

基于主从博弈的售电商电能量合同履行风险柔性处置技术

谢敬东¹, 杨珉², 姜豪坤², 房广义²

(1. 上海电力大学能源与电力科创中心, 上海 200090; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 随着电力市场履约风险问题逐渐凸显, 如何对售电商电能量合同违约实施合适的处置手段, 成为运营监管机构管理与推进电力市场健康发展的研究重点。为此结合售电商违约金额不一的特点, 为运营监管机构设计柔性处置技术, 搭建运营监管机构和售电商之间的主从博弈架构。分析运营监管机构在售电商不同违约金额和面对不同成本的处置手段时如何选择合适的处置策略和售电商在不同处置策略下的应对行为。通过模拟现货市场价格波动, 探讨主方不同力度的处置策略与从方履约行为之间的关系, 并为主方提出最优处置策略。算例表明, 柔性处置技术可有效管控售电商的履约行为和处置成本。

关键词: 主从博弈; 柔性处置技术; 处置策略; 履约行为; 售电商

Flexible Disposal Technology for Performance Risks of Power Energy Contracts of Electricity Retailers Based on Master-Slave Game

XIE Jingdong¹, YANG Min², JIANG Haokun², FANG Guangyi²

(1. Energy and Power Science and Technology Innovation Center, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: As the issue of contract performance risk in the electricity market gradually becomes more prominent, how to implement appropriate measures to handle the contract breaches of electricity retailers has become a key focus of research for regulatory agencies to manage and promote the healthy development of the electricity market. In response, this paper designs a flexible disposal technology tailored for regulatory agencies, considering the varying degrees of penalty amount by electricity retailers, and establishes a leader-follower game framework between the regulatory agency and the electricity retailers. The study analyzes how the regulatory agency selects appropriate disposal strategies based on different breach amounts from electricity retailers and disposal costs, as well as how electricity retailers respond under different disposal strategies. By simulating price fluctuations in the spot market, the relationship between the leader's varying intensity of disposal strategies and the follower's performance behavior is explored, and optimal disposal strategies are proposed for the leader. Case studies show that the flexible disposal technology can effectively control both the performance behavior of electricity retailers and the disposal costs.

Key words: master-slave game; flexible disposal technology; disposal strategy; performance behavior; electricity retailers

0 引言

随着电力现货市场建设的不断深入, 电力市场

的交易环境愈发复杂, 履约风险已成为威胁电力市场稳定有序运营的主要挑战之一。

在电力市场中, 违约形式多样, 覆盖了发电厂、售电商与电力用户之间的各类违约情形, 例如合同违约、调度违约、信息披露违约等。其中, 合同违约是电力市场中最常见、影响也最严重的一类违约形式。售电商作为连接发电厂与电力用户的中间主体, 其电能量合同违约不仅会直接影响供需双

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507099); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20210110)。

Foundation item: Supported by the National and Natural Scientific Foundation of China(51507099); the Science and Research Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM20210110)。

方利益,还可能给整个电力市场的运行稳定性和运营效率带来广泛冲击。

电能量合同违约的主要危害包括:对市场主体造成经济损失;引发法律纠纷;破坏供应链稳定性,导致供需错配;损害违约方商业信誉;增加市场管理成本;引发市场价格异常波动等。因此,采用合法、合理且适度的处置手段管控市场主体履约行为尤为重要。

在电能量合同违约与处置问题中,市场运营监管机构与售电商之间的博弈关系不可忽视。研究如何通过合理的博弈机制优化监管机构对履约行为的处置方案,保障电力市场平稳运行,具有重要的理论价值与现实意义。

主从博弈是一类层级博弈模型,通常由一个主方和一个或多个从方构成:主方通过制定策略影响从方的决策,从方则依据主方策略选择自身最优反应策略,以此保障自身利益。近年来,主从博弈理论在电力市场领域的应用引发了学界的广泛关注。例如,文献[1]提出了基于可调节能力划分区间的虚拟电厂灵活分段投标策略,构建了虚拟电厂参与日前电力现货市场投标的主从博弈模型,以实现虚拟电厂收益及社会效益的最大化。文献[2]结合担保品特性和售电企业需求,构建了运营监管机构与售电企业之间的主从博弈架构,实现了市场风险因素最小化和售电企业意愿最大化。文献[3]综述了博弈理论在电力市场和可再生能源交易中的应用,探讨了博弈理论在优化多方决策中的优势。文献[4]开展了基于主从博弈的售电商多元零售套餐设计与多级市场购电策略分析。

鉴于售电商违约的巨大危害性,运营监管机构需要采取适当措施应对售电端的违约行为。文献[5]分析了美国和英国电力市场的信息披露系统,提出了基于信用监督的市场监管机制,通过抬高违规成本减少违约行为的发生。文献[6]则通过主从博弈模型研究了技术创新项目中的长期和短期激励机制,强调了合理的激励合同设计对减少售电商违约的重要作用。

针对监管者处置与被监管者履约之间的演化博弈研究也取得了一定进展。文献[7]建立了基于随机演化博弈的市场力量风险防范机制,分析了发电侧市场力量风险防范机制在不同供需场景下的应用效果。文献[8]对履约管控与担保机制的策略选择

进行了研究,建立了基于系统动力学和演化博弈的电力市场担保机制研究模型,探究了不同策略组合对应的最优收益以及策略选择的演化路径。文献[9]构建了多主体演化博弈模型,分析了动态奖励与处置机制下的质量协同改进规律,证实了监管力度的变化对市场参与者的策略选择存在显著影响。

综上所述,尽管现有研究已对电力市场中多利益主体间的主从博弈互动开展了深入分析,但针对运营监管机构处置与售电商履约行为决策之间博弈的研究仍较为匮乏,且现有部分文献在研究售电商电能量合同违约风险的处置方案时,存在处置灵活性不足的问题,同时忽略了运营监管机构的处置成本、现货市场的差价合约形式,以及履约决策受现货市场价格波动影响的实际情况。

