

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.003

考虑贡献度的聚合商需求响应精准评估与动态激励决策

黄莉¹, 周赣¹, 张娅楠¹, 邵雪松², 崔高颖²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 210019)

摘要:在双碳战略和缺煤背景下,针对现有需求响应评估激励机制相对粗放,存在邀约冗余度过大、优质用户难以挖掘等问题,文中提出考虑贡献度的聚合商需求响应精准评估与动态激励决策方法。该方法首先建立考虑静态、动态过程的需求响应精准评估体系,其中静态评估延续现有需求响应评估方案,动态评估关注每时段实际负荷与目标负荷的吻合度;进一步地,从经济和负荷维度提出用户贡献度指标,设计结合静态、动态评估的需求响应两部制激励结算方案,并据此建立考虑贡献度的聚合商需求响应动态激励决策模型。通过算例验证所提模型可在不影响现有需求响应体系前提下,实现优质用户的定向激励,提升需求响应品质和降低邀约冗余度。

关键词:需求响应;贡献度;动态激励;精准评估;定向激励;有效响应

中图分类号:TM933

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)06-0021-09

0 引言

在提高参与电网互动运行能力和用户侧能效水平的双重需求促进下,通过各类需求响应项目聚合用户侧柔性资源来构建虚拟电厂已成为当前的研究热点和实践重点^[1-6]。在过去二十年里,需求响应在江苏、上海等高负荷地区发展迅速,已经形成一套覆盖理论机制^[7-8]、关键技术^[9-10]、标准规范^[11]和工程应用^[12-14]的中国需求响应理论与实践体系。

考虑到负荷资源具有点多面广、单体容量小等特点,电网-聚合商-用户三层需求响应架构已成为当前主流互动模式^[15-16],由聚合商对下聚合调度各类负荷资源,对上与电网互动提供多类型辅助服务。作为独立的市场运营主体,聚合商以经济最优为目标^[17],对上服务时须重点关注需求响应实施效果,对下聚合时须确保规模化负荷资源的精准调度,而构建完善精准的需求响应评估激励模型则是聚合商高效运营的关键^[18]。

在实践方面,江苏、广东等地相继发布需求响应评估细则,考虑用户规模大、结算简单等实际需求,一般采用负荷均值、限值限制等指标模型或“无效用户”判定等一刀切政策评估用户需求响应^[11-13],不关注某时段的响应效果,这导致实际响应过程中单体用户响应精准度不够,存在电网侧邀约冗余度过大、激励成本过高等问题。在理论方

面,一些学者开始关注需求响应动态过程,文献^[19]拓展动态需求响应的内涵,提出构建适应动态需求响应的市场机制设计是面向大规模多样化资源的动态需求响应研究重点之一。文献^[20]以负荷限值为目标,提出考虑反弹负荷的需求响应效果评估体系;文献^[21]从时间、容量和对象等维度构建模拟调峰机组的需求响应调度评估方法;文献^[22]选取认缴性能指标、调度时间可靠性、调度容量可靠性和负荷反弹量作为四类基础指标,针对紧急型和经济型需求响应对各类基础指标的不同倾向,提出单次响应效果综合评估系数。分析发现,上述研究重点关注负荷维度评估,对评估过程中经济等其他因素研究较少。进一步地,文献^[23]利用三角模糊数表征用户响应的不确定性,提出基于响应可靠性的需求响应效果评估方法;文献^[24]提出考虑用户热舒适度、意愿度及可控度等多重因素的互动效果评估模型;文献^[25]从可靠性、经济性和可调度性三方面提出需求响应综合评价指标体系。上述研究提出一些考虑动态过程的需求响应多维度评估指标,更加侧重理论层面,与正在实施的需求响应方案差异性较大,难以直接应用于实践。

因此,如何在不影响现有需求响应体系的前提下,构建更加精准的需求响应评估与激励方案是现阶段需求响应推广实施的关键^[26]。文中以聚合商为研究对象,重点关注用户动态响应过程,构建一种考虑静态、动态过程的需求响应精准评估体系,由代表现有需求响应评估方案的静态评估和关注每时段实际负荷与目标负荷吻合度的动态评估组成;接着,从经济和负荷维度提出用户贡献度指标,建

收稿日期:2022-07-08;修回日期:2022-09-17

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“面向网荷协同的台区负荷精准调控与智慧用能关键技术研究及应用”

立考虑贡献度的聚合商需求响应动态激励决策模型,确保在不影响现有需求响应评估激励体系的前提下,实现优质用户的定向激励,进一步提升需求响应品质和降低邀约冗余度。

1 需求响应精准评估与激励必要性分析

1.1 现有需求响应评估与激励机制

目前,聚合商与用户的评估激励机制主要参照现有需求响应或虚拟电厂实施细则,此处以 2021 年《广州市虚拟电厂实施细则(征求意见稿)》为例,介绍削峰型需求响应评估与激励方案,其流程如图 1 所示。

