

基于动态 RPN 的电力市场价格风险柔性化防范技术

谢敬东¹, 关博文², 陆池鑫³

(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; 3. 国网上海市电力公司市南供电公司, 上海 200233)

摘要: 尚处发展初级阶段的中国电力市场亟需合理有效的价格风险防范技术。首先, 采用半监督支持向量机-序关系-熵权 (semi-supervised support vector machine-order relation-entropy weight, SSVM-OR-EW) 算法量化了机组个体和市场总体的动态风险系数。其次, 研究了“事中防范+事后处置”的双保险风险防控技术, 构建了“演化博弈-优化出清”双层模型。根据动态风险系数, 事中柔性化防范价格风险, 事后风险处置则引入盖然性理论, 构建专家逻辑推演系统, 进一步挖掘机组风险可能性, 为监管机构法规化处置提供现实依据。最后, 以某地区现货市场数据进行算例分析, 结果表明防范体系在有效处置风险的同时避免了价格刚性监管的弊端, 实现了闭环防控。

关键词: 电力市场; 柔性化防范; 事中风险防范; 事后风险处置; 演化博弈; 逻辑推理机

Dynamic RPN-Based Flexible Prevention Technology for Electricity Market Price Risk

XIE Jingdong¹, GUAN Bowen², LU Chixin³

(1. Energy and Power Science and Technology Center, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. Shinan Power Supply Company of State Grid Shanghai Power Grid Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: China's electricity market, which is still in the early stage of development, is in dire need of reasonable and effective price risk prevention techniques. Firstly, the SSVM-OR-EW algorithm is used to quantify the dynamic risk coefficients of individual units and the market as a whole. Secondly, the double-insurance risk prevention and control technology of "ex-ante risk prevention & ex-post risk disposal" are studied. A two-layer model of "evolutionary game-optimization clearing" is constructed. According to the dynamic risk coefficients, soften the ex-ante risk prevention, and introduce the theory of caprice to ex-post risk disposal, and construct an expert logic deduction system to further improve the price risk prevention and control. The expert logic deduction system is constructed to further explore the possibility of unit risk and provide a realistic basis for the regulatory agencies to deal with it in accordance with the regulations. Finally, an example analysis is carried out with the data of a regional spot market, and the results show that the preventive system effectively disposes of risks while avoiding the drawbacks of rigid price regulation and realizing closed-loop prevention and control.

Key words: electricity market; flexibility prevention; ex-ante risk prevention; ex-post risk disposal; evolutionary game; logical reasoning machine

0 引言

《关于进一步加快电力现货市场建设工作的通知》(发改办体改[2023]813号)^[1]提出了加快全国统一电力市场体系建设。全国第一、二批现货市场试点省份在进行周期结算试运行的同时,出现压上限报价和出清价格脱离实际等情况,为现货市场埋下价格风险隐患^[2]。为此,《2023年能源监管工作要点》(国能发监管[2023]4号)^[3]要求进一步完善电力市场风险监管。现货市场交易中的一些参与方为攫取额外场内利益,采用技术和市场手段在政策合规性的基础上滥用市场支配力量,造成市场价格风险,严重削弱市场发现价格能力并侵害其他主体利益^[2]。因此,亟需建立一套现货市场价格风险防范体系,维护电力市场安全稳定运行。

目前,国内外对于现货市场价格风险防范已有大量研究。文献[4]基于电力刚性需求特性、价格适应性、负荷调节潜力构建市场行为评价指标体系,采用学习向量量化(learning vector quantization, LVQ)和自组织映射(self-organizing map, SOM)神经网络,提出具有类增量学习函数的风险自适应识别模型。文献[5]将市场机组分类为卡特尔机组和常规机组,针对前者提出了基于排序的多元化的Logit模型,利用概率检验来测定机组串谋竞价行为。文献[6]提炼五维指标体系评估电力市场综合风险,基于序关系-熵权法形成市场风险量化分值。文献[7]通过云发生器算法模型采用专家经验特征云描述生成法设计隐匿性市场交易行为风险识别的智能识别网络算法。文献[8]提出针对高报价段的有效容量滞留指数和针对有效量价扭曲率指数,衡量各参与者实物保留程度和成功实施预扣(财务-实物)策略所导致的财务偏差程度。文献[9]设计串谋识别指标体系,构建基于有标签和未标签数据的支持向量机的风险识别模型,实现减少输入学习数据的同时有效量化风险值。文献[10]构建结构-行为-绩效(structure-conduct-performance, SCP)识别指标体系,筛选Lasso变量,建立识别发电机组滥用市场支配力的Lasso-logit模型,并利用两种误差和受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)测试。