针对上述研究不足,本文在现货市场差价合约结算的背景下,围绕电力市场中常见的电能量合同违约问题,设计了创新性的柔性处置技术,并对运营监管机构与售电商之间的主从博弈关系展开研究,以期实现对售电商电能量合同履行行为更有效的管控。柔性处置技术由传统依赖静态市场运作指标的处置模式转型而来,它强调根据市场反馈及宏观环境变化,灵活调整监管力度与监管策略。

1 电能量合同履行和处置相关策略分析

1.1 售电商电能量合同履行策略分析。

电力市场中售电商的电能量合同履行问题大多出现在场内交易的结算环节,本质上属于电费缴纳问题,核心需要关注是否能在有效电费结算期内足额、及时完成电费清缴。

在现有零售结算清算制度下,售电商与终端用户虽存在零售交易关系,但二者之间并不发生直接资金流转:售电商仅承担“中介”角色,终端用户的电费收缴责任仍由结算机构(电网)承担,售电商与结算机构之间仅针对批发交易与零售交易的净额(即电费差额)进行资金结算。当净额为正时,这部分本是中央对手方(电网结算机构)应付给售电商的利润;但当批发与零售交易的净额为负值时,售电商就对结算机构形成了债务,一旦债务规模超出一定限度,就可能引发售电商违约,也就是售电商无法按期偿还债务,此时将由市场运营监管机构对该售电商进行处置。售电商只有完成对结算机构的债务清偿后,才能参与下一周期的市场交易。

因此,售电商的电能量合同履行行为分为履约与违约两类,售电商在做决策时需要充分权衡两种选择的利弊得失。

1.2 运营监管机构处置策略分析

1.2.1 行政处置手段与成本

为违约主体选择合适的处置手段是运营监管机构管理电力市场最重要的问题之一,本文针对售电商导致的电能量合同违约,对国内外各电力市场的处置手段进行调研和分析,在结合国外及我国各省电力市场违约处置手段的基础上,针对市场运营监管机构的行政处置手段,提出4种处置手段:监管约谈、行政罚款、信用等级调整和列入黑名单。

运营监管机构在实施这些处置手段时需要承担一定的成本,在建立和维护这些处置手段过程中,还需要投入大量的人力和技术资源,以确保各类处置手段能够公平、公正地实施。各处置手段的说明和成本如表1所示。

表 1 各处置手段的说明与成本

Tab. 1 Description and costs of different disposal measures

处置手段	说明	成本
监管约谈	由机构人员约谈市场违约主体的法人或高管,对其指出问题、进行规劝和批评,视情况可将约谈信息向社会公开	监控与预警成本; 审批与文书成本; 约谈安排成本
行政罚款	运营监管机构对市场违约主体罚款处理,需满足有明确违约证据、影响市场稳定运营并造成不良社会影响的条件	调查与证据收集成本; 立案与审核成本; 建议与文书成本
信用等级调整	由运营监管机构按照相关规定,在对市场违约主体进行综合评价的基础上,根据评价结果进行信用等级调整	监控与数据收集成本; 数据分析成本; 记录与通知成本
列入黑名单	市场主体在交易中无故未履行交易合同或具有法律效力的交易意向,情节严重或拒不整改者列入“黑名单”	监控与数据分析成本; 失信行为确认成本; 信息公告成本

处置成本不仅与处置手段有关,还与处置力度相关,不同力度的处置策略成本不同。当运营监管机构采取更严格的处置策略时,各处置手段的预警、调查和监控成本会相应增加。因此,处置策略

决策需要统筹处置成本和处置成效,综合权衡。

1.2.2 不同处置强度的策略设计

为使不同履约情况的电力市场都能确定有效的管控,市场运营监管机构需设计柔性处置技术,使无论市场中售电商的履约情况如何,都能进行有效管控。具体体现在,柔性处置技术根据售电商的违约金额大小实施处置手段,每种手段都有特定的触发阈值,当售电商的违约金额与企业规模的比值超过某阈值时,则对其施加相应的处置手段,且每次只能采取一种处置手段。当市场总体履约情况较差、总体违约金额过高时,柔性处置技术会调用处置强度更高的策略,各处置手段的触发阈值相应降低,反之,阈值升高。柔性处置技术根据处置强度的大小分为严格型、中等型和宽松型3种处置策略。严格型策略下各处置手段触发阈值最低,中等型次之,宽松型最高。

当售电商违约时,若其违约金额超过该周期处置策略下任意处置手段的阈值,则采取该手段对违约售电商实施处置。不同处置策略下,触发同一处置手段的阈值是不同的,设定 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 表示中等型策略下各处置手段的阈值,用系数 η_1 、 η_2 表示各策略间处置手段阈值的关系,如表2所示。

表 2 不同处置策略下同一处置手段的阈值关系

Tab. 2 Threshold relationships of the same disposal measure under different disposal strategies

序号	处置手段名称	阈值		
		I. 严格型	II. 中等型	III. 宽松型
1	监管约谈	$\eta_1 A_1$	A_1	$\eta_2 A_1$
2	行政罚款	$\eta_1 A_2$	A_2	$\eta_2 A_2$
3	信用等级调整	$\eta_1 A_3$	A_3	$\eta_2 A_3$
4	列入黑名单	$\eta_1 A_4$	A_4	$\eta_2 A_4$