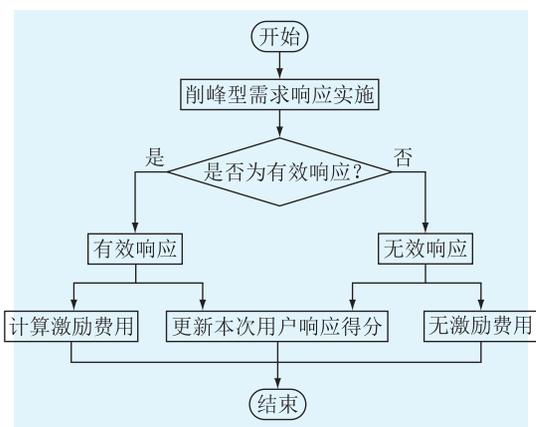


图 1 需求响应评估结算流程

Fig.1 Evaluation settlement process of demand response

第一步为有效响应判断,令 T 为需求响应时段集, $t \in T$,有效响应需同时满足以下 2 个条件:

(1) 需求响应过程中实际最大负荷应小于基线最大负荷,如式(1)所示。

$$\max(P_a(t)) < \max(P_b(t)) \quad t \in T \quad (1)$$

式中: $P_a(t)$ 为 t 时刻实际负荷; $P_b(t)$ 为 t 时刻基线最大负荷。

(2) 实际平均负荷小于基线平均负荷,且其差值处于响应邀约量的 80% ~ 120% 之间,若多于 120%,则按照 120% 封顶计算,具体如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta \bar{P}_a = \bar{P}_b(t) - \bar{P}_a(t) & t \in T \\ \Delta \bar{P}_{a*} = \begin{cases} 0 & \Delta \bar{P}_a < 0.8\Delta P_t \\ \Delta \bar{P}_a & 0.8\Delta \bar{P}_t \leq \Delta \bar{P}_a \leq 1.2\Delta P_t \\ 1.2\Delta P_t & \Delta \bar{P}_a > 1.2\Delta P_t \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{P}_b(t)$, $\bar{P}_a(t)$ 分别为基线和实际平均负荷; $\Delta \bar{P}_a$ 为基线平均负荷与实际平均负荷的差值; ΔP_t 为响应邀约量; $\Delta \bar{P}_{a*}$ 为有效响应负荷。

第二步为用户响应得分更新及激励费用结算。单次响应用户评价得分见表 1,将按照“评价得分高

的用户优先”原则对后续响应调用产生影响。

表 1 单次响应评价得分

Table 1 Evaluation score of a signal response

$\Delta \bar{P}_{a*} / \Delta P_t$	响应得分	是否有效响应
<50%	0	否
[50%,75%)	0.5	否
[75%,90%)	0.8	[80%,90%),是
[90%,120%)	1	是
$\geq 120\%$	0.8	是

用户可获得的激励费用为:

$$F = \Delta \bar{P}_{a*} T \rho \quad (3)$$

式中: ρ 为激励单价,为已知值。

按照式(1)一式(3),具体分析同一目标下不同用户(以响应曲线表征用户)的评估结果及激励费用。图 2 为需求响应实施效果评估及分析,黑色实线为基线,基线平均负荷为 84.8 kW;黑色虚线为基线最大负荷,为 88.6 kW;令响应邀约量为 10 kW,即有效响应负荷应处于 8 kW 和 12 kW 之间,实际曲线 1—曲线 5 代表不同用户。

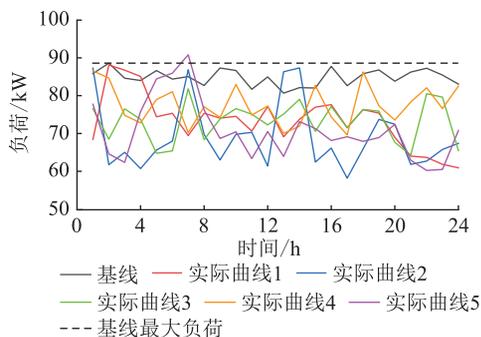


图 2 需求响应实施效果评估及分析

Fig.2 Evaluation and analysis of demand response implementation effect

(1) 实际曲线 1,实际负荷未超过基线最大负荷,响应负荷差值为 11.5 kW,有效响应负荷为 11.5 kW,波动幅度大,部分时段超过本时段基线负荷。

(2) 实际曲线 2,实际负荷未超过基线最大负荷,响应负荷差值为 15.7 kW,过度响应且有效响应负荷认定为 12 kW。

(3) 实际曲线 3,实际负荷未超过基线最大负荷,响应负荷差值为 11.6 kW,有效响应负荷为 11.6 kW,整体波动幅度小,与基线吻合度最高。

(4) 实际曲线 4,实际负荷未超过基线最大负荷,响应负荷差值为 7.3 kW,判定为无效响应。

(5) 实际曲线 5,实际负荷超过基线最大负荷,判定为无效响应。

可以看出,上述评估激励结果存在 2 个问题:

一是针对有效响应曲线 1—曲线 3,实际曲线 1 和曲线 3 的有效响应负荷接近,但实际曲线 1 波动更大,部分时段甚至超过该时段基线值。显然,较于曲线 1,实际曲线 3 对于电网侧需求响应更为有利,但按照现有需求响应评估方案难以突显实际曲线 3 的重要性和优质性。

