

初期现货市场下考虑用户响应行为的需求响应机制设计

尹逊虎¹, 丁一¹, 惠红勋², 包铭磊¹, 徐立中³, 唐学用^{4,1}, 桑茂盛¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学), 澳门 999078;
3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省杭州市 310007; 4. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州省贵阳市 550033)

摘要: 在中国电力现货市场建设初期, 电力用户参与市场的方式及响应行为具有较大差异。高比例用户受电网公司管理间接参与市场, 无法主动响应市场的动态价格, 但其固有的用电行为会影响市场价格, 甚至导致电力供需紧张场景下出现极端价格。为此, 考虑到高比例间接参与市场的用户在前期的负荷调整能力, 设计了适用于初期现货市场的需求响应机制。首先, 建立了考虑不同用户响应行为的需求响应机制框架, 提出了需求响应机制的触发条件, 并进一步分析了该机制框架下用户参与需求响应的机理。然后, 构建了考虑间接参与用户主动响应的市场出清模型, 并提出了保证需求响应机制可持续运行的结算方法。最后, 通过算例验证了所提机制的合理性及有效性。

关键词: 初期现货市场; 响应行为; 需求响应; 出清模型; 结算方法

0 引言

2015年3月,《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9号)^[1]的发布拉开了中国新一轮电力体制改革的序幕。随着电力市场改革的深入, 以年度和月度交易为主的电量市场逐渐发展为更小时间尺度的电力现货市场^[2]。目前, 中国的电力现货市场处于初期阶段, 需求侧参与规模有限^[3]。在新一轮电力体制改革稳步推进的背景下, 为了优化电力资源配置、促进市场合理电价的形成、提高市场运行效率, 亟须围绕电力开展需求响应机制设计^[4-9]。

目前, 国外电力市场已经形成了较为完善的需求响应市场体系。例如, 美国得克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)电力市场为需求响应提供了丰富的参与形式, 负荷资源可以参与日前或实时现货市场竞价, 也可以参与辅助服务市场提供备用服务^[10-16]。然而, 国外的需求响应机制依托于成熟的电力市场体系, 并不适用于中国尚未成熟的电力市场环境^[17]。在中国, 江苏、上海、北京和佛山等省市分别开展了需求响应的试点工作, 都取得了较好的效果^[18-20]。但国内当前的需求响应项目均未在现货市场背景下开展, 难以发挥现货市场的动态电价信号对用户需求响应的引导作用^[21-23]。

国内外已有相关机构和学者针对需求响应参与电力现货市场的机制进行研究。文献[24]在考虑可转移负荷或紧急参与需求响应的资源后求解日前市场的节点电价。文献[25]在日前市场的优化调度中考虑需求响应交易市场, 系统运营商通过购买需求响应资源减少系统运行成本。文献[26]在用户报量不报价方式下的电力现货市场中对用户日前申报负荷进行弹性化修正, 提出了相应的需求响应市场机制。然而, 现有研究均忽略了市场建设初期用户参与市场的方式及响应行为的差异性, 无法直接应用于当前中国电力现货市场。

中国的初期现货市场往往只允许部分大用户直接参与市场, 其他用户(如居民用户和中小工商业用户)由电网公司统一进行负荷预测而间接参与市场。以浙江省为例, 浙江现货市场初期仅允许110 kV及以上电压等级用户直接参与市场, 这些用户能够对现货市场价格信号做出响应; 110 kV以下的用户受电网公司管理, 其整体的负荷预测值作为市场出清的边界条件, 这些用户无法向市场报价, 依然采用由政府指导制定的目录电价, 无法根据现货市场的动态价格做出响应^[27-28]。由于间接参与市场的用户占系统总负荷比重较大, 其固有的用电行为可能会加剧系统的供需矛盾, 导致现货市场的极端价格频繁出现, 降低现货市场运行效率^[29-30]。

为解决间接参与市场的用户由于缺乏需求侧弹性给市场和系统带来的上述问题, 亟须研究初期电力现货市场的需求响应机制。本文的主要贡献可以

收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2021-05-13。
国家电网公司科技项目(5211HZ200008)。

归纳为:①充分考虑不同用户市场参与程度及响应行为的差异性,设计了适用于初期现货市场的需求响应机制;②基于所设计的需求响应机制框架,构建了考虑间接参与用户主动响应的市场出清模型;③提出了需求响应机制的结算方法,保证用户的需求响应收益具有稳定的资金来源,以提高需求响应机制的可持续性。

1 考虑不同用户响应行为的需求响应机制

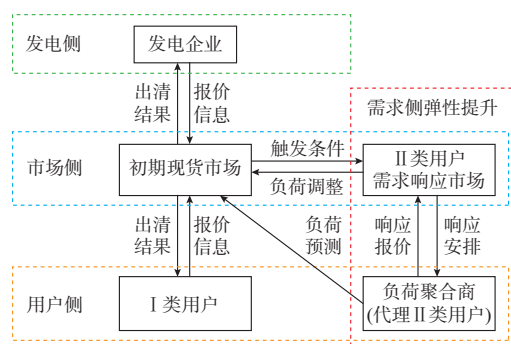
1.1 需求响应机制的框架设计

在电力现货市场建设初期,按照市场参与方式及响应行为,可以将全社会的电力用户分为2类:直接参与市场的用户统称为Ⅰ类用户,受电网公司管理而间接参与市场的用户统称为Ⅱ类用户。高比例的Ⅱ类用户无法响应现货市场价格,会导致初期现货市场缺乏需求侧弹性,进而引起电价风险等问题,为此,本文设计了初期现货市场需求响应机制,旨在挖掘Ⅱ类用户的需求响应潜力。