表2中,为使3种策略的处置力度不同,需满足 $\eta_2 > 1 > \eta_1 > 0$ 。

2 运营监管机构和售电商决策考虑因素分析

2.1 运营监管机构处置策略决策的考虑因素与预测

2.1.1 运营监管机构处置策略决策的考虑因素

运营监管机构在进行处置策略决策时,首先预测和计算每种处置手段对售电商的影响。接着,通

过本周期的售电商履约情况、电价数据及售电商合约数据,预测售电商的风险偏好系数。最后,结合各处置手段对售电商造成的损失及预估的风险偏好系数,选择监管综合效能最高的处置策略。下面简述运营监管机构进行下周期处置策略决策时的考虑因素,如表3所示。

表3 运营监管机构处置策略决策的考虑因素

Tab. 3 Factors considered by regulatory agencies in disposal strategy decision-making

考虑因素	说明
处置手段对售电商影响	根据各处置手段特点、售电商情况、市场环境因素和历史数据,评估每种处置手段对售电商造成的损失
风险偏好系数	通过本周期的各售电商履约行为,结合电力市场及购售电合约数据,预测风险偏好系数范围
售电商履约行为	根据售电商的盈亏情况、各类处置手段的影响,结合风险偏好系数,分析下一周期售电商的履约行为
监管综合效能	根据预测结果,计算各处置策略的监管综合效能

运营监管机构基于上述分析,以监管综合效能最大化为目标,进行处置策略决策。

2.1.2 运营监管机构对售电商风险偏好系数的预测

运营监管机构首先根据本周期的现货市场价格和批发、零售合同价格计算售电商的亏损情况,根据售电商违约金额风险偏好系数等于本周期处置策略下相应处置手段带来的损失,得到风险偏好系数的临界值。再根据售电商实际履约行为判断风险偏好系数处于临界值之上或之下,在多次博弈中得到风险偏好系数的上下限,并逐步缩小风险偏好系数的范围。运营监管机构在决策中对售电商风险偏好系数的预测值可取上下限的平均值。

2.2 售电商履约行为决策的考虑因素分析

2.2.1 售电商利润分析

售电商在进行电能量合同履行决策的时候,通常最关注的是合同的盈利情况,合同的盈利能力一定程度上决定了售电商履约的意愿。若合同能够带来利润,售电商一般选择履约;若合同带来亏损,售电商会比较违约金额和违约运营监管机构处置产生的损失大小,选择亏损更小的方案进行履约决策。因此,本文以电能量合同给售电商带来的收益和违约成本来衡量售电商的履约行为。售电商的利润计算如下。

忽略运营成本的影响,售电商*i*电能量合同在*T*周期的净利润 $R_{i,T}$ 可表示为:

$$R_{i,T} = P_{i,T} - C_{\text{buy},i,T} - C_{\text{opc},i,T} \quad (1)$$

式中 $P_{i,T}$ 、 $C_{\text{buy},i,T}$ 和 $C_{\text{opc},i,T}$ 分别为售电商*i*在*T*周期中的收益、购电成本和运营成本。

售电商收益 $P_{i,T}$ 一般可通过二次函数拟合为:

$$P_{i,T} = -\frac{1}{2}aE_{i,T}^2 + bE_{i,T} + c \quad (2)$$

式中: $E_{i,T}$ 为售电商*i*在*T*周期的收益; a 、 b 、 c 为售电收益系数;收益函数的二次项系数一般为负,体现边际收益递减的特性。

根据售电商在合同任意时段进行履约决策的特点,结合国内现货市场结算规则,基于差价合约方式结算的原理,售电商在*T*周期的预计购电成本计算如下。

$$C_{\text{buy},i,T} = \sum_{t=1}^T (p_{\text{ml}} e_{\text{ml},t} + p_{\text{pre},t} (e_{\text{pre},t} - e_{\text{ml},t})) \quad (3)$$

式中: $e_{\text{ml},t}$ 为售电商的中长期合同分日电量; p_{ml} 为中长期合同电价; $p_{\text{pre},t}$ 为*t*日现货市场电价; $e_{\text{pre},t}$ 为*t*日售电商代理用户用电需求。

售电商周期*T*内的电能量合同利润 $R_{i,T}$ 为:

$$R_{i,T} = P_{i,T} - C_{\text{buy},i,T} = \sum_{t=1}^T (p_{\text{pre},t} e_{\text{pre},t}) - \sum_{t=1}^T (p_{\text{ml}} e_{\text{ml},t} + p_{\text{pre},t} (e_{\text{pre},t} - e_{\text{ml},t})) \quad (4)$$

2.2.2 违约处置对售电商带来的损失分析

在电力市场中,各种处置手段对售电商的影响存在显著差异。每个售电商会根据自身具体情况,详细评估每种处置手段对其经济、信誉以及市场竞争力的影响,比较其与违约金额的大小,做出最优的履约行为。处置手段对售电商产生的影响如下。

1) 直接损失:指因处置而立即产生的、给售电商带来的可明确计算的经济损失,例如对企业的罚款、提高售电商担保额度等。

2) 间接损失是指因处置带来的连锁反应导致的后续损失,通常较难直接量化。比如客户信任度降低影响未来业务发展;声誉受损导致市场份额下降;处置记录不良导致在银行或资本市场融资困难等。

由于处置给售电商带来的间接损失难以直接计算,受到企业体量大小、环境因素等多种因素的影响,故引入单位影响因子的概念。单位影响因子是

用来量化和衡量处置手段对售电商间接影响程度的一个概念,由运营监管机构结合实际情况确定,它用来表示不同处置手段对市场中售电商的每单位体量普遍间接损失量。

受现实复杂情况和售电商具体条件的影响,不同售电商对于同一处置带来的影响的认知情况也不同。引入风险偏好系数的概念来表示售电商对处置带来的间接影响的认知与单位影响因子的关系。

由此,售电商 i 对于处置手段 m 带来的损失大小的认知 $P_{U,i}$ 为:

$$P_{U,i} = L_{i,m}^d + I_m N_i R_i^A, m = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

