

Tab.1 Basic information table for power users

电力用户	行业类型	月用电量/ (万 kW·h)	用电调整价格系数 $p_u^s/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	锚定系数 $r_u^A/\%$
1	商场	40	0.3	4
2	磨料	38	0.8	2
3	建材	42	0.1	1

根据系统调峰需求,规定高峰时段为9:00~21:00,其他时段为低谷时段。统计上述三个用户历史同期用电情况,其峰谷电量比例直方图如图4所示。

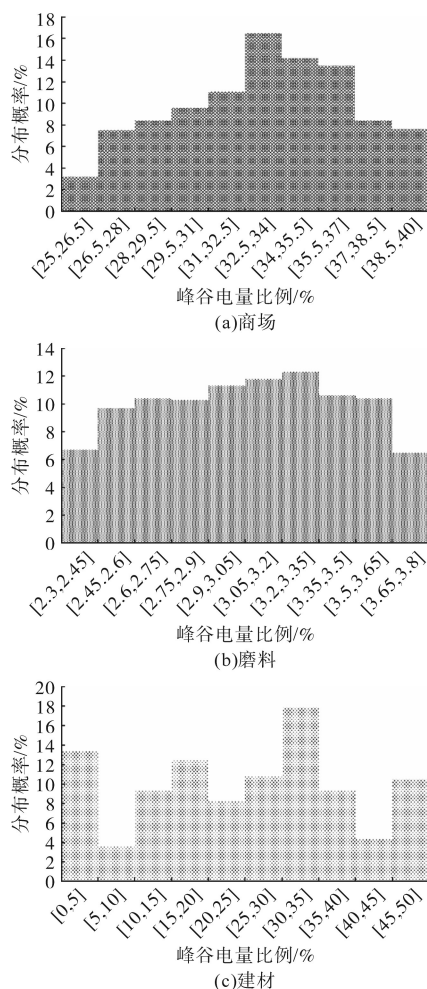


图4 不同用户峰谷电量比例直方图

Fig. 4 Distribution histogram of peak-valley electricity ratio of different power users

由图4可知,从峰谷电量比例数据稳定性和波动范围分布来看,上述三个用户具有显著的差别:磨料的稳定性最高,且波动区间最小,基本在2.3%~3.8%之间变化,表明其生产稳定性最高;商场波动范围较大,但稳定性相对也比较高,基本在25%~40%之间波动;建材生产规律性较低,峰谷电量比例在1.2%~50%之间大幅波动。这一特

点与其生产经营特征相符,磨料属于连续稳定生产的行业,用电相对稳定;商场用电与人流、气温等有关,波动性相对较大;建材生产在与订单紧密相关,订单集中期间峰谷用电基本持平,而订单较少的周期峰谷电量比例显著增加。

3.2 结果分析

根据以上基础数据,可构建三个用户的峰谷型售电套餐决策模型。规定套餐中协议允许偏差范围为10%,则以上三类用户推荐申报峰谷电量比例、响应稳定度对比如表2所示。

表2 电力用户申报及效用对比

Tab. 2 Power user declaration and utility comparison

电力用户	申报峰谷电量比例/%	响应稳定度/%
1	32.5	77.3
2	3.7	96.8
3	40.0	86.3

表2显示商场、磨料、建材三个电力用户在峰谷电价套餐下的申报策略存在显著差异。商场用户申报相对较激进,所申报的峰谷电量比例为32.5%,对应响应稳定度为77.3%。这一结果意味着实际运行中可能存在近30%的场景,商场将承担实际峰谷电量比超过申报值后的违约处罚。磨料申报则最为保守,其申报的峰谷电量比为3.7,对应响应稳定度为96.8%,意味着在该申报水平下,磨料用户基本不会承担违约处罚。建材申报处于中间水平,所申报的峰谷电量比为40%,响应稳定度为86.3%。

以上申报策略差异是不同申报策略下用户购电费用降低、用电调整成本和不同响应稳定度下预期违约处罚三方面综合影响的结果。商场用户用电调整价格系数仅0.3元/(kW·h),相对较低,因此适当降低申报的峰谷电量比能够获得更高的购电费用降低。同时其锚定系数为4%,为三个用户中最高,意味着其根据申报峰谷电量比调整用电习惯的潜力较大,对降低违约处罚有改进效益。因此,商场用户采用了最大限度降低峰谷电量比的申报策略。而与之相对,磨料用户用电调整价格系数最高,而其锚定系数并不突出,为了避免违约处罚,更适合采用偏保守的竞价策略。建材用户尽管用电调整价格系数最低,但锚定系数偏低,申报峰谷电量比对应响应稳定度处于中间水平,以平衡各方面收益预期。