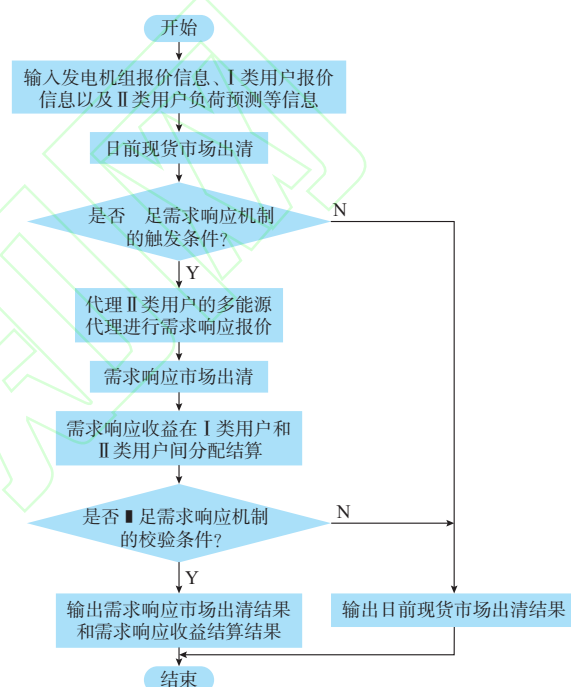
在当前初期现货市场架构下,Ⅱ类用户采用固定电价结算,无法接收现货市场的价格信号,不具有改变自身用电行为的动机,因而不具备需求侧弹性。Ⅱ类用户的基数大、分散性较强,但单个Ⅱ类用户体量较小、弹性水平低,因此单一用户不适于直接实施需求响应,可以通过需求响应负荷聚合商(下文简称负荷聚合商)将部分Ⅱ类用户聚合起来,作为提供需求响应的实体^[31]。负荷聚合商可以与所代理的Ⅱ类用户签订需求响应合同以获得一定的负荷控制权,并在极端价格等触发信号的引导下代理Ⅱ类用户参与Ⅱ类用户需求响应市场(下文简称需求响应市场),从而使得Ⅱ类用户能够参与需求响应。

此外,初期电力现货市场包括日前现货市场和实时现货市场。在日前现货市场中,用户有充足的时间提前量去调整生产计划,负荷聚合商也能够调控所代理的用户以改变其用电行为;而在实时现货市场中,用户难以在短时间内做出大幅度的响应^[32],因此本文仅考虑Ⅱ类用户负荷在日前市场下的需求响应。基于此,考虑不同用户响应行为的初期现货市场需求响应机制框架及流程如图1所示。

首先,初期日前电力现货市场将Ⅱ类用户整体的负荷预测值作为边界条件,基于发电企业和Ⅰ类用户的报价信息,通过日前现货市场出清模型出清得到市场交易结果。在电力系统出现供需矛盾、日前市场极端价格满足需求响应机制的触发条件时,会启动Ⅱ类用户需求响应市场。由负荷聚合商代理Ⅱ类用户进行报价,需求响应市场根据负荷聚合商



(a) 机制框架



(b) 流程图

图1 考虑不同用户响应行为的初期现货市场需求响应机制框架及流程图

Fig. 1 Framework and flow chart of demand response mechanism of initial electricity spot market considering different customers' response behaviors

申报的需求调整量及期望价格,基于电力现货市场的报价信息和边界条件,通过需求响应市场出清模型出清得到考虑需求响应后的市场出清结果,包括各负荷聚合商的需求响应调整计划和响应价格。此后,通过需求响应结算方法将需求响应收益在Ⅰ、Ⅱ类用户之间进行分配,同时验证是否满足需求响应机制的校验条件。在通过校验后,使用需求响应市场出清结果和收益结算结果代替原日前市场出清结果,否则仍使用原日前市场的出清结果。

在时间顺序上,需求响应市场位于初期现货市场下的日前市场与实时市场之间,本质上是提供必要的需求侧调节资源来应对电网供需紧张时出现的日前极端电价,其不影响初期现货市场中的日前市

场与实时市场的原有运行规则。需求响应市场与初期现货市场的时序结构如图2所示,图中的红色虚线框表示只有日前现货市场的电价满足触发条件时,才会运行需求响应市场。

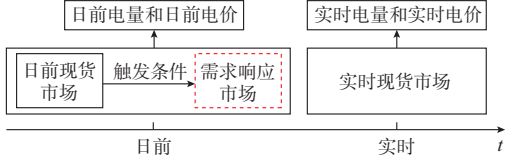


图2 初期现货市场与需求响应市场的时序结构
Fig. 2 Timing structure of initial spot market and demand response market

Ⅱ类用户需求响应市场是对初期现货市场的补充和完善,通过需求响应市场的引入和负荷聚合商的代理,可以使Ⅱ类用户具备提供需求响应的条件,从而实现Ⅱ类用户与初期现货市场的间接互动,解决现阶段需求侧弹性缺失带来的系统风险和市场运行效率低的问题,保证电力现货市场的稳定运营。

1.2 需求响应机制的触发条件

目前,Ⅱ类用户的需求响应意识薄弱,且负荷聚合商也难以收集Ⅱ类用户所有时段的用能诉求等信息。因此,现阶段的初期现货市场尚不具备实现全时段需求响应的条件^[33],需要设定初期现货市场下需求响应机制的触发条件。

首先,为实现需求响应与现货市场的有效融合,利用现货市场的电价信号引导Ⅱ类用户参与需求响应是触发条件的首要选择。考虑到在电力现货市场初期,市场出清电价存在人为确定的上下限,在电力供给紧张或电力需求不足的情况下,市场出清电价可能超出价格上限或低于下限,此时电价将被限制在上限或下限,价格不再由市场供需关系决定,进而降低了现货市场的运行效率。为此,可以将超过上下限的极端出清电价作为信号引导Ⅱ类用户调整自身用电模式,即

$$\rho_{1t} \leq \rho_{\min} \quad (1)$$

$$\rho_{1t} \geq \rho_{\max} \quad (2)$$

式中: ρ_{1t} 为日前现货市场在 t 时段出清的价格; ρ_{\max} 和 ρ_{\min} 分别为日前现货市场价格的上、下限。

此外,在系统安全可靠运行受到威胁时,系统的削峰填谷需求也作为需求响应机制的触发条件。来自需求侧的调峰资源调节方式比较灵活,且没有最低出力限制,在电力负荷的高峰或低谷时段,可以把系统的削峰填谷需求作为触发信号,通过需求响应市场引导Ⅱ类用户调整用电计划,使得原本刚性的Ⅱ类用户负荷成为系统的需求侧调节资源,从而增