上述文献构建市场风险评价指标体系,利用智能算法有效识别机组串谋行为并评估风险分值,但

并未进一步开展基于价格风险识别的监控策略研究,关于如何建立风险防范模型涉及较少。文献[11]阐述了电力市场的信用风险,分析了电力市场信用风险识别的构成要素,提出了电力市场风险管理的建议。文献[12]介绍了澳大利亚电力监管体系,分析了其监管机构的澳大利亚能源监管机构(Australian Energy Regulator, AER)和澳大利亚竞争与消费者委员会(Australian Competition and Consumer Commission, ACCC)评价指标体系与方法,对比不同监管机构评估机制,对中国电力市场法律法规体系、监管职能等方面提出建议。文献[13]提出机组簇报价曲线相似度和报价滞留水平等指标,使用报价行为分析结果改进均值聚类算法,构建了现货市场交易行为风险量化模型。文献[14]纳入市场参与者的交易历史与信用状况,设定违规行为的惩罚性成本,并实施基于价格权重的拍卖结算机制,以降低违规主体在清算中的排位。文献[15]介绍了美国、英国、北欧典型电力市场监测指标和缓解方法实施现状,并给出了适用中国电力市场风险的管控意见。文献[16]回顾了发达国家及地区电力市场评价体系的发展历程,分析了评价体系内涵、评价方法以及优化方向并分析存在的问题。上述文献通过设计动力学模型或总结国外实践经验对中国电力市场监管进行了研究。然而,这些研究普遍仅停留在对国外成熟电力市场监管体系梳理的基础上给出国内市场政策建议,缺乏系统性的风险防范机制设计,模型参数设定往往无实际意义,对于风险防范策略多为定性设计且无法量化,同时缺乏长时间尺度的风险监控策略动态调整,相应的风险防范效果无法验证。

综上,本文从全流程闭环防范价格风险的角度设计了长周期动态监测与柔性防范体系。首先,采用半监督支持向量机-序关系-熵权算法,构建了机组个体和市场综合最优风险系数二维识别模型;其次,基于演化博弈论设计了事中风险防范机制构建了“演化博弈-优化出清”模型对市场价格风险进行快速防范;然后,引用盖然性理论设计了事后风险处置机制,从行使条件、行使动机和历史表现3个方面建立风险逻辑推理机,深入挖掘任何风险存在可能性,为监管机构行政处置提供现实依据;最后,将该体系应用于某地区现货市场进行有效性验证。值得一提的是,本文主要针对由市场力行为所

导致的价格风险问题,暂不考虑一次能源成本波动和不同季候负荷特性等因素。

1 风险柔性化防范思路与流程

1.1 柔性防范思路

目前国内主流的价格风险防范方法为采用报价替代、报价限制、结算限价和二次限价^[11, 14]等,人为替代过高的申报或结算电价,这类方法一定程度上化解了电价过高的风险,但仍无法最大限度缓解或解决由市场结盟所形成的市场力。与此同时,过强的行政化电价干预手段很大程度上削弱了市场发现价格的能力。长久来看,仍需研究一些以市场化为基础的价格风险防范方法,灵活有效地防范化解市场力,同时避免刚性监管手段对电力市场长期健康运行所带来的损害。

本文从市场化防控角度出发,所提柔性风险防范体系以机组和市场风险程度而非单一电价高低为考量,处罚阈值一旦确定后,在一轮监管周期内可保持不变,处罚力度则根据量化的市场主体动态最优风险系数(risk priority number, RPN)和市场综合动态RPN变化而变化,以事中防范技术和事后处置技术为主要支撑,实现电力市场价格风险的动态柔性化处置,避免传统报价替代方法的“一刀切”弊端,有效还原电力电量的市场化属性^[17]。同时,通过监管机构的风险柔性化防范,从内部打破联盟成立的动机,最大限度地降低由联盟市场力所导致的价格风险。