3.3 对比分析

为进一步分析响应稳定度因素对电力用户

决策的影响,将对以下两个场景下三个用户的申报策略。场景一为考虑响应稳定度的申报策略,其申报结果即为3.2节中表2所示的申报结果;场景二为不考虑响应稳定度的申报策略,即以式(4)为优化目标构建决策模型所得到的申报结果。

对比了两个场景下申报结果响应稳定度,如图5所示。可以发现场景二下申报结果响应稳定度均低于场景一,原因在于场景二下由于不考虑响应稳定度因素变化带来的预期违约处罚,电力用户更倾向于申报偏低的峰谷电量比,以获得更低的购电价格。三个用户相比,建材用户的降低幅度最大,原因在于其锚定系数和用电调整价格系数均最低,当不考虑响应稳定度因素所引起的预期违约处罚后,降低峰谷电量比对降低购电费用的效果最显著。而磨料用户降低幅度最小,原因在于磨料用户的用电调整价格系数最高,降低峰谷电量比后其调整成本随之增加。

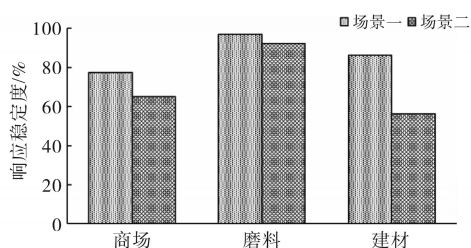


图5 不同场景下申报结果响应稳定度对比

Fig. 5 Comparison of response stability of declaration results in different scenarios

但是场景二忽略了实际运行中峰谷电量比超过申报值所产生的预期违约处罚。表3进一步展示了套餐效用、预期违约处罚和综合效用三项指标。套餐效用即为场景二下电力用户所能获得的预期效用,场景一还将进一步考虑预期违约处罚,综合考虑以上两方面影响,可获得考虑响应稳定度后的综合效用。

表3 电力用户套餐效用对比

Tab.3 Power user package utility comparison

电力用户	套餐效用/万元	预期违约处罚/万元	综合效用/万元
1	1.54	0.48	1.06
2	0.35	0.02	0.33
3	1.62	0.73	0.89

表3数据显示了建材用户和商场用户若不考虑响应稳定度所造成的预期违约处罚,其套餐效用和综合效用存在较大差别,可能导致其实际综合效用偏低。

以上分析过程表明,本文所提出的决策方法结果与实际情况相一致,同时也表明不同类型的电力用户在峰谷型售电套餐决策上需要综合考虑调整意愿、调整难度和违约风险,基于自身实际选择峰谷电量比例指标,科学制定套餐协议。

4 结论

为提升电力用户峰谷型售电套餐决策时的科学性,合理申报峰谷电量比例,本文研究了用户在峰谷电量调整的响应稳定度问题,提出了基于响应稳定度的峰谷型售电套餐决策方法。研究表明,由于不同类型电力用户电费敏感性、用电习惯调整难度等因素存在差异,在制定申报策略时,必须统筹考虑预期收益及违约风险,避免盲目申报造成的经济损失。

参考文献

- [1] 马莉,张晓萱,杨素,等.中国售电市场发展动态及关键问题[J].中国电力,2017,50(7):5-9.
Ma Li, Zhang Xiaoxuan, Yang Su, et al. Recent developments and key issues of China's retail electricity market[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 5-9.
- [2] 马莉,黄李明,薛松,等.中国新一轮电力市场改革试点有序运行关键问题[J].中国电力,2017,50(4):17-22.
Ma Li, Huang Liming, Xue Song, et al. Key issues for orderly operation of China's new electricity market reform pilot[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 17-22.
- [3] Xin Fang, Hu Qinran, Li Fangxing, et al. Coupon-based demand response considering wind power uncertainty: a strategic bidding model for load serving entities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1025-1037.
- [4] 何青,高效,张文月,等.美国德州电力市场零售电价套餐体系及启示[J].供用电,2018,35(12):50-55.
He Qing, Gao Xiao, Zhang Wenye, et al. The retail electricity price package system of Texas electricity market in the USA and its revelation[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(12): 50-55.
- [5] 王美艳,何永秀,陆野.日本电力市场零售电价套餐体系设计的经验及启示[J].华北电力大学学报(社会科学版),2021(1):48-55.
Wang Meiyang, He Yongxiu, Lu Ye. Experience and enlightenment of retail price package system in Japanese electricity market[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2021(1): 48-55.
- [6] 何永秀,陈奋开,叶钰童,等.澳大利亚零售市场电价套餐的经验及启示[J].智慧电力,2019,47(7):19-23,28.
He Yongxiu, Chen Fenkai, Ye Yutong, et al. Experience and