强系统的弹性调节能力;进而降低系统峰谷差,缓解系统供需矛盾,减少发电侧调峰资源的投资,提高系统可靠性和经济性。

本文将以前述市场出清价格超过上限作为触发条件为例,分析考虑不同用户响应行为的需求响应机理。

1.3 需求响应机制的机理分析

电力现货市场初期实行全电量竞价上网和边际电价出清,Ⅰ类用户具有向下倾斜的需求报价线,Ⅱ类用户具有通过负荷预测得到的垂直无弹性线,出清时使用的负荷曲线为2条线的叠加,因此,Ⅱ类用户的需求预测值会影响市场出清的结果,如图3(a)所示。图中, $\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_D, \rho_E$ 和 d_A, d_B, d_C, d_D, d_E 分别为点A、B、C、D、E所对应的价格和负荷。

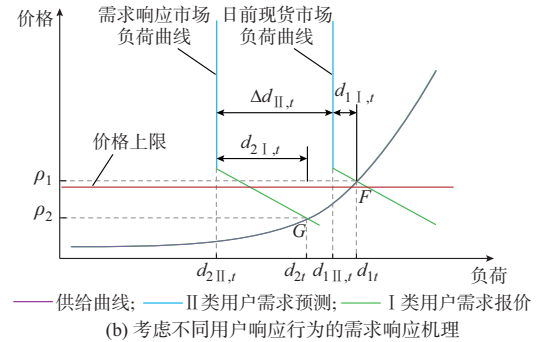
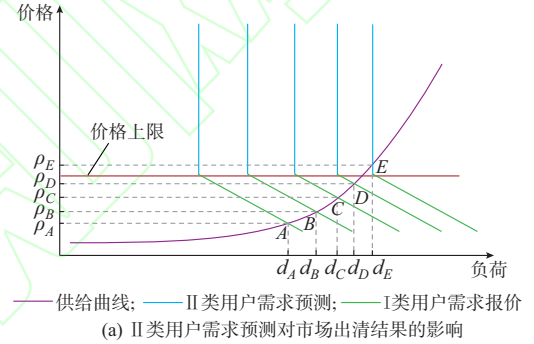


图3 需求响应机制的机理分析
Fig. 3 Analysis of demand response mechanism

当Ⅱ类用户需求预测值较小时,市场出清电价较低,Ⅰ类用户成交电量较高,如点A所示。随着Ⅱ类用户需求预测值的逐渐增大,负荷曲线向右移动,出清点依次移至点B、C、D、E,市场出清电价随之升高,Ⅰ类用户的成交电量逐渐降低。在点E所示的极端情况下,Ⅰ类用户的成交电量甚至降为0,且此时出清电价过高,市场价格将被限制在价格上限。因此,Ⅱ类用户的用电需求预测可以影响Ⅰ类用户的日前用电价格和成交电量,在供需紧张时可能导致出清价格过高而无法被采用、市场效率低下。

针对此问题,本文提出初期现货市场下考虑不

同用户响应行为的需求响应机制,通过极端高电价触发需求响应市场,以激励Ⅱ类用户参与需求响应,调节日前用电行为,在其自身获得补贴的同时,能够降低Ⅰ类用户的日前电价,增加Ⅰ类用户的成交电量,如图3(b)所示。

在日前现货市场,Ⅱ类用户在 t 时段的需求预测值为 $d_{11,t}$,市场出清结果如点 F 所示,该时段的电价为 ρ_{1t} ,Ⅰ类用户的成交电量为 $d_{11,t}$ 。如果出清电价 ρ_{1t} 高于价格上限,需求响应市场可以在该时段通过负荷聚合商引导Ⅱ类用户调整用电计划,使Ⅱ类用户的需求预测值减小至 $d_{21,t}$,从而使负荷曲线向左移动,市场出清点移至点 G ,此时出清电价降低为 ρ_{2t} ,Ⅰ类用户成交电量增加为 $d_{21,t}$ 。

需求响应带来市场出清电价的降低会使Ⅰ类用户获得直接收益,在本文机制下,出清电价降低带来的总收益将分为2个部分:一部分保留为Ⅰ类用户的净收益,保证Ⅰ类用户的实际用电价格在需求响应后降低;另一部分作为代理Ⅱ类用户的负荷聚合商的需求响应补贴。对实际执行需求响应的负荷聚合商而言,其所需的需求响应补贴取决于总需求调整量 $\Delta d_{11,t}$ 对应的边际报价 $\rho_{DR,t}$ 。

2 考虑Ⅱ类用户主动响应的市场出清模型

为实现本文所设计的初期现货市场需求响应机制,将分别建立日前现货市场和需求响应市场的出清模型。如前文所述,现阶段的初期现货市场尚不具备实现全时段需求响应的条件,因此,在初期现货市场运行中,仍以原现货市场出清模型为主,当出现系统供需矛盾或市场极端电价风险,即满足需求响应机制的触发条件时,才使用需求响应市场的出清模型进行优化出清,得到需求侧调整后的市场交易结果,进而引导Ⅱ类用户实施需求响应。

2.1 日前现货市场出清模型

2.1.1 日前现货市场出清模型目标函数

日前现货市场出清模型以社会总福利最大为目标,社会总福利等于用户总效益与发电总成本之差。在日前现货市场中,用户总效益包括Ⅰ类用户的用电效益和Ⅱ类用户的用电效益;发电总成本包括发电机组启停成本和运行成本。其中,Ⅰ类用户的用电效益和发电企业的运行成本可以通过其市场报价来衡量。在初期现货市场中,Ⅱ类用户无法报价,其负荷预测值作为市场出清模型的刚性边界条件,因此Ⅱ类用户的用电效益等效为比较大的常数。日前现货市场的出清模型如下。