二是针对无效响应曲线 4—曲线 5,上述用户无法获得激励,这种“一刀切”的判断方式在一定程度上将降低该类用户参与响应的积极性。

1.2 需求响应精准评估与激励机制必要性分析

显然,当 1.1 节中现有需求响应评估激励机制直接应用到聚合商和用户的需求响应交易时,将存在以下问题:较为粗放、不严格的需求响应评估方案将造成聚合商与用户之间的邀约量冗余度过大,导致聚合商支付的激励成本过高;相对粗糙的结算方式可能会打击用户参与的积极性,无法激发用户精准响应的意愿,导致优质用户难以发掘并且定向激励。

在实际需求响应过程中,聚合商和用户是相互独立的,即聚合商向下向用户发送响应指令,用户接收指令后独立完成响应,最后由聚合商根据评估结果对用户进行激励或惩罚结算。因此,合理完善的需求响应评估激励机制是聚合商能否在需求响应市场稳定、健康发展的关键。

因此,聚合商须在确保与现有需求响应评估激励机制一致的前提下,进一步对响应曲线动态过程进行细致、全面评估,构建公平合理的聚合商需求响应精准激励结算体系,以更好地挖掘优质需求响应用户和提升单体用户响应可靠性水平,继而在满足同一需求响应事件下减少互动用户邀约数或目标邀约量,从而达到减少邀约量冗余度的效果。

2 聚合商需求响应精准评估建模

2.1 考虑静、动态过程的需求响应精准评估模型

在延续现有需求响应激励机制的基础上,提出一种考虑静、动态过程的需求响应精准评估体系,该体系分为静态评估和动态评估两部分,静态评估延续现有需求响应激励机制,动态评估重点关注实际曲线波动性、每个时段实际负荷与基线负荷的差距等。

2.1.1 需求响应静态评估

静态评估沿用电网侧需求响应评估方案,由静态指标 I_s 表征有效静态响应负荷,主要由响应负荷最大值满足率 I_{s1} 和均值负荷满足率 I_{s2} 两部分组成,其表达如式(4)所示。

$$\begin{cases} I_s = I_{s1}I_{s2} \\ I_{s1} = \begin{cases} 1 & \max(P_a(t)) < \max(P_b(t)) \\ 0 & \max(P_a(t)) \geq \max(P_b(t)) \end{cases} \\ I_{s2} = \Delta \bar{P}_{a^*} \end{cases} \quad (4)$$

2.1.2 需求响应动态评估

令需求响应动态评估指标 I_d 表征有效动态响应负荷,主要由响应时段满足率 I_{d1} 和实际负荷满足率 I_{d2} 组成,具体有:

(1) 响应时段满足率是指从时间角度分析每个时段实际负荷是否小于该时段基线负荷的概率,如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_{d1} = \sum_{t=1}^T N(t)/T \quad t \in T \\ N(t) = \begin{cases} 1 & P_a(t) \leq P_b(t) \\ 0 & P_a(t) > P_b(t) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 实际负荷满足率是指从负荷角度评估每个时段实际负荷与目标负荷的偏差,如式(6)所示。

$$\begin{cases} I_{d2} = \sum_{t=1}^T \Delta P_{a^*}(t)/T \\ \Delta P_{a^*}(t) = \begin{cases} 0 & \Delta P_a(t) < 0.8\Delta P_t \\ \Delta P_a(t) & 0.8\Delta P_t \leq \Delta P_a(t) \leq 1.2\Delta P_t \\ 1.2\Delta P_t & \Delta P_a(t) > 1.2\Delta P_t \end{cases} \\ \Delta P_a(t) = P_b(t) - P_a(t) \quad t \in T \end{cases} \quad (6)$$

进一步地,有效动态响应负荷为:

$$I_d = I_{d1}I_{d2} \quad (7)$$

2.2 计及动态过程的需求响应用户评估修正

为避免与现有需求响应评估激励机制混淆,对单次响应用户得分评价仍采用双轨制评估方案,即单次响应用户静态评价得分如表 1 所示,而单次响应用户动态评价得分 S_d 如表 2 所示。

表 2 单次响应动态评价得分

Table 2 Dynamic evaluation score of a signal response

$I_d/\Delta P_t$	S_d	$I_d/\Delta P_t$	S_d
<50%	0	[70%,80%)	0.8
[50%,60%)	0.6	[80%,90%)	0.9
[60%,70%)	0.7	[90%,100%]	1

《广州市虚拟电厂实施细则(征求意见稿)》提出“评价得分高的用户优先”(评价得分等于用户最近 3 次参与需求响应评价得分平均值),即将表 1 评分标准作为用户群参与下一次响应的排序依据。同时为凸显精准理念,当表 1 评分等级相同时,引入表 2 动态评价得分表以进一步细分用户群体,鼓励动态评价得分高的用户拥有先调度潜力,提升优质