- enlightenment of electricity price package in Australian retail market[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 19–23, 28.
- [7] Yang Jiajia, Zhao Junhua, Wen Fushuan, *et al.* A model of customizing electricity retail prices based on load profile clustering analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3374–3386.
- [8] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A medium-term decision model for DisCos: forward contracting and TOU pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1143–1154.
- [9] Hamed Chitsaz, Payam Zamani-Dehkordi, Hamidreza Zareipour, *et al.* Electricity price forecasting for operational scheduling of behind-the-meter storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6612–6622.
- [10] Yang Hejun, Wang Lei, Zhang Yeyu, *et al.* Reliability evaluation of power system considering time of use electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1991–2002.
- [11] 喻小宝, 谭忠富, 屈高强. 基于电力客户评估的差异化电价套餐研究[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 9–19.
- Yu Xiaobao, Tan Zhongfu, Qu Gaoqiang. Research on differentiated price package based on power customer evaluation[J]. Electric Power, 2020, 53(2): 9–19.
- [12] 董骏峰, 周秀娜, 梁昌勇. 考虑淡旺季用户效用的居民用电套餐模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 57–62.
- Dong Junfeng, Zhou Xiuna, Liang Changyong. Residential electricity package model considering user utility in off-peak and peak seasons[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 57–62.
- [13] 曲朝阳, 冯荣强, 曲楠, 等. 计及 Spark 和属性权重的售电套餐推荐方法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(10): 90–95.
- Qu Zhaoyang, Feng Rongqiang, Qu Nan, *et al.* Recommendation method of power selling packages considering spark and attribute weights[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(10): 90–95.
- [14] 卢恩, 别佩, 王浩浩, 等. 考虑用户自主选择性的零售电价套餐定价策略设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 177–184.
- Lu En, Bie Pei, Wang Haohao, *et al.* Pricing strategy design of electricity retail pricing package considering self-selectivity of users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 177–184.
- [15] 张智, 卢峰, 林振智, 等. 考虑用户有限理性的售电公司峰谷组合电力套餐设计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 114–123.
- Zhang Zhi, Lu Feng, Lin Zhenzhi, *et al.* Peak-valley combination electricity package design for electricity retailers considering bounded rationality of consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 114–123.
- [16] 张惠忠, 周嘉新, 张雅雯. 含源-荷-储的虚拟电厂经济性优化运行研究[J]. 电气传动, 2021, 51(9): 55–60, 66.
- Zhang Huizhong, Zhou Jiaxin, Zhang Yawen. Research on economic optimization operation of virtual power plant with source-load-storage[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 55–60, 66.
- [17] 周晟锐, 刘继春, 张浩禹, 等. 考虑管存动态特性的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电气传动, 2021, 51(13): 69–74.
- Zhou Shengrui, Liu Jichun, Zhang Haoyu, *et al.* Low-carbon economic dispatch of electric-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of storage[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 69–74.

收稿日期: 2021-07-04

修改稿日期: 2021-08-09

(上接第52页)

4023–4032.

- Lin Bo, Wang Bin, Cheng Qiming, *et al.* Differential flatness controller strategy of MMC-HVDC to supply power to passive network under asymmetric fault[J]. High Voltage Engineering, 2021(11): 4023–4032.
- [15] 徐良材, 皇甫宜耿, 李钱, 等. 基于微分平坦理论的燃料电池用高增益 DC-DC 变换器鲁棒控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6828–6839.
- Xu Liangcai, Huangfu Yigeng, Li Qian, *et al.* Research on robust control of high gain DC-DC converter for fuel cell based on differential flatness theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6828–6839.

- [16] Mehrasa M, Pouresmaeil E, Taheri S, *et al.* Novel control strategy for modular multilevel converters based on differential flatness theory[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 888–897.
- [17] 宋平岗, 周鹏辉, 肖丹, 等. MMC-RPC 的功率同步平坦控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 145–151.
- Song Pinggang, Zhou Penghui, Xiao Dan, *et al.* Power synchronization flatness control strategy of MMC-RPC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 145–151.

收稿日期: 2021-04-22

修改稿日期: 2021-05-12