式中: $L_{i,m}^d$ 为处置手段 m 产生的直接损失; I_m 为处置手段 m 的单位影响因子; N_i 为售电商 i 的总资产; R_i^A 为售电商 i 的风险偏好系数。

3 运营监管机构与售电商的市场履约主从博弈模型

3.1 主从博弈模型架构

以运营监管机构为主方、售电企业为从方构建的主从博弈架构如图1所示。

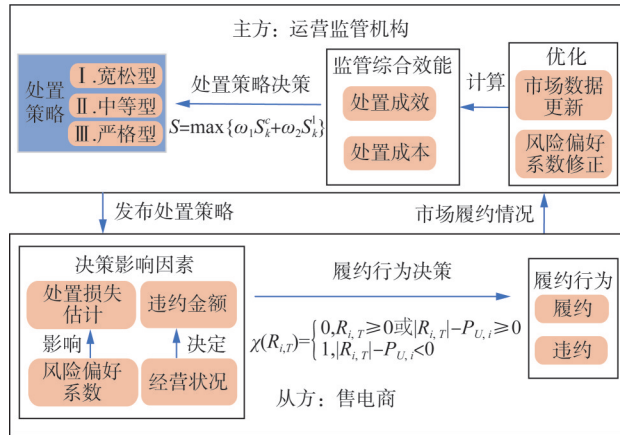


图1 市场运营监管机构和售电商主从博弈架构

Fig. 1 Leader-follower game framework between market regulatory agencies and electricity retailers

运营监管机构通过制定下周期的违约处置策略,从而影响售电商履约行为。运营监管机构以监管综合效能最大化的原则制定下周期处置策略。监管综合效能由处置成效和处置成本组成,其中处置成效为施行该处置策略后市场售电商的违约金额大小。

售电商根据本周期自身盈亏状况,结合运营监管机构的处置策略,衡量违约金额和处置产生的损

失大小,选择合适的履约行为。而市场各售电商的总体违约情况影响运营监管机构下周期的处置策略选择,由此构成博弈。运营监管机构的目的是实现电力市场中总体损失与处置实施成本的平衡,售电商的目的是保障自身利益。

模型求解步骤如图2所示。

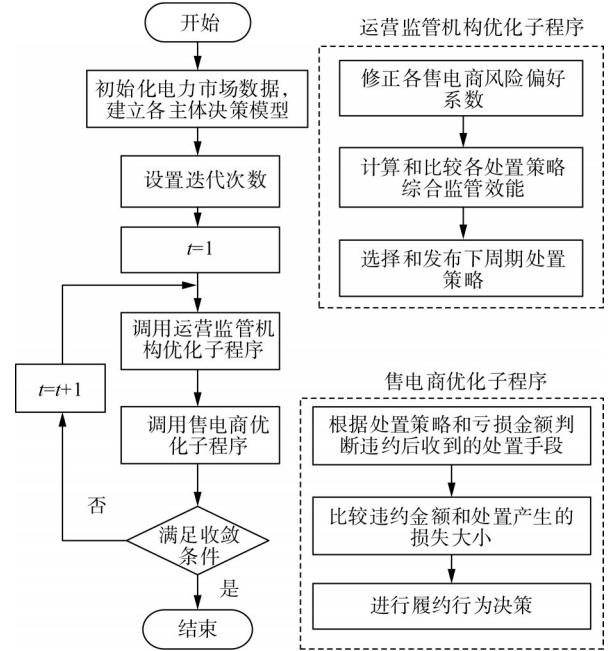


图2 主从博弈模型求解步骤

Fig. 2 Steps for solving the Stackelberg game model

步骤1,初始化电力市场的各项数据,建立各主体的决策模型,设置迭代次数;

步骤2,调用运营监管机构优化子程序。运营监管机构根据市场总体履约情况,修正各售电商的风险偏好系数,计算和比较各处置策略的监管综合效能,确定下周期的违约处置策略,发布给售电商;

步骤3,调用售电商优化子程序。各售电商参考处置策略下各违约处置手段的实施阈值,结合自身对各违约处置手段产生损失的判断,在自身风险偏好系数的影响下,对比违约金额与处置产生的损失,决策履约行为;

步骤4,判断博弈是否达到纳什均衡;

步骤5:若未达到纳什均衡,则重复上述步骤的迭代过程,直到最后达到纳什均衡,输出每周运营监管机构选择的处置策略、各售电商的履约行为及市场总违约金额。

市场环境变化和售电商履约情况均会使运营监管机构调整处置策略,售电商也会根据环境变化和处置策略调整履约行为,这就使得处置技术的柔性在多次的博弈中体现出来了。

运营监管机构和售电商的主从关系主要体现在3个方面。

1)运营监管机构作为市场规则的制定者和市场主体的监督者,扮演组织者的角色;售电商作为市场的主体和参与者,扮演被组织者的角色。

2)运营监管机构具有政府授予的防范电力市场风险的权力,也有维护市场平稳运行的义务,主导整个市场的运行;售电商作为市场的一部分,需要配合运营监管机构的工作。

3)运营监管机构在一个市场中通常是唯一的,而售电商是多个的,二者是一对多的关系。

3.2 主方(运营监管机构)处置策略决策模型

3.2.1 目标函数

运营监管机构通过比较各处置策略在电力市场的处置成效和处置成本,以统筹二者监管综合效能最优为目标进行处置策略决策,实现履约行为调控,数学表达如下。

$$S_k = \max \{ \omega_1 S_k^c + \omega_2 S_k^l \} \quad (6)$$

式中: ω_1 和 ω_2 分别为运营监管机构对处置成效和处置成本的比重偏好; S_k 为处置策略 k 的监管综合效能值; S_k^c 和 S_k^l 分别为处置策略 k 的处置成本和处置成效标准化后的值,计算方法如下。

$$S_k^c = \frac{C_{in} - C_k}{C_{in}}, k = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$S_k^l = \frac{V_{in} - V_{l,k}}{V_{in}}, k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$V_{l,k} = \sum_{i=0}^q V_{i,k} \quad (9)$$