用户筛选的科学性和严谨性,降低无效响应用户参与度。

3 考虑贡献度的聚合商需求响应动态激励决策

3.1 用户贡献度指标

从负荷、经济 2 个维度分析用户 i 对聚合商的贡献度。

负荷贡献度 $\delta_l(i)$ 重在关注用户 i 的响应动态过程,以有效动态响应负荷与目标响应负荷的比值来表征,如式(8)所示。

$$\delta_l(i) = \frac{I_d(i)}{\Delta P_l(i)} \quad (8)$$

式中: $I_d(i)$ 为用户 i 的有效响应负荷; $\Delta P_l(i)$ 为用户 i 的目标响应负荷。

经济贡献度 $\delta_e(i)$ 表征用户 i 参与响应对聚合商的经济价值,定义为聚合商选择该用户后,相比聚合商选择该用户前,该用户对聚合商利润的提升率,如式(9)所示。

$$\delta_e(i) = I_{sl}(i) \frac{F_{a,+i} - F_{a,-i}}{F_{a,-i}} \quad (9)$$

式中: $F_{a,+i}$ 为聚合商获得用户 i 负荷后的利润; $F_{a,-i}$ 为聚合商获得用户 i 负荷前的利润。

经济贡献度的首要判断依据是响应的有效性,当响应有效性为 0 时,该用户经济贡献度也认为是 0。此处聚合商利润是指聚合商获得的电网侧激励费用减去支付给用户的激励费用,具体按照式(3)求解。

可以看出,负荷贡献度 $\delta_l(i)$ 仅与该用户响应表现有关,而经济贡献度 $\delta_e(i)$ 则是从全局角度分析该用户参与响应后对聚合商收益的影响,一定程度上也与其他用户响应表现相关。基于两者,可形成用户 i 贡献度指标 $\delta(i)$,如式(10)所示。

$$\delta(i) = \varepsilon_l \delta_l(i) + \varepsilon_e \delta_e(i) \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_l, \varepsilon_e$ 分别为 $\delta_l(i)$ 和 $\delta_e(i)$ 的权重,且满足 $\varepsilon_l + \varepsilon_e = 1$ 。

3.2 静、动态评估相结合的需求响应激励结算方案

考虑到与现有需求响应实施细则的无缝耦合和各类主体的差异化需求,提出静、动态评估相结合的聚合商需求响应激励结算机制,包括静态和动态激励两部分费用:

(1) 静态激励费用 $F_s(i)$ 。

$$F_s(i) = I_s(i) (1 - \beta) \rho_s T \quad (11)$$

式中: ρ_s 为静态激励单价,是约定值; β 为动态激励费用比例,满足 $0 \leq \beta \leq 1$ 。令 $F_{s*}(i)$ 为实施动态

激励前的激励费用,即 $F_{s*}(i) = F_s(i)$,此时 $\beta = 0$ 。

(2) 动态激励费用 $F_d(i)$ 。

$$F_d(i) = \delta(i) \Delta P_l \rho_d T \quad (12)$$

式中: ρ_d 为动态激励单价,是未知数。

那么聚合商支付给用户 i 的激励费用为:

$$F(i) = F_s(i) + F_d(i) \quad (13)$$

动态激励费用来源也是值得关注的问题,根据“谁受益、谁承担”原则,应由聚合商和用户共同承担,见图 3,具体比例可根据需求响应实施情况(例如用户参与数、需求响应补贴标准、聚合商偏好等)共同约定。 A 为聚合商获得的电网侧激励费用; $A-B$ 为聚合商支付给用户的激励费用,即用户利润; B 为聚合商利润; C 或 D 可以看作动态激励费用,其中 C 是指聚合商部分利润, D 为用户部分利润。

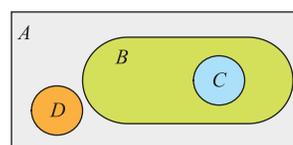


图 3 动态激励费用来源

Fig.3 Sources of dynamic incentive fee

3.3 聚合商需求响应动态激励决策模型

假设聚合商和用户约定以 $\alpha:1$ 比例承担动态激励费用,若将用户原静态激励费用 $F_{s*}(i)$ 的 β ($0 \leq \beta \leq 1$) 倍作为其承担的动态激励费用,那么聚合商侧承担的动态激励费用为 $\alpha\beta F_{s*}(i)$ 。

某次需求响应事件中,假设聚合商获得电网侧激励费用为固定值,以追求动态激励支出最小为目标,为:

$$\min G = \sum_i \alpha\beta F_{s*}(i) \quad (14)$$

(1) 动态激励费用平衡约束。

$$\sum_i F_d(i) = \sum_i \beta F_{s*}(i) (1 + \alpha) \quad (15)$$

(2) 为吸引用户参与,应确保实施动态激励后 $\mu\%$ 用户可获得的激励收益大于或等于实施前激励收益,即:

$$P(F(i) \geq F_{s*}(i)) \geq \mu\% \quad (16)$$

式中: $P(F(i) \geq F_{s*}(i))$ 为用户 i 实施后激励费用 $F(i)$ 大于等于用户 i 实施前激励费用 $F_{s*}(i)$ 的概率函数。