$$\begin{cases} \max F_1 = R_I + R_{II} - C_G \\ R_I = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{1d}} R_{1j,t}(d_{1j,t}) \\ C_G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (S_i u_i(t)(1 - u_i(t-1)) + C_{Gi,t}(P_{Gi,t})) \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_1 为现货市场下的社会总福利; R_I 为Ⅰ类用户的用电效益; R_{II} 为Ⅱ类用户的用电效益,是一个比较大的常数; C_G 为发电企业的发电成本,包括机组启停成本和运行成本; T 为时段数; N_{1d} 为Ⅰ类用户个数; $d_{1j,t}$ 为Ⅰ类用户 j 在 t 时段的负荷功率; $R_{1j,t}(d_{1j,t})$ 为Ⅰ类用户 j 在 t 时段对应负荷功率 $d_{1j,t}$ 的报价; N_G 为发电机组数; S_i 为机组 i 的启动费用; $u_i(t)$ 为表征机组 i 在 t 时段开停机状态的0-1变量,机组为开机状态时 $u_i(t)=1$,机组为停机状态时 $u_i(t)=0$; $P_{Gi,t}$ 为机组 i 在 t 时段的有功功率; $C_{Gi,t}(P_{Gi,t})$ 为机组 i 在 t 时段的运行成本,是根据机组申报的各段功率区间和对应电能量价格确定的多段线性函数。

2.1.2 日前现货市场出清模型约束条件

日前现货市场出清模型的约束条件主要包括系统约束、网络约束、机组约束等,具体如下。

1) 系统约束

系统功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi,t} = d_t = d_{11,t} + \sum_{j=1}^{N_{1d}} d_{1j,t} \quad (4)$$

式中: d_t 为所有用户在 t 时段的总负荷功率; $d_{11,t}$ 为Ⅱ类用户在 t 时段的负荷预测功率。

系统备用约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} u_i(t) P_{Gi,t}^{\max} \geq (1+r)d_t \quad (5)$$

式中: $P_{Gi,t}^{\max}$ 为机组 i 在 t 时段的最大发电功率; r 为系统备用系数。

2) 网络约束

线路潮流约束为:

$$-P_l^{\max} \leq \sum_{i=1}^{N_G} T_{l,i} P_{Gi,t} - \sum_{k=1}^K T_{l,k} d_{k,t} \leq P_l^{\max} \quad (6)$$

式中: P_l^{\max} 为线路 l 的潮流传输容量; $T_{l,i}$ 为机组 i 所在节点对线路 l 的潮流转移分布因子; $T_{l,k}$ 为节点 k 对线路 l 的潮流转移分布因子; K 为系统节点数; $d_{k,t}$ 为节点 k 在 t 时段的母线负荷功率。

3) 机组约束

根据发电机组分功率段报价的特点,对发电机组的运行成本建模如下^[34]。

$$C_{Gi,t}(P_{Gi,t}) = \sum_{m=1}^M C_{Gi,t,m} P_{Gi,t,m} \quad (7)$$

$$P_{Gi,m}^{\min} \leq P_{Gi,t,m} \leq P_{Gi,m}^{\max} \quad (8)$$

式中: M 为机组申报功率分段数; $C_{Gi,t,m}$ 为机组 i 在 t 时段对第 m 个发电功率区间的报价; $P_{Gi,t,m}$ 为机组 i 在 t 时段对第 m 个发电功率区间的中标功率; $P_{Gi,m}^{\max}$ 和 $P_{Gi,m}^{\min}$ 分别为机组 i 在第 m 个发电功率区间的最大和最小功率。

除此以外,发电机组的约束条件还包括机组出力上下限约束、机组爬坡约束、机组最小启停时间约束等^[34]。

2.2 需求响应市场出清模型

2.2.1 需求响应市场出清模型目标函数

需求响应市场出清模型的目标是使考虑Ⅱ类用户需求响应的所有市场参与者的社会总福利最大。与现货市场相比,需求响应市场的总成本增加了Ⅱ类用户的需求响应成本,具体如下。

$$\begin{cases} \max F_2 = R_I + R_{II} - C_G - C_{II} \\ C_{II} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{II,d}} C_{II,j,t}(\Delta d_{II,j,t}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_{II} 为Ⅱ类用户的需求响应成本; $N_{II,d}$ 为代理Ⅱ类用户的负荷聚合商总数; $\Delta d_{II,j,t}$ 为负荷聚合商 j 在 t 时段的负荷功率变化量; $C_{II,j,t}(\Delta d_{II,j,t})$ 为负荷聚合商 j 在 t 时段对应负荷功率变化量 $\Delta d_{II,j,t}$ 的报价。

2.2.2 需求响应市场出清模型约束条件

需求响应市场出清模型的约束条件主要包括系统约束、网络约束、机组约束、需求响应约束以及校验条件等,具体如下。

1) 系统约束

系统约束包括系统功率平衡约束和系统备用约束,其中系统备用约束详见式(5)。考虑Ⅱ类用户的需求响应后,系统功率平衡约束可表示为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi,t} = d_t = \left(d_{II,t} - \sum_{j=1}^{N_{II,d}} \Delta d_{II,j,t} \right) + \sum_{j=1}^{N_{I,d}} d_{Ij,t} \quad (10)$$

式中: $d_{II,t}$ 为负荷聚合商 j 在 t 时段的负荷功率。

2) 网络约束

网络约束主要指线路潮流约束,详见式(6)。

3) 机组约束

机组约束包括机组出力上下限约束、机组爬坡约束、机组最小启停时间约束以及机组运行成本建模约束等,与日前现货市场出清模型相同,其中机组运行成本建模约束详见式(7)和式(8)。

4) 需求响应约束

Ⅱ类用户参与需求响应的负荷功率变化量约

束为:

$$\Delta d_{II,j,\min} \leq \Delta d_{II,j,t} \leq \Delta d_{II,j,\max} \quad (11)$$

式中: $\Delta d_{II,j,\max}$ 和 $\Delta d_{II,j,\min}$ 分别为负荷聚合商 j 参与需求响应的负荷功率变化量的上、下限。

负荷聚合商 j 在 t 时段的负荷功率变化量 $\Delta d_{II,j,t}$ 可以表示为需求响应前后负荷聚合商负荷功率的差值,即

$$\Delta d_{II,j,t} = d_{1,II,j,t} - d_{2,II,j,t} \quad (12)$$

式中: $d_{1,II,j,t}$ 为未参与需求响应时负荷聚合商 j 在 t 时段的负荷,可以根据天气因素、用户历史负荷数据等信息预测得到; $d_{2,II,j,t}$ 为需求响应市场出清后负荷聚合商 j 在 t 时段的负荷,在前面预测值的基础上考虑需求响应调整后的结果。