式中: C_{in} 为运营监管机构初始总处置成本; C_k 为使用处置策略 k 后的总处置成本; V_{in} 为市场初始总违约金额; $V_{l,k}$ 为使用处置策略 k 后的市场总违约金额; q 为市场中违约售电商数量; k 为售电商 i 的违约金额。

3.2.2 约束条件

运营监管机构在以监管综合效能最大化为原则进行处置策略决策时,需考虑处置成本上限约束及处置手段间的成本关系约束。

$$C_1 \leq C_2 \leq C_3 \leq C_4 \leq C_k^{\max} \quad (10)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为监管约谈、行政罚款、信用等级调整和列入黑名单4种处置手段成本; $C_k^{\max}$ 为运营监管机构处置成本的上限。

3.3 从方(售电商)履约行为决策模型

3.3.1 决策函数

当售电商利润时,售电商履约。当时,售电商会衡量亏损金额与处置损失大小进行履约行为决策。售电商履约行为可由式(11)表示。

$$\chi(R_{i,T}) = \begin{cases} 0, R_{i,T} \geq 0 \text{ 或 } |R_{i,T}| - P_{U,i} \geq 0 \\ 1, |R_{i,T}| - P_{U,i} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\chi(R_{i,T})$ 为售电商 i 的违约决定, 0 表示履约, 1 表示违约; $|R_{i,T}|$ 为售电商的亏损金额; $P_{U,i}$ 为售电商 i 对受到处置而产生的损失的认知。

3.3.2 约束条件

售电商履约决策过程中需考虑售电量上下限约束和购电成本上下限约束。

1)售电量上下限约束

$$e_{pre,t}^{\min} \leq e_{pre,t} \leq e_{pre,t}^{\max} \quad (12)$$

式中 $e_{pre,t}^{\max}$ 、 $e_{pre,t}^{\min}$ 分别为售电商单位时间售电量的上下限。

2)购电成本上下限约束

$$C_{buy,i,t}^{\min} \leq C_{buy,i,t} \leq C_{buy,i,t}^{\max} \quad (13)$$

式中 $C_{buy,i,t}^{\max}$ 、 $C_{buy,i,t}^{\min}$ 分别为售电商单位时间购电成本的上下限。

3.4 纳什均衡判定

当运营监管机构在博弈迭代过程中,其策略最优且保持不变时,博弈达到纳什均衡,即满足:

$$S_k^T(\chi_{all}^T, p_{pre,t}^T) = S_k^{T'}(\chi_{all}^{T'}, p_{pre,t}^{T'}), k = 1, 2, 3 \quad (14)$$

式中: T 与 T' 为相邻周期; $S_k^T(\chi_{all}^T, p_{pre,t}^T)$ 为 T 周期市场履约情况为 χ_{all}^T 和现货市场价格为 $p_{pre,t}^T$ 时运营监管机构选择的最优策略的监管综合效能;

$S_k^{T'}(\chi_{all}^{T'}, p_{pre,t}^{T'})$ 为 T' 周期市场履约情况为 $\chi_{all}^{T'}$ 和现货市场价格为 $p_{pre,t}^{T'}$ 时运营监管机构选择的最优策略的监管综合效能。

由于现货市场价格直接影响售电商的收益,进而影响其履约行为决策,故不同现货电价的周期之间无法判断博弈是否达到均衡,而应在相同现货电价的周期之间进行纳什均衡的判断,即:

$$p_{pre,t}^T = p_{pre,t}^{T'} \quad (15)$$

当多次迭代后各处置策略进入稳定状态,售电商履约行为不再变化,则有:

$$\chi_{\text{all}}^T = \chi_{\text{all}}^{T'} \tag{16}$$

将式(15)和式(16)代入式(14)可得:

$$S_k^T(\chi_{\text{all}}^T, p_{\text{pre},t}^T) = S_k^{T'}(\chi_{\text{all}}^{T'}, p_{\text{pre},t}^{T'}), k = 1, 2, 3 \tag{17}$$

式中 T 与 T' 为博弈均衡后任意现货电价相同的相邻周期。此时算法处于收敛状态, 市场为纳什均衡状态。

4 算例分析与结果讨论

4.1 参数设置

本文拟定电力市场中存在 20 个规模相似的售电商, 并各代理同类型的多个电力用户, 现货市场电能量平均价格变化以 5 个时间周期为一个循环。各售电商签订的中长期合同电价在各周期中均为 0.4 元/kWh。设定运营监管机构初始处置成本为 50 万元, 市场总体违约金额 1 亿元。首次博弈时各售电商风险偏好系数均默认为 1。运营监管机构对处置成本和处置成效的偏好权重均为 0.5。

因现实电力市场中影响博弈的因素过多, 为减少次要因素对博弈的影响并简化计算复杂度, 在算例中做出如下假设。

- 1)忽略处置手段对售电商带来的直接损失。
 - 2)用户每日的负荷曲线不变。
 - 3)所有违约主体能够弥补违约金额, 参与下周期的博弈, 博弈主体数量保持不变。
 - 4)各处置手段的单位影响因子在各周期中不变。
 - 5)假设各售电商每周期的收益和运营成本不变。
- 各处置手段的单位影响因子如表 4 所示。