上述模型优化变量为 $\{\beta, \rho_d\}$,可采用遗传算法求解,具体步骤如图 4 所示。

4 算例分析

4.1 基础数据

令某聚合商拥有 8 个用户,某次需求响应实施

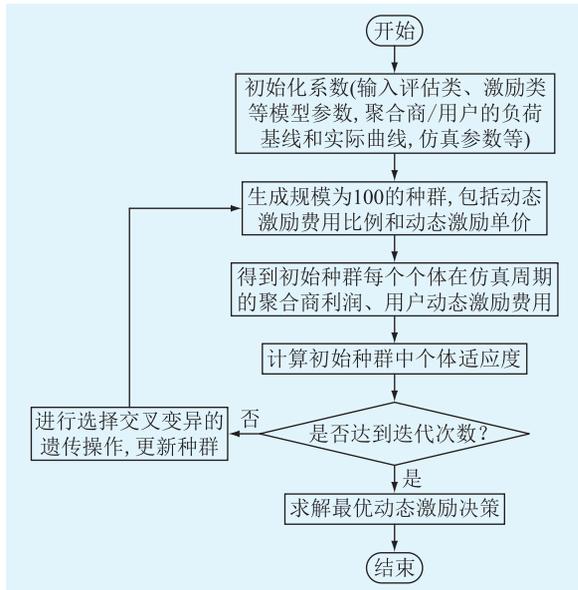


图4 模型求解过程

Fig.4 Model solving process

效果如图5和图6所示,聚合商侧数据是指聚合商所集成用户的数据之和。

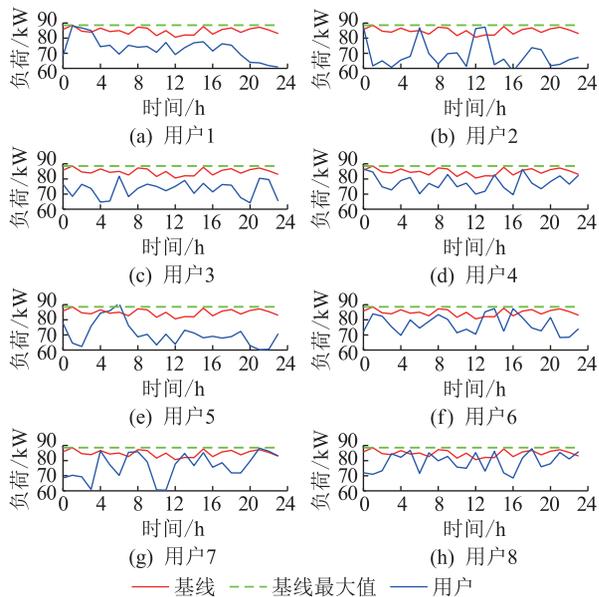


图5 某次需求响应用户互动曲线

Fig.5 Interaction curves of users in demand response

采用文献[8]中需求响应示范数据,考虑到负荷对比性和脱敏性,令所有用户基线和响应邀约量保持一致,但实际响应存在差异,以此来说明精准评估与激励的实施过程和优势。考虑到电网侧规定的响应邀约量冗余度为150%,聚合商目标响应邀约量为53.3 kW,实际响应邀约量为80 kW,单个用户响应邀约量为10 kW。

假设静态激励单价为3元/(kW·h),令 $\alpha = 1$, $\mu = 75$, $T = 24$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_e = 0.5$ 。根据式(8)一式(10),可得出用户1—用户8的贡献度,如表3所示。

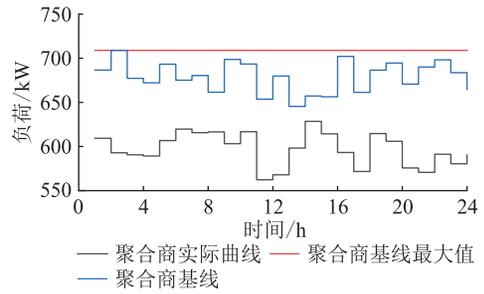


图6 某次需求响应聚合商互动曲线

Fig.6 Interaction curves of the aggregator users in demand response

表3 用户贡献度

Table 3 User contribution

用户	技术贡献度	经济贡献度	贡献度
用户1	0.774	0.24	0.388 2
用户2	0.743	0.22	0.372 6
用户3	0.83	0.27	0.416 4
用户4	0.435	0	0.217 5
用户5	0.872	0	0.436 0
用户6	0.523	0	0.261 5
用户7	0.356	0.12	0.178 6
用户8	0.291	0	0.145 5

4.2 优化结果

假设有2类场景,场景1为文中模型,场景2为现有需求响应评估与激励模型。经优化,迭代次数为36次, β 为0.12, ρ_d 为1.29元/(kW·h),可得到场景1和2下聚合商和各个用户评估和激励结果,如表4和表5所示。分析场景2仅考虑静态评估方案,有:

(1) 用户4,5,6和8为无效响应用户,未获得需求响应收益,其响应收益全部由聚合商获取,可能影响后续该类用户的参与度。

(2) 用户1,2,3和7为有效响应用户,获得需求响应收益为3 132元。

(3) 考虑到用户聚合互补效应,聚合商有效负荷为81 kW,超过目标邀约量120%以上,判定为64.0 kW,获得需求响应收益为4 608元,那么聚合商利润为1 476元,如表4所示。

表4 场景1和2下聚合商交易结果

Table 4 Trading results of aggregator in scenario 1 and scenario 2 元

参数	场景1	场景2
聚合商收益	4 608.00	4 608.00
聚合商利润	1 100.16	1 476.00

进一步地,分析场景1同时考虑静、动态过程的精准评估方案。

表5 场景1和场景2下各类用户交易结果
Table 5 Trading results of various users in scenario 1 and scenario 2