负荷聚合商的需求响应持续时间约束为:

$$T_{II,j,\min} \leq T_{II,j,t} \leq T_{II,j,\max} \quad (13)$$

式中: $T_{II,j,t}$ 为负荷聚合商 j 的需求响应持续时间, $T_{II,j,\max}$ 和 $T_{II,j,\min}$ 分别为其上、下限。

3 需求响应机制的结算方法

目前,国内现有需求响应项目或机制的市场化程度较低,参与用户的收益绝大部分来自国家政策补贴,这样的模式是不可持续的,随着补贴的逐渐减少,用户参与积极性将随之下降。另外,固定的政策补贴也难以合理反映需求响应的实际成本,不利于发掘用户的需求响应潜力^[21]。区别于传统需求侧管理由政府政策补贴的机制,本文考虑通过需求响应报价来反映需求响应成本,将需求响应作为市场主体(即Ⅰ类用户和发电商)带来的部分收益按照边际报价分给成功响应的用户,从而减少政府开支,提高用户参与需求响应的积极性和电力现货市场初期需求响应机制的可持续性。

当需求响应由市场极端高电价或系统调峰需求触发时,Ⅰ类用户拟获得的总收益等于其成交电量与需求响应市场出清前后市场价格差的乘积,即

$$R_{DR,t} = d_{2I,t}(\rho_{th} - \rho_{2t}) \quad (14)$$

式中: $R_{DR,t}$ 为Ⅰ类用户在 t 时段拟获得的总收益; ρ_{th} 为市场出清价格上限,考虑到现货市场中需求响应机制的触发条件,需求响应市场出清前Ⅰ类用户在 t 时段使用的电价即为 ρ_{th} 。

Ⅰ类用户拟获得的总收益将划分给Ⅰ类用户和代理Ⅱ类用户的负荷聚合商,即

$$R_{DR,t} = R_{II,t} + R_{I,t} \quad (15)$$

式中: $R_{II,t}$ 为Ⅱ类用户在 t 时段分得的收益; $R_{I,t}$ 为Ⅰ类用户在 t 时段分得的收益。

负荷聚合商分得的收益 $R_{II,t}$ 用于弥补其执行需

求响应的成本,可根据负荷聚合商的需求调整量 $\Delta d_{II,t}$ 和边际需求响应报价 $\rho_{DR,t}$ 进行计算:

$$R_{II,t} = \Delta d_{II,t} \rho_{DR,t} \quad (16)$$

由于负荷聚合商申报的期望价格一般等于或者高于其引导II类用户实施需求响应的成本,按照边际需求响应报价 $\rho_{DR,t}$ 计算负荷聚合商的收益能够提高其参与需求响应的积极性。

I类用户分得的收益 $R_{I,t}$ 作为I类用户实际净收益,等于I类用户成交量与需求响应前后I类用户实际用电价格差的乘积:

$$R_{I,t} = d_{2I,t} (\rho_{th} - \rho_{I,t}) \quad (17)$$

式中: $\rho_{I,t}$ 为需求响应市场出清后I类用户在 t 时段的实际用电价格。

为了避免负荷聚合商的需求响应收益过高导致I类用户无法获得净收益,需求响应市场出清后需要对各个时段的结果进行校验,即

$$R_{I,t} \geq 0 \quad (18)$$

只有经校验满足式(18)时,需求响应市场在 t 时段的出清结果才真正有效,否则仍保留现货市场在 t 时段的原始出清结果。

同理,当需求响应由市场极端低电价或系统填谷需求触发时,可将需求响应作为发电商带来的部分收益按照边际报价分给成功响应的用户。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文基于IEEE 30节点系统^[35]进行算例分析,系统共有6台常规发电机组,总容量为343 MW,机组的各段功率区间及报价如附录A表A1和表A2所示。算例中设置了6个I类用户和24个代理II类用户的负荷聚合商,I类用户的负荷区间及用电效用报价参考文献[36]。假设有10个负荷聚合商可参与需求响应市场,其部分时段的负荷可调整量及报价见表A3。本文设定日前市场的出清价格上限为350元/MW,并以市场出清价格超过上限作为需求响应机制的触发条件。

4.2 日前现货市场原始出清结果

模拟日前现货市场出清,得到系统负荷曲线和电价曲线如图4所示。

在图4(a)中,II类用户负荷是按照中国某省级电网2018年6月24日统调负荷缩放后的预测值,I类用户负荷是基于负荷和机组的报价在日前市场出清的结果。在图4(b)中,各时段的市场出清电价为系统中各节点电价的加权平均值,其整体趋势与系统负荷一致,能够反映市场供需关系变化。

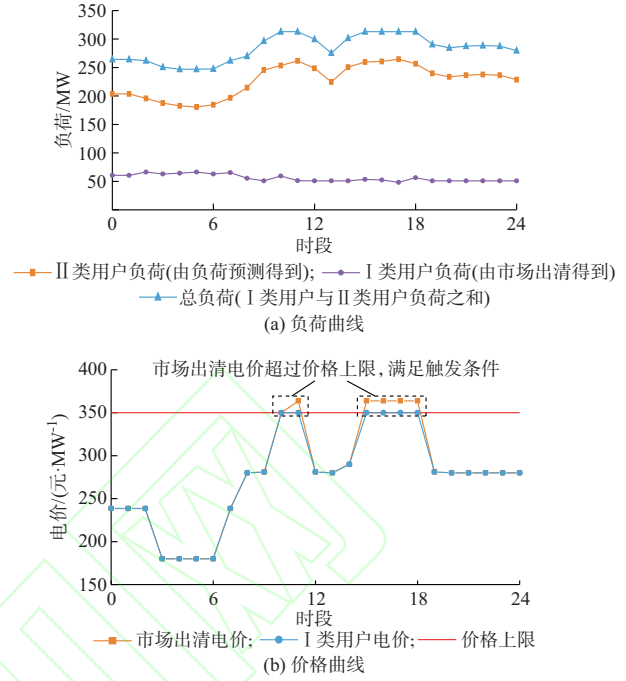


图4 日前现货市场出清后的负荷曲线和价格曲线
Fig. 4 Load and price curves after day-ahead spot market clearing