事中防范通过构建报价修正函数并建立自适应“演化博弈-优化出清”模型,在出清过程中,经过

市场运营机构和市场主体的演化博弈,针对不同的市场主体RPN和市场综合RPN,自适应正向调节处罚力度,即报价修正幅度。通过削弱风险主体出清排序优先级,迫使其降低竞价风险程度,实现事中风险防范。事后处置在市场出清结束后,结合风险主体历史表现和信用记录等信息,采用专家经验知识库和逻辑分析推理机进一步研判事中未处罚的风险机组。根据法律领域的盖然性规则将风险可能性推理转化为依法行政处置的现实依据。

将风险量化、事中防范和事后处置相结合,在面对市场群体化风险时,针对个体风险程度作柔性化动态防范,处置群体性高报价和串谋等风险。基于动态RPN的风险柔性化防范思路如图1所示。

1.2 柔性防范流程

本文的风险柔性化动态防范应用流程主要分为5个阶段,如图2所示。

1)风险监测阶段。动态计算市场主体的申报数据、市场份额和市场供需等动态指标,初步筛选指标值异常的机组,生成黄色预警机组集合。为不漏漏任何机组,该阶段阈值设置较为宽泛。

2)风险识别阶段。进一步筛选黄色预警机组中的风险对象。聚焦机组量价曲线数据,从多视角联合识别风险主体的风险类型并量化机组RPN,动态筛选异常值,生成橙色预警机组集合。

3)事中风险防范。在考量橙色预警机组RPN、利用率和经济收益等指标的基础上,量化市场风险规模与风险程度,更新演化博弈收益矩阵,动态调整处罚力度,完成柔性化防范。

4)风险分析阶段。借鉴司法调查思路,从行使

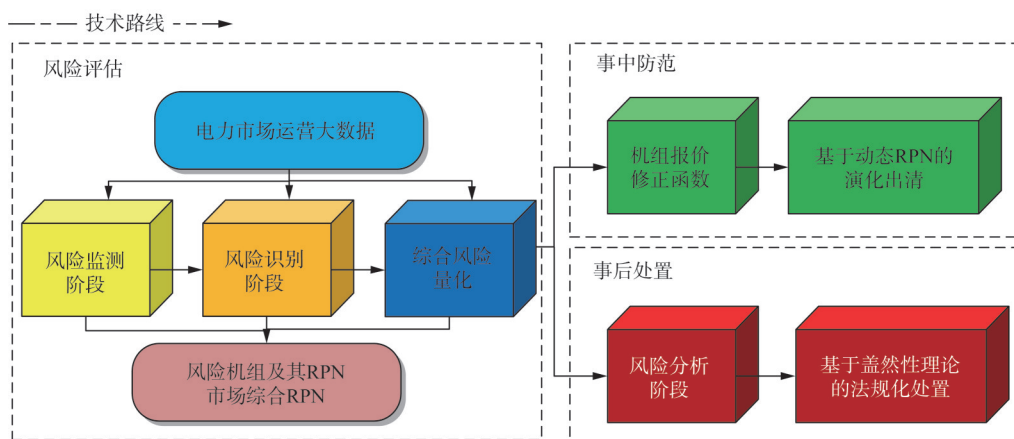


图1 柔性化风险防范体系框架

Fig. 1 Flexible risk prevention system framework

条件、行使动机和历史表现进行三维研判,采用专家知识库和逻辑推理机,逐维修正风险机组 RPN。

5)事后处置阶段。基于盖然性理论,对事中阶段未处罚的橙色预警机组编制风险分析报告,如风险类型、风险程度、发生时间和发生原因等信息,上呈电力市场监管部门进行法规化处置。