参数	用户1	用户2	用户3	用户4	用户5	用户6	用户7	用户8
场景1有效静态响应负荷/kW	11.5	12	11.6	0	0	0	8.4	0
场景1静态响应得分	1	0.8	1	0.5	0	0.8	0.8	0.5
场景1静态响应激励/元	728.64	760.32	734.976	0	0	0	532.224	0
场景1, I_{d1}	0.92	0.83	1	0.88	0.92	0.88	0.79	0.71
场景1, I_{d2}	8.42	8.95	8.3	4.94	9.48	5.95	4.5	4.1
场景1有效动态响应负荷/kW	7.74	7.43	8.3	4.35	8.72	5.23	3.56	2.91
场景1动态响应得分	0.8	0.8	0.9	0	0.9	0.6	0	0
场景1动态响应激励/元	120.77	115.91	129.52	67.66	135.64	81.35	55.56	45.26
场景1响应激励/元	849.41	876.23	864.50	67.66	135.64	81.35	587.79	45.26
场景2有效负荷/kW	11.5	12	11.6	0	0	0	8.4	0
场景2响应得分	1	0.8	1	0.5	0	0.8	0.8	0.5
场景2响应激励/元	828	864	835.2	0	0	0	604.8	0
用户响应激励变化率/%	2.59	1.42	3.51				-2.81	

1.1节中提到,用户1和用户3静态评估结果一致,难以进一步区分两者互动效果;计及动态过程评估后,用户1和用户3的动态响应得分分别为0.8和0.9,即用户3实施效果更好,在下一次调用时也将优先考虑用户3。

因用户4,5,6,8在静态评估时判为“无效响应”,静态激励为0;计及动态过程评估后,用户4,5,6,8分别获得67.66元,135.64元,81.35元和45.26元激励。也就是,尽管该类用户未能满足现有需求响应评估标准,但聚合商仍根据动态实施效果,对于该类无效响应用户给予一些激励,一定程度上可激励该类用户继续积极参与。

较于场景2,87.5%用户收益都有所增加,有效保障用户参与需求响应的积极性;对于实施效果较好的用户,如用户1,2,3,其响应激励提升幅度分别为2.59%,1.42%和3.51%,实现优质客户的定向激励。

4.3 计及场景1和2评估结果的负荷响应模拟

对所提模型实施对聚合商响应邀约量冗余度影响进行深入分析。假设用户1—用户8分别代表8类响应负荷类型,且用户1—用户7占比为10%,用户8占比为30%。按照表1“有效响应优先、响应得分优先”原则,场景2调用顺序如下。

第一序列(有效且得分为1):(1,3)→第二序列(有效且得分为0.8):(2,7)或(7,2)→第三序列(无效且得分为0.8):(6)→第四序列(无效且得分为0.5):(4,8)或(8,4)→第五序列(无效且得分为0):(5)。

按照表1原则,对于同一序列内用户群无法细

分,仅有可采用随机调用方式,随机选取优化前调用顺序为:→1→3→7→2→6→4→8→5。

场景1下,按照“有效响应优先、响应得分优先、动态响应评价得分优先”原则,场景1调用顺序如下。

优化后:→3→1→2→7→6→4→8→5。

假设下次需求响应事件中,调用用户数比例为30%,场景1和场景2每时段响应负荷如图7所示。

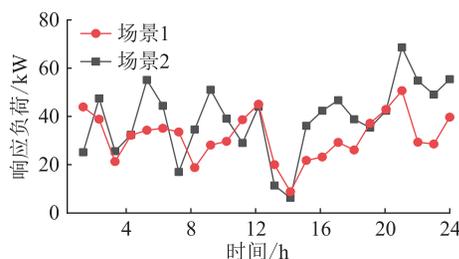


图7 计及场景1和2评估结果的负荷响应模拟
Fig.7 Load response simulation with evaluation results of scenario 1 and scenario 2

图7中,以相邻负荷绝对值均值表征平滑度系数 η ,可表示为:

$$\eta = \frac{\sum_{t \in T} |P(t+1) - P(t)|}{T} \quad (17)$$

经计算,场景1和2下 η_1, η_2 分别为9.3 kW和16.4 kW,即场景1响应负荷出力更加平滑,将有效规范用户响应精准度,进一步优化聚合效果,减少响应邀约量冗余度,继而减少激励支出。

4.4 邀约量冗余度敏感度分析

在1.1节较为粗放的评估模式下,不可避免地会产生邀约量冗余度过高的问题。随着所提精准

评估与动态激励机制的实施,将有效降低聚合商邀约量冗余度。考虑可能带来违约风险,图8分别计算不同风险值下邀约量冗余度从150%下降至110%时聚合商利润的变化趋势。