在时段10至时段11和时段15至时段18,由于系统负荷达到峰值,市场供需紧张,发电成本急剧增加和系统阻塞导致市场出清电价超过了价格上限,而I类用户的电价被限制在了价格上限,满足需求响应机制的触发条件,此时应触发需求响应市场,负荷聚合商应引导II类用户参与需求响应。

4.3 考虑II类用户响应的需求响应市场出清结果

根据日前现货市场的原始出清结果,在满足触发条件的时段触发需求响应市场,模拟考虑II类用户需求响应的需求响应市场出清。

需求响应市场出清的价格曲线如图5所示,在日前市场出清时电价达到上限的时段,通过负荷聚合商竞价并调控II类用户实施需求响应,市场出清电价和I类用户电价均降低到了价格上限以下。

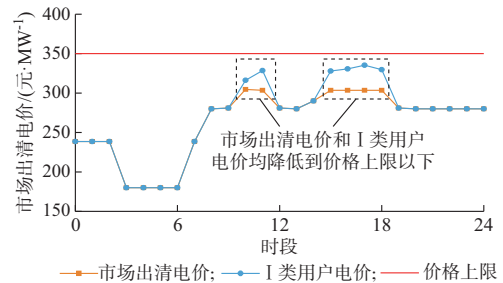


图5 需求响应市场出清后的价格曲线
Fig. 5 Price curves after demand response market clearing

根据第3章所述的方法计算Ⅰ类用户和主动响应的负荷聚合商获得的需求响应收益,计算结果如表1所示。从表中可以看出,通过触发需求响应市场,在保证代理Ⅱ类用户的负荷聚合商获得需求响应收益的同时,Ⅰ类用户能获得净收益且其用电价格降低了4%~10%,满足需求响应的校验条件,因此可以使用需求响应市场出清的结果。

表1 需求响应收益的结算结果
Table 1 Results of demand response income settlement

时段	总收益/元	负荷聚合商收益/元	Ⅰ类用户净收益/元	Ⅰ类用户电价变化量/(元·MW ⁻¹)
10	3 065.52	785	2 280.52	-33.75
11	3 154.23	1 700	1 454.23	-21.41
15	3 239.95	1 700	1 539.95	-22.07
16	3 249.75	1 900	1 349.75	-19.28
17	3 125.30	2 140	985.30	-14.64
18	3 374.75	1 900	1 474.75	-20.29

4.4 Ⅱ类用户参与规模对需求响应收益的影响

为了研究Ⅱ类用户参与规模对需求响应收益的影响,取满足需求响应触发条件的时段17,使负荷聚合商所代理的Ⅱ类用户中的灵活负荷所占比例以2%的步长值从4%增加到14%,计算在各个比例下Ⅰ类用户和负荷聚合商获得的需求响应收益,计算结果如表2所示。

表2 不同Ⅱ类用户需求响应参与规模下的收益结算结果

Table 2 Results of income settlement with different demand response scales of type Ⅱ customers

比例/%	总收益/元	负荷聚合商收益/元	Ⅰ类用户净收益/元	Ⅰ类用户电价变化量/(元·MW ⁻¹)
4	1 190.77	780	410.77	-7.52
6	1 285.99	1 010	275.99	-4.68
8	1 381.69	1 320	61.69	-1.01
10	1 409.27	1 620	-210.73	0
12	3 023.18	1 950	1 073.18	-16.48
14	3 218.77	2 220	998.77	-14.50

随着灵活负荷占比从4%增加到10%,Ⅰ类用户的市场净收益逐渐减小,Ⅰ类用户的用电价格逐渐升高,其主要原因是发电机组的报价曲线非线性递增,导致需求响应的边际效益随灵活负荷占比的增加而下降,需求响应总收益的增长速度小于负荷聚合商所需收益的增长速度。在灵活负荷占比为10%时,需求响应带来的总收益甚至低于负荷聚合商所需要的收益,Ⅰ类用户净收益为负值,不满足本文机制的校验条件,此时需求响应市场的出清结果

是无效的,Ⅰ类用户的用电价格将不会变化。

当灵活负荷所占比例从10%增加到12%时,由于线路6-9的阻塞问题得到解决,需求响应市场出清的电价相较于日前市场的原始电价有明显的下降,需求响应总收益迅速增加。Ⅰ类用户能获得较高的净收益,Ⅰ类用户的用电价格相较于价格上限降低约4%。

可见,当Ⅱ类用户的需求响应缓解系统阻塞时,需求响应在满足负荷聚合商期望收益的同时,也能给Ⅰ类用户的电价带来明显的降低。在阻塞情况不变的情况下,需求响应的边际效益会随着灵活负荷占比的增加而下降,甚至当负荷聚合商期望收益大于需求响应所能带来的收益时,Ⅰ类用户的电价可能不降反增。而本文机制结算方法中的校验过程可以避免这种情况的发生,以保证需求响应能有效地起到降低高峰需求时段Ⅰ类用户电价的作用。

5 结语

本文针对中国电力现货市场建设初期间接参与市场的用户缺乏需求弹性而导致的系统风险和电价尖峰等问题,设计了初期现货市场下考虑用户响应行为的需求响应机制设计。首先,构建了考虑不同用户响应行为的需求响应机制框架,分析了需求响应机制的触发条件及响应机理。其次,基于所提机制,构建了考虑间接参与用户主动响应的市场出清模型。为提高需求响应机制的可持续性,提出了需求响应机制的结算方法,使用户的需求响应收益具有稳定的资金来源。算例仿真结果表明:所提机制能够在保证实施需求响应的用户获得收益的同时,降低系统高峰需求时段不合理的电价,且用户参与规模会对需求响应收益产生影响。