表 4 处置手段单位影响因子

Tab. 4 Unit impact factors of disposal measures

处置手段	监管约谈	行政处罚	信用等级调整	列入黑名单
单位影响因子	0.015	0.025	0.035	0.045

4.2 结果与分析

4.2.1 运营监管机构处置策略变化分析

为对比运营监管机构博弈中处置策略的变化, 设置随周期变化的现货市场平均价格, 如表 5 所示。

由表 5 可知, 运营监管机构处置策略的选择与售电商的盈亏密切相关, 具体体现在现货价格的变化上。当现货价格较高时, 由于差价合约的影响,

表 5 现货市场价格和运营监管机构处置策略变化情况

Tab. 5 Changes in spot market prices and disposal strategies of regulatory agencies

时间周期	现货市场平均价格/p. u.	处置策略
周期一	0.35	严格型
周期二	0.46	宽松型
周期三	0.49	宽松型
周期四	0.53	中等型
周期五	0.56	中等型
周期六	0.35	严格型
周期七	0.46	中等型
周期八	0.49	中等型
周期九	0.53	中等型
周期十	0.56	严格型
周期十一	0.35	严格型
周期十二	0.46	中等型
周期十三	0.49	中等型
周期十四	0.53	中等型
周期十五	0.56	严格型

售电商易因亏损而违约, 促使运营监管机构选择更严格的处置策略。反之, 售电商大多盈利, 故不会违约。另外, 由于周期十一至十五的处置策略和市场履约情况与周期六至周期十完全一致, 可判断博弈已达成均衡。

4.2.2 运营监管机构风险偏好系数预测分析

运营监管机构对售电商 4 风险偏好系数预测范围的变化如表 6 所示。

由表 6 可知, 前两周期运营监管机构默认风险偏好系数为 1, 运营监管机构对售电商 4 风险偏好系数的预测范围在博弈过程中不断缩小。原因在

表 6 运营监管机构对售电商 4 风险偏好系数预测范围变化

Tab. 6 Variations in the predicted range of risk preference coefficients for electricity retailer 4 by regulatory agencies

时间周期	风险偏好系数	预测范围	履约情况
周期一	1.11	1	履约
周期二	1.11	1	履约
周期三	1.11	0.92 以上	履约
周期四	1.11	0.97 以上	违约
周期五	1.11	0.97~1.31	违约
周期六	1.11	0.97~1.26	违约
周期七	1.11	0.97~1.21	履约
周期八	1.11	1.01~1.21	履约
周期九	1.11	1.01~1.21	履约
周期十	1.11	1.01~1.21	履约

于,前两个周期售电商处于盈利状态,其履约行为无法为风险偏好系数的预测提供有效信息。之后随着现货价格的提高,售电商利润逐渐减小,此后每一次履约和违约,都能为运营监管机构提供其风险偏好系数的下限和上限的信息。售电商的履约可能提高风险偏好系数预测的下限,反之可能降低预测的上限。随着迭代不断进行,运营监管机构的预测越来越精确,为其之后处置策略的决策提供参考。

4.2.3 运营监管机构处置策略的监管综合效能分析

规范化后的柔性处置策略与单一处置策略的监管综合效能对比如图3所示。

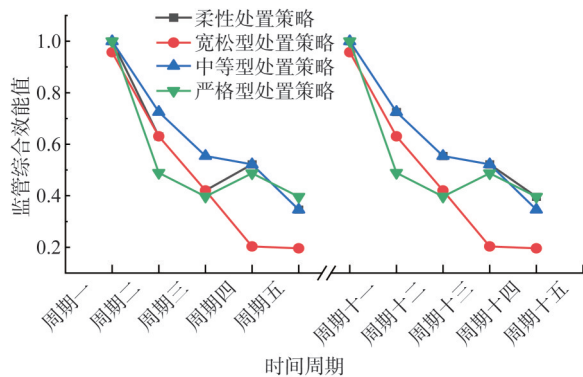


图3 各处置策略监管综合效能对比情况

Fig. 3 Comparison of comprehensive regulatory effectiveness of different disposal strategies

由图3可知,在相同的现货价格下,不同的处置策略得到的监管综合效能不同。在以监管综合效能最大化为目标选择处置策略的模式下,柔性处置策略在第二、三和五周期并不是监管综合效能最高的策略,但从第十周期开始,柔性处置策略的监管综合效能均最大,周期十二、十三和十五的监管综合效能明显高于周期二、三和五。原因在于,随着博弈迭代的深入,运营监管机构对售电商风险偏好系数预测越来越精确,决策时对各处置策略的满意度预测更接近实际值,在后几个周期中能够选择监管综合效能最高的策略。

规范化后的处置成效与处置成本变化情况如图4所示。

由图4可知,周期一和周期十一的监管综合效能明显高于其他周期,周期二的处置成本明显高于处置成效,第四、五周期的处置成效明显高于处置成本。原因在于,当电力现货价格较低时,大多数

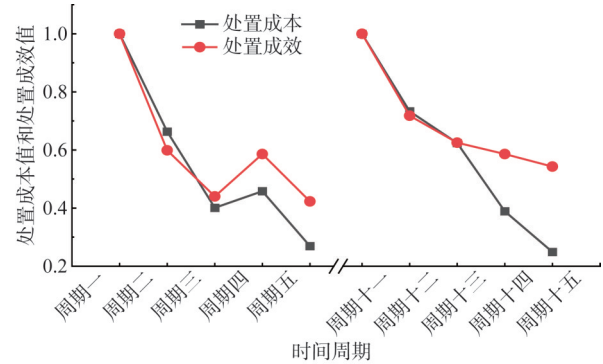


图4 柔性处置策略的处置效用与处置成本变化情况

Fig. 4 Variations in effectiveness and cost of flexible disposal strategies

售电商处于盈利状态,履约率很高,运营监管机构不需要采取过多处置措施,监管综合效能较高。而当电力现货价格较高,较多售电商出现违约时,较严格的处置策略能够提高处置成效,而相应的需要使用较多严重的处置手段,并耗费更多的预警、调查和监控费用,处置成本随之增加。另外,周期十一至十五的处置成效和成本总体上优于周期一至五,说明处置策略在博弈中得到优化。