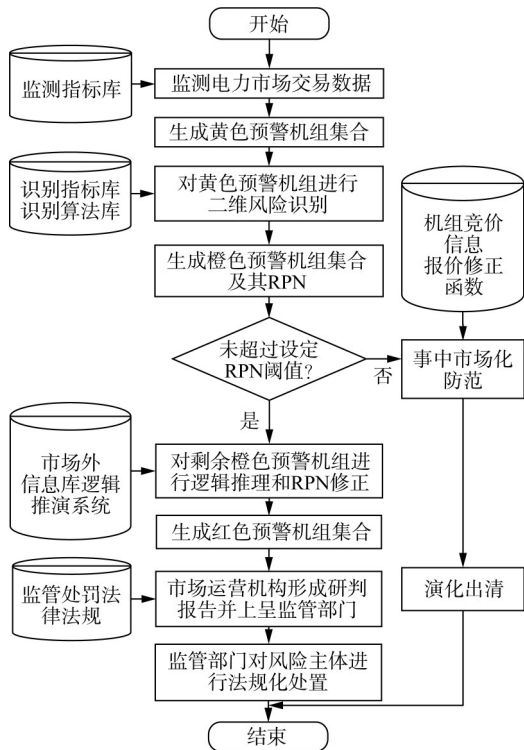


图2 柔性化风险防范流程

Fig. 2 Flexible risk prevention process

2 风险量化评估模型

2.1 评估算法

风险评估采用半监督支持向量机-序关系-熵权(semi-supervised support vector machine-order relation-entropy weight, SSVM-OR-EW)联合机器学习算法量化市场个体 RPN, 引用设计失效模式与影响分析(design failure mode and effects analysis, DFMEA)风险管理理论中的严重度-发生频度-探测度(severity-occurrence-detection, SOD)风险系数法评估市场综合 RPN。

2.1.1 SSVM-OR-EW 算法

SSVM-OR-EW 联合算法的优点和作用具体参考先前工作^[6, 9]。通过 SSVM-OR-EW 算法量化每个维度下的个体 RPN 后, 采用动态加权综合评价法

进行综合加权, 最终得到个体多维综合 RPN。基于动态加权法^[18], 机组风险系数 p 如式(1)所示。

$$p = \omega_1(p_1)p_1 + \omega_2(p_2)p_2 \quad (1)$$

式中: $\omega_i(p_i) = 1 - \exp(-(p_i/\sigma)^2)$, $i=1, 2$ 。其中, σ 为风险因子, p_i 为第 i 个机组的风险系数, $\omega_i(p_i)$ 为第 i 个机组风险系数的权重。设定某维度下风险系数 p 超过 0.8 时, 其隶属权重需要放大到 0.95 以上, 即 $0.95 = 1 - \exp(-(0.8/\sigma)^2)$, 可得 $\sigma = 0.46$ 。

2.1.2 SOD 风险系数法

SOD 风险系数评估法源自 DFMEA 理论^[19], 从风险程度 S (severity)、风险可能性频率 O (occurrence)以及风险探测度 D (detection)开展三维打分, 如表 1—3 所示。市场综合 RPN 量化评估值 M_{RPN} 如式(2)所示。

$$M_{RPN} = S \times O \times D \quad (2)$$

表 1 风险严重度 S 分类等级

Tab. 1 Risk severity S classification levels

风险严重程度	最终红色预警机组所占比例 R	风险严重度 S 的评分
无	$R < 0.0005$	1
很轻微~轻微	$0.0005 < R < 0.0001$	2~3
很低~低	$0.0001 < R < 0.005$	4~5
中等	$0.005 < R < 0.01$	6
较高	$0.01 < R < 0.02$	7
高	$0.02 < R < 0.05$	8
严重危害	$0.05 < R < 1$	9~10

表 2 风险发生概率 O 分类等级

Tab. 2 Probabilities of risk occurrence O classification levels

风险发生概率	风险发生概率 O 等级划分	风险系数 O 评分
很低	$0.0001 > O$	1
低	$0.001 > O > 0.0001$	2~3
	$0.005 > O > 0.001$	
中	$0.01 > O > 0.005$	4~6
	$0.02 > O > 0.01$	
	$0.05 > O > 0.02$	
高	$0.1 > O > 0.05$	7~8
	$0.2 > O > 0.1$	
很高	$0.5 > O > 0.2$	9~10
	$1 > O > 0.5$	