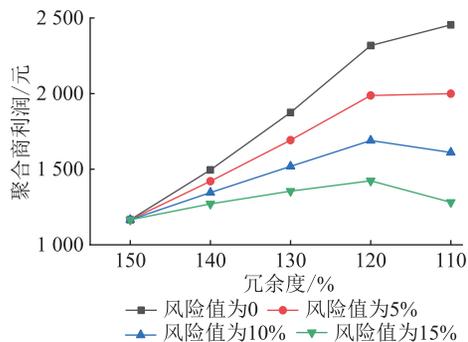


图8 不同邀约量冗余度下聚合商利润

Fig.8 Aggregator profits under different offer redundancy

当风险值为0时,随着冗余度每降低10%,利润提升率持续增加,当冗余度降至110%时,聚合商利润提升88.97%,收益相当可观,精准度提升后邀约量冗余度下降将极大提升聚合商收益水平。与此相反,当风险值为15%(冗余度每提高10%,聚合商利润下降15%)时,聚合商利润增长较为缓慢,冗余度达到110%,为1281.41元,利润较冗余度150%时反而下降,这说明须同时兼顾聚合精准性和风险问题,避免出现需求响应市场违约行为。

综上所述,较于现有需求响应方案,文中所提需求响应精准评估和动态激励机制有如下优势。

对于聚合商来说,具体有:一是通过精准评估建模实现面向基线需求的精准追踪,降低响应邀约量冗余度和参与用户数,减少过于响应带来的电费损失,提高需求响应互动品质;二是通过优选优质响应用户并实现定向激励,减少需求响应实施风险;三是通过对未有效响应用户的全面合理评价,提高该类用户的参与积极性。

对于用户来说,通过更为全面的需求响应评估体系来精细化引导响应行为,避免用户响应过度、过小等情况,在保证需求响应收益水平的同时,有效降低对生产生活的影响。

5 结语

为进一步提升聚合商和用户的需求响应效益,文中在延续现有需求响应评估激励机制基础上,更加关注每个用户的动态响应品质,构建考虑静态、动态过程的需求响应精准评估体系;接着,从经济和负荷维度提出用户贡献度指标,建立考虑贡献度的聚合商需求响应动态激励决策模型,在保证绝大部

分用户利益不受损的前提下,给予优质用户奖励,实现激励精准定位,提升需求响应互动品质,以促进需求响应项目健康、常态化发展。

随着我国用户侧碳计量稳步推广,未来将在贡献度建模时引入环境因素,构建计及经济、负荷和环境因素的用户贡献度指标,加强需求响应实施过程中对碳排放影响的考量。

参考文献:

- [1] 张亮,李章溢,裴玮,等. 基于综合需求响应的工业园区联络线功率控制[J]. 电力工程技术,2021,40(3):106-113.
ZHANG Liang, LI Zhangyi, PEI Wei, et al. Tie-line power control method for an industrial park based on integrated demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021,40(3):106-113.
- [2] 王宣元,刘敦楠,刘秦,等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术,2019,43(9):3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3175-3183.
- [3] 黄开艺,艾芊,张宇帆,等. 基于能源细胞-组织架构的区域能源网需求响应研究挑战与展望[J]. 电网技术,2019,43(9):3149-3160.
HUANG Kaiyi, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Challenges and prospects of regional energy network demand response based on energy cell-tissue architecture[J]. Power System Technology, 2019,43(9):3149-3160.
- [4] 刘春蕾,庞鹏飞,石纹赫,等. 计及碳中和效益及清洁能源消纳的虚拟电厂双层协同优化调度[J]. 供用电,2021,38(9):19-27.
LIU Chunlei, PANG Pengfei, SHI Wenhe, et al. Taking into account carbon neutrality benefit and clean energy consumption of virtual power plant two-layer cooperative optimization dispatching[J]. Distribution & Utilization, 2021,38(9):19-27.
- [5] 李彬,赵燕玲,魏吟斌,等. 碳中和背景下的需求侧资源互动关键支撑技术研究[J]. 供用电,2021,38(9):3-9,18.
LI Bin, ZHAO Yanling, WEI Yinwu, et al. Research on key supporting technologies of demand side resource interaction under the background of carbon neutral[J]. Distribution & Utilization, 2021,38(9):3-9,18.
- [6] 张立辉,戴谷禹,聂青云,等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(24):154-163.
ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(24):154-163.
- [7] 黄剑平,陈皓勇,林镇佳,等. 需求侧响应背景下分时电价研究与实践综述[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(9):178-187.
HUANG Jianping, CHEN Haoyong, LIN Zhenjia, et al. A sum-