需要指出的是,本文主要通过负荷聚合商代理用户与市场互动来实施需求响应,对于负荷聚合商内部用户调控方式的研究有所欠缺,下一步的工作将重点研究综合考虑负荷聚合商内部调控和外部互动的需求响应机制与方法。此外,随着电力体制改革的不断深入,需求响应机制应结合电力市场建设进程不断进行修正和完善。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 中共中央国务院.关于进一步深化电力体制改革的若干意见

- [EB/OL]. [2021-04-01]. http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129_773852.html.
- CPC Central Committee and State Council. Opinions on further deepening the reform of the power system [EB/OL]. [2021-04-01]. http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129_773852.html.
- [2] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于开展电力现货市场建设试点工作的通知 [EB/OL]. [2021-04-01]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201709/t20170905_860109.html.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. A notice on carrying out the pilot work of electric spot market construction [EB/OL]. [2021-04-01]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201709/t20170905_860109.html.
- [3] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9.
- DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2-9.
- [4] 胡兆光. 需求侧管理在中国的应用与实施 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 41-44.
- HU Zhaoguang. Application of demand side management to China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 41-44.
- [5] HUI H X, DING Y, SHI Q X, et al. 5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: a survey on application potential [J]. Applied Energy, 2020, 257: 113972.
- [6] 刘念, 王程, 雷金勇. 市场模式下光伏用户群的电能共享与需求响应模型 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 49-55.
- LIU Nian, WANG Cheng, LEI Jinyong. Power energy sharing and demand response model for photovoltaic prosumer cluster under market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 49-55.
- [7] 罗纯坚, 李姚旺, 许汉平, 等. 需求响应不确定性对日前优化调度的影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 22-29.
- LUO Chunjian, LI Yaowang, XU Hanping, et al. Influence of demand response uncertainty on day-ahead optimization dispatching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 22-29.
- [8] 仇梦林, 胡志坚, 王小飞, 等. 基于动态场景集和需求响应的二阶段随机规划调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 68-76.
- ZHANG Menglin, HU Zhijian, WANG Xiaofei, et al. Two-stage stochastic programming scheduling model based on dynamic scenario sets and demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 68-76.
- [9] 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.
- [10] 张粒子, 叶红豆, 陈逍潇. 基于峰荷责任的输配电定价方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 92-98.
- ZHANG Lizi, YE Hongdou, CHEN Xiaoxiao. Transmission and distribution pricing method based on peak-load pricing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 92-98.
- [11] 王冬容. 价格型需求侧响应在美国的应用 [J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(4): 74-77.
- WANG Dongrong. Application of price-based demand side response in the USA [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(4): 74-77.
- [12] FARUQUI A, GEORGE S S. The value of dynamic pricing in mass markets [J]. The Electricity Journal, 2002, 15(6): 45-55.
- [13] FARUQUI A, GEORGE S. Quantifying customer response to dynamic pricing [J]. The Electricity Journal, 2005, 18(4): 53-63.
- [14] PAPAGIANNIS G, DAGOUMAS A, LETTAS N, et al. Economic and environmental impacts from the implementation of an intelligent demand side management system at the European level [J]. Energy Policy, 2008, 36(1): 163-180.
- [15] BELHOMME R, DE ASUA R C R, VALTORTA G, et al. ADDRESS-active demand for the smart grids of the future [C]// CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, June 23-24, 2008, Frankfurt, Germany.
- [16] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881-4892.
- BAO Minglei, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Review of Nordic electricity market and its suggestions for China [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4881-4892.
- [17] 谢康, 张凯杰, 栾开宁, 等. 电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索 [J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 7-10.
- XIE Kang, ZHANG Kaijie, LUAN Kaining, et al. Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 7-10.
- [18] 韩延民, 陈军, 肖明卫. 电力需求响应在部分试点城市实施情况调研分析 [J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(5): 35-37.
- HAN Yanmin, CHEN Jun, XIAO Mingwei. Study on the implementation of demand response in part of pilot cities [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(5): 35-37.
- [19] 李斌, 顾国栋. 江苏电力负荷管理的创新及实践 [J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(5): 1-4.
- LI Bin, GU Guodong. Innovation and practice of Jiangsu's power demand side [J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(5): 1-4.
- [20] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键点综述及相关建议 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172-3187.
- SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172-3187.
- [21] 文福拴, 林鸿基, 胡嘉骅. 需求响应的商业机制与市场框架初