2.2 模型架构

2.2.1 风险动态监测

风险监测指标库如表 4 所示^[9]。监测指标库包

表 3 市场价格风险可探测度 D 分类等级

Tab. 3 Market price risk detectability D classification levels

风险可探测度	可探测水平 D 等级划分	可探测水平 D 的评分
极少、绝对不可能	可能性非常微小或无法被查出	1
较少、很少	可能性微小或少许机会被查出	2~3
少	较低可能被查出	4
中等	适中可能被查出	5
中上	稍高可能被查出	6
很多~多	非常高可能性或较高可能性被查出	7~8
几乎肯定	可查出	9~10

括机组报价水平和报价曲线相关系数指标, 将机组的市场量价数据输入指标公式计算相应分值, 若机组某指标超过阈值, 则对该机组发布黄色预警机组集合 G_{cy} 。将风险监测阶段的指标综合加权, 计算得到机组风险分值。

表 4 风险监测指标库

Tab. 4 Risk monitoring indicator pool

序号	风险监测阶段去相关性指标
1	机组报价水平
2	报价曲线相关系数

2.2.2 风险分类辨识

识别指标库包括市场类指标和机组类指标, 当黄色预警机组的某识别指标达到阈值时, 发布橙色预警, 挖掘具有潜在风险的机组。风险识别指标库如表 5 所示^[9-11]。

表 5 风险识别指标库

Tab. 5 Risk identification indicator library

特征视角	指标集合
报价相似性视角	报价一致性
	报量一致性
	机组报价水平
	静态市场份额
极高报价视角	机组量价指数
	机组高报价比率

电力市场价格风险具有报价相似性、极高报价等特征^[14]。因此, 风险辨识阶段这两种特征为判定视角, 选取相应的子指标, 分别采用 SSVM 和 OR-EW 算法, 进一步计算集合 G_{cy} 中的个体 RPN, 分

别记作 p_1 和 p_2 , 然后通过动态加权法计算机组在该阶段最终的风险系数 p 。最后, 更新橙色预警机组集合 G_{co} 。风险识别架构如图 3 所示。

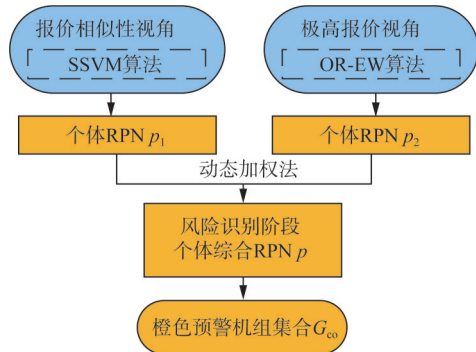


图 3 风险识别架构

Fig. 3 Risk identification framework

2.2.3 综合风险量化

市场综合风险量化采用 SOD 风险系数法, S 、 O 和 D 单方面分值区间为 $[1, 10]$, 市场综合 RPN 在 3 个方面的得分乘积区间为 $[1, 1\ 000]$ 。一般来说, 若某一方面的风险数值高于 8, 或综合 RPN 高于 100, 则系重大市场风险, 亟需防范化解^[19]。

3 风险柔性化防范机制

风险柔性化防范机制包含两大模块: 1) 事中风险防范; 2) 事后风险处置, 两者共同作用, 实现电力市场价格风险闭环防范。

3.1 事中风险防范技术

3.1.1 综合风险量化

报价修正函数由两个部分组成: 机组 RPN 及风险评估函数。将机组 RPN 数值输入机组风险评估函数, 作为报价修正函数的自变量, 计算得到因变量值, 实现与风险主体的风险报价修正度的量化, 事中防范机制框架如图 4 所示。