- mary of time-of-use research and practice in a demand response environment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9):178-187.
- [8] 陈璐,徐青山,杨永标,等. 促进削峰填谷的居民实时积分套餐优化设计[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7):134-142.
CHEN Lu, XU Qingshan, YANG Yongbiao, et al. Optimization design of residents's real-time score plan for promoting peak-load shifting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):134-142.
- [9] 陈璐,杨永标,徐青山. 基于时变互补特性的聚合空调调控及恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13):39-47.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, XU Qingshan. Coordinated control and recovery strategy for aggregated air-conditioner based on time-variant complementary characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13):39-47.
- [10] 王冬,王拓,王旗,等. 一种面向需求响应资源的模糊聚类算法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14):4056-4063,4311.
WANG Dong, WANG Tuo, WANG Qi, et al. A fuzzy C-means clustering algorithm for demand-side response resource [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14):4056-4063,4311.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 需求响应效果监测与综合效益评价导则:GB/T 32127—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for monitoring effect and comprehensive benefit evaluation of demand response: GB/T 32127-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [12] 李作锋,陈振宇. 江苏电力需求响应的探索和实践[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1):4-8.
LI Zuofeng, CHEN Zhenyu. The exploration and practice of Jiangsu power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1):4-8.
- [13] 马礎劼,徐正安. 江苏电网“填谷”需求响应的探索与实践[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6):50-52.
MA Jinjie, XU Zhengang. The exploration and practice of 'valley shaft' demand response in Jiangsu grid[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):50-52.
- [14] 万灿,贾妍博,李彪,等. 城镇能源互联网能源交易模式和用户响应研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14):29-40.
WAN Can, JIA Yanbo, LI Biao, et al. Research status and prospect of energy trading mode and user demand response in urban energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14):29-40.
- [15] 高赐威,李倩玉,李慧星,等. 基于负荷聚合商业的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17):78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17):78-86.
- [16] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰. 电动汽车聚合商参与调频备用的调度方法与收益分成机制[J]. 电网技术, 2021, 45(3):1041-1050.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Dispatching and income distributing of electric vehicle aggregators's participation in frequency regulation[J]. Power System Technology, 2021, 45(3):1041-1050.
- [17] MARIANO-HERNÁNDEZ D, HERNÁNDEZ-CALLEJO L, ZORITA-LAMADRID A, et al. A review of strategies for building energy management system: model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33:101692.
- [18] 刘珮云,丁涛,贺元康,等. 基于综合需求响应的负荷聚合商最优市场交易策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):224-231.
LIU Peiyun, DING Tao, HE Yuankang, et al. Optimal trading strategy for load aggregator based on integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):224-231.
- [19] 姚建国,张凯锋,丁哲通,等. 动态需求响应概念扩展及研究重点[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14):207-215.
YAO Jianguo, ZHANG Kaifeng, DING Zhetong, et al. Concept extension and research focus of dynamic demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14):207-215.
- [20] 陈璐,杨永标,颜庆国,等. 一种以负荷限值为目标的需求响应效果评估方法:CN104715424B[P]. 2018-06-05.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, YAN Qingguo, et al. Demand response effect evaluation method by taking load limit as goal: CN104715424B[P]. 2018-06-05.
- [21] 陈璐,杨永标,周静,等. 一种模拟调峰机组的需求响应调度评估体系构建方法:CN105160149B[P]. 2017-12-01.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, ZHOU Jing, et al. Method for constructing demand response scheduling evaluation system of simulated peak-shaving unit: CN105160149B[P]. 2017-12-01.
- [22] 谢畅,王蓓蓓,李然,等. 基于信用等级虚拟电厂需求响应效果后评估[J]. 电力建设, 2017, 38(9):67-72.
XIE Chang, WANG Beibei, LI Ran, et al. Post-evaluation of demand response effects in virtual power plant based on credit rating[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9):67-72.
- [23] 张晶晶,张鹏,吴红斌,等. 负荷聚合商参与需求响应的可靠性及风险分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12):3526-3533.
ZHANG Jingjing, ZHANG Peng, WU Hongbin, et al. Reliability and risk analysis of load aggregators in demand response [J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(12):3526-3533.
- [24] 杨秀,傅广努,刘方,等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2):699-714.

- YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors[J]. Power System Technology, 2022, 46(2):699-714.
- [25] 徐佳敏, 孙英云, 孙芊, 等. 虚拟电厂有功调度综合评价指标体系[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(3):32-39.
- XU Jiamin, SUN Yingyun, SUN Qian, et al. A comprehensive evaluation index system of VPP participating in active power dispatching[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(3):32-39.
- [26] 范帅, 郝琨琪, 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, JIA 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.

作者简介:



黄莉

黄莉(1985),女,博士在读,研究方向为大数据分析和电力需求响应(E-mail:375413708@qq.com);

周赣(1978),男,博士,副教授,研究方向为GPU并行计算、用户负荷智能感知和低压配网状态分析;

张娅楠(1996),女,博士在读,研究方向为电力需求响应。

Accurate evaluation and dynamic incentive decision of aggregators' demand response considering contribution degree

HUANG Li¹, ZHOU Gan¹, ZHANG Yanan¹, SHAO Xuesong², CUI Gaoying²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Nanjing 210019, China)

Abstract: Under the background of dual carbon strategy and coal shortage, the existing demand response mechanism of evaluation and incentive is relatively extensive, causing challenges such as excessive redundancy of invitation and difficulty in mining high-quality users, so the accurate evaluation and dynamic incentive decision method of aggregators' demand response considering contribution degree is proposed. Firstly, the accurate evaluation system of demand response considering static and dynamic process is developed and the static evaluation follows the existing demand response evaluation system at the grid side, while the dynamic evaluation focuses on the consistency between the actual load and the target load in each period. Then, the user contribution index is described from the economic and load dimensions, and a two-part incentive settlement scheme with static and dynamic evaluation is designed. Based on that, the dynamic incentive decision model of aggregator's demand response with the contribution degree is got. Finally, the extensive numerical study confirms that the proposed method can achieve the directional incentive of high-quality users, thus improving the response quality and reducing the invitation redundancy without affecting the existing demand response system.

Keywords: demand response; contribution degree; dynamic excitation; accurate assessment; directional excitation; effective response

(编辑 李栋)