4.2.4 不同处置策略下售电商总违约金额分析

不同处置策略下售电商总违约金额如图5所示。

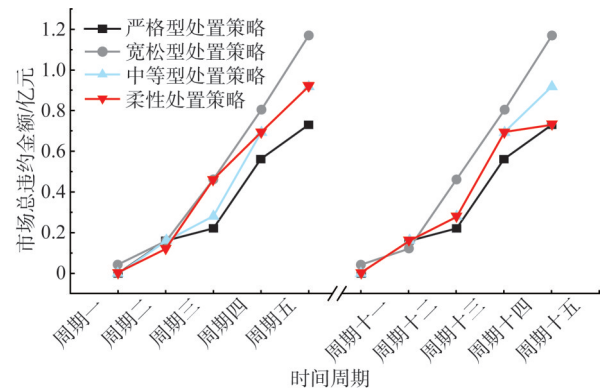


图5 不同处置策略下市场总违约金额变化情况

Fig. 5 Changes in total market default amounts under different disposal strategies

由图5可知,柔性处置策略下周期十一至十五市场总违约金额均总体低于同现货电价的周期一至五。说明经过多轮博弈后,决策的处置策略能够更加有效地调控电力市场中售电商的违约情况,结合前者的监管综合效能大于后者,可判断运营监管机构在博弈的过程中的决策在不断优化。另外,相比

于单一处置策略,在以监管综合效能最高为目标选择处置策略的模式下的违约售电商的数量和违约金额均较低,但是没有处于最低的位置。因为监管综合效能不只是考虑处置成效,还包含处置成本,如果着重考虑处置成效,可以调高处置成效在监管综合效能中的比例,从而筛选出更合适的处置策略。

5 结论

本文针对售电商电能量合同违约问题开展研究,梳理了违约判定依据,为运营监管机构设计了柔性处置技术,并以运营监管机构为主方、售电商为从方构建主从博弈模型,采用Python语言的最优化算法对该模型进行求解。通过算例分析博弈迭代过程中运营监管机构与售电商的策略变化,研究运营监管机构在迭代中对售电商风险偏好系数的预测优化效果,对比单一处置策略与柔性处置策略下售电商的违约情况以及处置策略的监管综合效能,最终得到结论如下。

1)售电商的履约行为与自身利润直接相关,并反映在电力现货价格、中长期合同价格和零售合同价格等维度,本算例重点研究了该行为对电力现货价格的影响。运营监管机构的处置策略需要根据售电商的履约行为动态调整:当售电商整体收益偏低时,需要采取更严格的处置策略,控制违约企业数量及其造成的损失。

2)当大部分售电商盈利状况较好时,采取宽松型处置策略反而会诱导个别企业违约,中等强度的处置策略效果更佳。同理,现货价格走高并不一定意味着需要采用严格处置策略:当售电商亏损规模过大时,无论处置策略严格与否,多数售电商仍会选择违约,此时采取严格策略不仅处置效果不佳,还会推高处置成本。

3)随着运营监管机构与售电商主从博弈的不断推进,运营监管机构对售电商风险偏好系数的预测精度会逐步提升,进而能够在后续决策中选择更适配的处置策略。

4)柔性处置策略可根据实际需求调整处置成效与处置成本的权重,平衡二者关系,在处置目标和处置行为两个层面实现柔性调整。

5)与固定处置策略相比,柔性处置策略的监管综合效能和处置应变能力均有提升,在博弈过程中能够将原本一成不变的处置模式,转变为灵活可

调、逐步收敛至最优的柔性处置模式。

下一步研究工作将基于运营监管机构与售电商参与的主从博弈,进一步纳入现实场景中售电商违约后永久退出市场的行为、博弈主体数量变化以及同类企业风险偏好趋同特性等因素,为运营监管机构管理更复杂的电力市场开展更深入的研究。

参考文献

- [1] 彭超逸,徐苏越,顾慧杰,等.基于主从博弈的虚拟电厂参与多元竞争市场投标策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):125-137.
PENG Chaoyi, XU Suyue, GU Huijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant participating in a multiple competitive market based on the Stackelberg game [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 125-137.
- [2] 郑伟,黄远明,林少华,等.售电企业电力市场履约担保运营机制研究——基于主从博弈的分析[J].价格理论与实践,2023(11):167-173,216.
ZHENG Wei, HUANG Yuanming, LIN Shaohua, et al. Research on operation mechanism of performance guarantee in electricity market of retail electricity providers——analysis based on stackelberg master-slave game [J]. Price: Theory & Practice, 2023(11): 167-173, 216.
- [3] HUANG W, LI H. Game theory applications in the electricity market and renewable energy trading: a critical survey [J]. Frontiers in Energy Research, 2022(10): 100-110.
- [4] 潘虹锦,高红均,杨艳红,等.基于主从博弈的售电商多元零售套餐设计与多级市场购电策略[J].中国电机工程学报,2022,42(13):4785-4800.
PAN Hongjin, GAO Hongjun, YANG Yanhong, et al. Multi-type retail packages design and multi-level market power purchase strategy for electricity retailers based on master-slave game [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4785-4800.
- [5] JIN L S, LIU Q, YU J, et al. Research on the development of electricity market based on performance guarantee [J]. Frontiers in Energy Research, 2022(10): 80-91.
- [6] ZHU J, CHEN J, JIN W, et al. Developing incentive mechanisms for long-term and short-term technological innovation in major engineering projects using principal-agent theory [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2025, 32(3): 1947-1969.
- [7] XIE Jingdong, GUAN Bowen, YAO Yin, et al. Market power risk prevention mechanism of China's electricity spot market based on stochastic evolutionary game dynamics [J]. Frontiers in Energy Research, 2023(11): 1-14.
- [8] 谢敬东,李锐振,石全,等.电力市场履约担保机制策略研究——基于系统动力学的演化博弈分析[J].价格理论与实践,2023(5):52-58,208.
XIE Jingdong, LI Ruizhen, SHI Quan, et al. Research on the strategy of performance guarantee mechanism in electricity market——evolutionary game analysis based on system dynamics [J]. Price: Theory & Practice, 2023(5): 52-58, 208.
- [9] ZHANG Z, WANG X, SU C, et al. Evolutionary game analysis of shared manufacturing quality synergy under