3.1.2 机组风险评估函数

风险评估函数以机组 RPN 为自变量, 风险评估值为因变量, 当机组 RPN 增大时, 其风险评估值呈指数级上升, 如式(3)所示。

$$F(p) = ap^2 \quad (3)$$

式中: $F(p)$ 为机组风险评估函数; a 为调形系数, 对评估函数起到缩放作用。

3.1.3 机组报价修正函数

根据机组风险评估函数和风险主体初始量价数

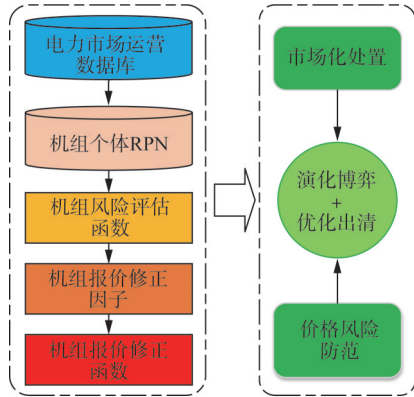


图4 事中风险防范框架流程

Fig. 4 Ex-ante risk prevention framework process

据修正风险机组初始报价，如式(4)所示。

$$\lambda'_{i,n}(Q_{i,n}) = \lambda_{i,n}(Q_{i,n}) \times [1 + F(p)] \quad (4)$$

式中： $\lambda_{i,n}(Q_{i,n})$ 为机组 n 在时段 t 的报价函数； $\lambda'_{i,n}(Q_{i,n})$ 为 $\lambda_{i,n}(Q_{i,n})$ 的修正函数； $F(p)$ 为机组风险评估函数； $Q_{i,n}$ 为机组 n 在时段 t 的中标量。

3.1.4 演化出清模型架构

演化出清模型为上下层迭代模型，作为实现价格风险柔性化防范机制的模型基础具有“领导-追随”双层结构，上层为演化博弈层，博弈参与方有监管机构和风险主体，下层为市场出清层，如图5所示。

3.1.4.1 上层模型

博弈参与方的纯策略博弈矩阵如表6所示。

表6 博弈参与方策略及收益矩阵

Tab. 6 Strategy and payoff matrix of game players

组合	选择概率	风险机组竞价策略	监管机构处罚策略	风险机组收益	监管机构收益
1	x, y	中高风险	强	$A_{d,1}$	$B_{d,1}$
2	$1-x, y$	低风险	强	$A_{d,2}$	$B_{d,2}$
3	$x, 1-y$	中高风险	弱	$A_{d,3}$	$B_{d,3}$
4	$1-x, 1-y$	低风险	弱	$A_{d,4}$	$B_{d,4}$

表6中 x 、 y 分别为两个博弈参与方的策略选择概率，收益参数 $A_{d,i}$ 、 $B_{d,i}$ 均为正向指标，表示策略组合 i 在交易日 d 的收益，分别由多个子收益参数构成。收益参数 $A_{d,i}$ 主要考虑机组物理运行和经济收入层面，物理层面衡量指标如式(5)所示。

1) 机组相对利用率 $U_{n,d,t}$ ^[20]

$$U_{n,d,t} = \frac{P_{n,d,t}}{L_n} \times \frac{L_{d,t}^{eq}}{L} \quad (5)$$

式中： $P_{n,d,t}$ 为交易日 d 机组 n 在 t 时刻的中标容量； L_n 为风险机组 n 的装机容量； $L_{d,t}^{eq}$ 为第 d 个交易日系统在 t 时刻的负荷； L 为市场总装机容量。