- 探[J].电力需求侧管理,2019,21(1):4-9.
- WEN Fushuan, LIN Hongji, HU Jiahua. A preliminary investigation on commercial mechanism and market framework for demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1): 4-9.
- [22] 肖欣,周渝慧,郑凯中,等.台湾实施可中断电价进行削峰填谷的需求响应策略及其成本效益分析[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3615-3622.
- XIAO Xin, ZHOU Yuhui, CHENG Kaichung, et al. Research on strategy of interruptible price and its cost-benefit model aimed at peak load shifting in Taiwan [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3615-3622.
- [23] 王锡凡,肖云鹏,王秀丽.新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5018-5028.
- WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [24] AAZAMI R, AFLAKI K, HAGHIFAM M R. A demand response based solution for LMP management in power markets [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(5): 1125-1132.
- [25] WU H Y, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Demand response exchange in the stochastic day-ahead scheduling with variable renewable generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 516-525.
- [26] 陈雨果,张轩,罗钢,等.用户报量不报价模式下电力现货市场需求响应机制与方法[J].电力系统自动化,2019,43(9):179-186.
- CHEN Yuguo, ZHANG Xuan, LUO Gang, et al. Demand response mechanism and approach of electricity spot market in bidding mode without price on user side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 179-186.
- [27] 国家能源局山东监管办公室.山东电力现货市场建设试点实施方案[EB/OL]. [2021-04-01]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2019/6/10/art_59960_6496557.html.
- Shandong regulatory office of the State Energy Administration. Pilot implementation scheme of spot market construction in Shandong Province [EB/OL]. [2021-04-01]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2019/6/10/art_59960_6496557.html.
- [28] 浙江省人民政府.浙江省电力体制改革综合试点方案[EB/OL]. [2021-04-01]. http://www.zj.gov.cn/art/2017/10/10/art_1582435_26041874.html.
- People's Government of Zhejiang Province. Comprehensive pilot scheme of electric power system reform in Zhejiang Province [EB/OL]. [2021-04-01]. http://www.zj.gov.cn/art/2017/10/10/art_1582435_26041874.html.
- [29] 曾鸣.电力需求侧响应原理及其在电力市场中的应用[M].北京:中国电力出版社,2011.
- ZENG Ming. The principle of power demand side response and its application in power market [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [30] 曾鸣,王冬容,陈贞.需求侧响应中的经济学原理[J].电力需求侧管理,2008,10(6):11-15.
- ZENG Ming, WANG Dongrong, CHEN Zhen. Economic principles in demand side response [J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(6): 11-15.
- [31] 郭亦宗,冯斌,岳铂雄,等.负荷聚合商模式下考虑需求响应的超短期负荷预测[J/OL].电力系统自动化[2020-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200907.1321.004.html>.
- GUO Yizong, FENG Bin, YUE Boxiong, et al. Ultra short-term load forecasting considering demand response in load aggregator mode [J]. Automation of Electric Power Systems [2020-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200907.1321.004.html>.
- [32] LIJESSEN M G. The real-time price elasticity of electricity [J]. Energy Economics, 2007, 29(2): 249-258.
- [33] 郭曼兰.市场化环境下的需求侧响应策略研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- GUO Manlan. Research on demand response strategies in market environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [34] 彭超逸,顾慧杰,朱文,等.交直流混联区域电网现货市场出清模型研究[J].电网技术,2020,44(1):323-331.
- PENG Chaoyi, GU Huijie, ZHU Wen, et al. Study on spot market clearing model of regional power grid considering AC/DC hybrid connection [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 323-331.
- [35] FERRERO R W, SHAHIDEHPOUR S M, RAMESH V C. Transaction analysis in deregulated power systems using game theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1340-1347.
- [36] 宋巍,王佳伟,赵海波,等.考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(19):35-45.
- SONG Wei, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 35-45.
- 尹逊虎(1997—),男,博士研究生,主要研究方向:电力需求响应、市场机制和能源系统可靠性等。E-mail: 11910020@zju.edu.cn
- 丁一(1978—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:智能电网、复杂多状态工程系统可靠性和电力经济等。E-mail: yiding@zju.edu.cn
- 惠红勋(1992—),男,现在博士后工作站进行研究,主要研究方向:灵活负荷资源的建模、控制、优化和市场策略等。E-mail: hongxunhui@um.edu.mo

(编辑 鲁尔姣)

Design of Demand Response Mechanism Considering Response Behaviors of Customers in Initial Electricity Spot Market

YIN Xunhu¹, DING Yi¹, HUI Hongxun², BAO Minglei¹, XU Lizhong³, TANG Xueyong^{4,1}, SANG Maosheng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau), Macau 999078, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

4. Power Grid Planning Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550033, China)

Abstract: In the early construction stage of power spot market in China, the market participating methods and response behaviors of electricity customers are quite different. A high proportion of customers are managed by power grid companies to participate in the spot market indirectly, which cannot actively respond to market dynamic prices, while their inherent electricity consumption behaviors will affect market prices. Furthermore, the customers may even cause extreme prices in the tense scenarios between power supply and demand. To this end, Taking into account the load adjustment ability of a high proportion of customers who indirectly participate in the market, a demand response mechanism suitable for the initial spot market is designed. Firstly, a demand response mechanism framework that considers different response behaviors of customers is established, trigger conditions of the demand response mechanism is proposed, and under the mechanism framework, the mechanism of customers participating in demand response is analyzed. Then, a market clearing model considering the active demand response of customers who indirectly participate in the market is constructed. A settlement method to ensure the sustainable operation of the demand response mechanism is proposed. Finally, case studies verify the rationality and effectiveness of the proposed mechanism.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5211HZ200008).

Key words: initial electricity spot market; response behavior; demand response; clearing model; settlement method



附录 A

表 A1 发电机组的功率区间
Table A1 Power sections of generating units

机组编号	节点	功率区间 1 /MW	功率区间 2 /MW	功率区间 3 /MW	功率区间 4 /MW	功率区间 5 /MW
1	2	[0,20]	[20,40]	[40,60]	[60,70]	[70,80]
2	6	[0,15]	[15,30]	[30,45]	[45,55]	[55,65]
3	22	[0,20]	[20,40]	[40,47]	[47,52]	[52,55]
4	27	[0,20]	[20,30]	[30,38]	[38,44]	[44,49]
5	10	[0,20]	[20,30]	[30,40]	[40,50]	[50,60]
6	13	[0,15]	[15,22]	[22,27]	[27,31]	[31,34]

表 A2 发电机组功率区间的报价
Table A2 Quotations of generating units' power sections

机组编号	节点	区间 1 报价 /(元/MW)	区间 2 报价 /(元/MW)	区间 3 报价 /(元/MW)	区间 4 报价 /(元/MW)	区间 5 报价 /(元/MW)
1	2	30	78	280	444.5	512.5
2	6	75	95	130	320	460
3	22	18	41	110	180	290
4	27	41	60	120	150	280
5	10	32.5	91	136	186	281
6	13	20	70	105	155	271

表 A3 负荷聚合商的负荷可调整量及报价
Table A3 Adjustable load and quotations for type II users

用户编号	节点	负荷可调整量/MW						负荷调整报价/(元/MW)					
		10h	11h	15h	16h	17h	18h	10h	11h	15h	16h	17h	18h
1	1	1	3	3	4	4	4	50	50	50	55	55	55
2	2	1	4	4	4	5	4	50	50	50	50	50	50
3	3	1	3	3	4	4	4	50	50	50	55	55	55
4	6	1	3	3	3	5	3	50	50	50	50	50	50
5	13	1	2	2	2	2	2	70	70	70	70	70	70
6	14	2	3	3	3	3	3	60	60	60	60	60	60
7	15	1	2	2	2	2	2	85	85	85	85	90	85
8	22	2	3	3	4	4	4	60	60	60	60	60	60
9	25	1	2	2	2	2	2	80	80	80	80	80	80
10	27	2	4	4	4	5	4	55	55	55	55	60	55