- dynamic reward and punishment mechanism[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6792.
- [10] 田琳, 甘倍瑜, 孙谦, 等. 广东电力现货市场信用风险管理[J]. 南方电网技术, 2019, 12(6): 50-56.
TIAN Lin, GAN Beiyu, SUN Qian, et al. Credit risk management in guangdong power spot market[J]. Southern Power System Technology, 2019, 12(6): 50-56.
- [11] 应昱杭. 供需互动的电力市场信用风险研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [12] 杨皓钦, 魏震波, 黄宇涵, 等. 跨区域现货市场下多主体购售能主从博弈模型[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2781-2791.
YANG Haoqin, WEI Zhenbo, HUANG Yuhan, et al. Multi-agent purchase and sale master-slave game model in cross-regional spot market[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2781-2791.
- [13] 甘倍瑜. 电力市场违约风险量化与控制策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [14] 谢敬东, 黄溪滢, 卢浩哲, 等. 电力市场中市场力风险防范方法的研究[J]. 价格理论与实践, 2020(12): 49-53, 162.
XIE Jingdong, HUANG Xiying, LU Haozhet al. Research on the risk prevention method of market power in electricity market[J]. Price: Theory & Practice, 2020(12): 49-53, 162.
- [15] 樊铁钢, 张勇传. 电力市场中的风险及其识别[J]. 电力建设, 2000(7): 5-7.
FAN Tiegang, ZHANG Yongchuan. Risk and its identification in power market[J]. Electric Power Construction, 2000(7): 5-7.
- [16] 王玉萍, 刘磊, 朱明, 等. 电力市场化交易主体信用管理的研究与实践[J]. 电力大数据, 2019, 22(5): 1-5.
WANG Yuping, LIU Lei, ZHU Ming, et al. Research and practice on credit management of electricity marketization transaction subject[J]. Power Systems and Big Data, 2019, 22(5): 1-5.
- [17] 刘强, 何阳, 田家乐, 等. 我国电力市场信用管理体系设计研究[J]. 价格理论与实践, 2021(5): 69-74.
LIU Qiang, HE Yang, TIAN Jiale, et al. Design of credit management system for China's power market[J]. Price: Theory & Practice, 2021(5): 69-74.
- [18] 徐宏, 林新, 朱策, 等. 电力市场信用评级管理建设探讨[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2582-2593.
XU Hong, LIN Xin, ZHU Ce, et al. Crediting management in the electricity market[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2582-2593.
- [19] 孙谦, 杨悦勇, 田琳, 等. 广东电力现货市场主体信用额度评估实践与理论探索[J]. 价格理论与实践, 2020(5): 102-105, 175.
SUN Qian, YANG Yueyong, TIAN Lin, et al. Practice and theoretical exploration of credit limit assessment of participants in Guangdong power spot market[J]. Price: Theory & Practice, 2020(5): 102-105, 175.
- [20] 周长城, 马溪原, 郭晓斌, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统互动优化运行方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 74-80.
ZHOU Changcheng, MA Xiyuan, GUO Xiaobin, et al. Leader-follower game based optimized operation method for interaction of integrated energy system in industrial park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 74-80.
- [21] 史述红, 刘敦楠, 胡会文, 等. 市场开放下电力交易全过程违规行为识别探究[J]. 价格理论与实践, 2018(8): 51-54.
SHI Shuhong, LIU Dunnan, HU Huiwen, et al. Identification of violations in the whole process of electricity market transactions[J]. Price: Theory & Practice, 2018(8): 51-54.
- [22] 王辉, 金子蓉, 方航, 等. 基于动态定价的虚拟电厂博弈能源管理模型[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 101-108.
WANG Hui, JIN Zirong, FANG Hang, et al. Game energy management model of virtual power plant based on dynamic pricing[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 101-108.
- [23] 黄伟, 闫彬禹, 熊伟鹏, 等. 基于两阶段博弈的主动配电网运营机制[J]. 南方电网技术, 2017, 11(9): 79-87.
HUANG Wei, YAN Binyu, XIONG Weipeng, et al. Operating mechanism of active distribution network based on two-stage game[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9): 79-87.
- [24] 李振坤, 刘乾, 郭维一, 等. 计及用户用能行为的综合能源微网运营商与负荷聚合商主从博弈策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 35-46.
LI Zhenkun, LIU Qian, GUO Weiyl, et al. Stackelberg game strategy between integrated energy microgrid operators and load aggregators considering users energy consumption behavior[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 35-46.
- [25] 冯喜春, 韩璟琳, 赵辉, 等. 主从博弈框架下配电网规划运行多目标协同优化方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 26-34, 72.
FENG Xichun, HAN Jinglin, ZHAO Hui, et al. Multi-objective cooperative optimization method of distribution network planning and operation under the stackelberg game framework[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 26-34, 72.

收稿日期: 2024-09-18; 网络首发日期: 2025-02-06

作者简介:

谢敬东(1968), 男, 研究生导师, 博士, 研究方向为电力市场建设及其监管、智能微电网和配电网安全分析, xie_jd@shiep.edu.cn;

杨珉(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场履约风险管控, 215112656@qq.com;

姜豪坤(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能微电网和配电网安全分析, jhk_email@163.com。