经济层面衡量指标如式(6)——(8)所示。

2) 期望收益偏差率 $D_{n,d,t}$

衡量连续两年机组收益的差别，计算方式如式(6)所示。

$$D_{n,d,t} = \frac{C_{n,d,t} - R_{n,d,t}}{C_{n,d,t}} \quad (6)$$

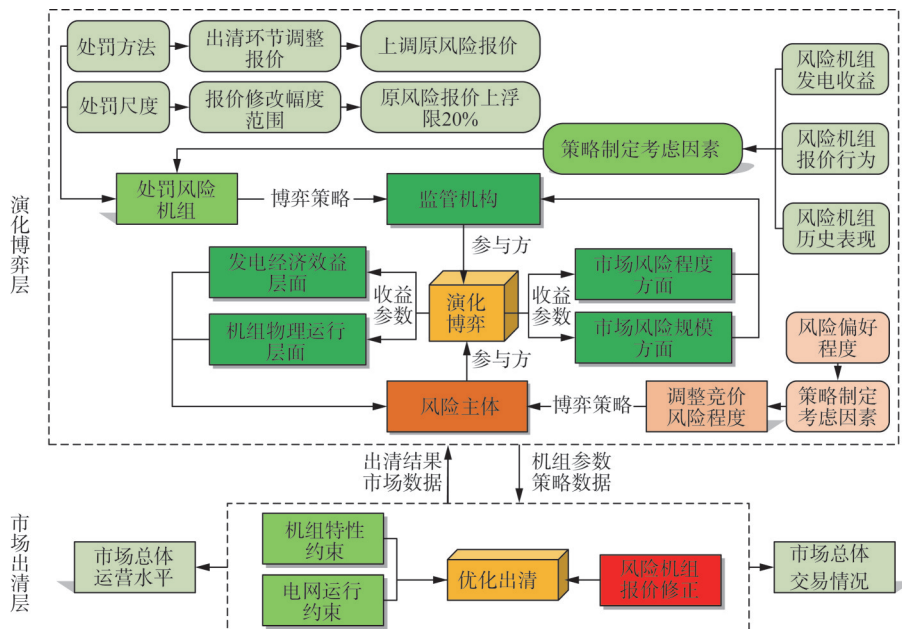


图5 演化出清模型框架

Fig. 5 Evolutionary clearance modeling framework

式中: $C_{n,d,t}$ 为在 d 交易日 t 时刻机组 n 的实际收益;
 $R_{n,d,t}$ 为在去年机组 n 的同比收益。

3) 财务收入水平 $L_{n,d,t}$

量化机组的发电收益脱离市场中其他主体平均发电收入的程度, 计算公式如式(7)所示。

$$L_{n,d,t} = \frac{B_{n,d,t}}{\overline{B}_{d,t}} \quad (7)$$

式中: $B_{n,d,t}$ 为 d 交易日机组 n 在 t 时刻的收入; $\overline{B}_{d,t}$ 为所有市场机组在 d 交易日 t 时刻的平均收益。通过汇总计算机组经济收益与物理运行的子收益指标, 可得 d 交易日风险机组 n 在 t 时刻的收益参数 $A_{n,d,t}$, 如式(8)所示, 继而得到风险群体的收益参数 $A_{d,i}$, 如式(9)所示。

$$A_{n,d,t} = \theta_1 U_{n,d,t} + \theta_2 D_{n,d,t} + \theta_3 L_{n,d,t} \quad (8)$$

$$A_{d,i} = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_{n=1}^N A_{n,d,t}}{N_{d,t}} / T \quad (9)$$

式中: $\theta_1 - \theta_3$ 为指标权重; $N_{d,t}$ 为 d 交易日 t 时刻风险机组数量; T 为一个交易日的交易总时段数量, 本文取 24; N 为参与交易的机组数量。收益参数 $B_{d,i}$ 主要考虑市场风险程度和风险规模方面, 市场风险程度衡量指标如式(10)~(12)所示。

4) 平均报价相对水平 $L_{d,t}^Q$ [21]

衡量某台机组的报价偏离同行整体平均报价的程度, 计算公式如式(10)所示。

$$L_{d,t}^Q = \sum_{n=1}^N \frac{\overline{p}_{n,d,t} - \sum_{j \neq n} \overline{p}_{j,d,t} / N}{\sum_{j \neq n} \overline{p}_{j,d,t} / N} / T \quad (10)$$

式中: $\overline{p}_{n,d,t}$ 为 d 交易日 t 时刻机组 n 的平均报价;
 $\overline{p}_{j,d,t}$ 为 d 交易日 t 时刻机组 j 的平均报价。

5) 中高风险机组占有所有风险机组比重 $V_{d,t}$

$$V_{d,t} = \frac{H_{d,t}}{N_{d,t}} \quad (11)$$

式中 $H_{d,t}$ 为 d 交易日 t 时刻中高风险机组数量。

将风险机组占有所有交易机组比重作为市场风险规模衡量指标, 如式(12)所示。

$$D_{d,t} = \frac{N_{d,t}}{N} \quad (12)$$

由市场风险程度与市场风险规模方面的子收益指标, 可得监管机构在 d 交易日 t 时刻的收益 $B_{d,t}$, 如式(13)所示, 继而得到监管机构收益参数 $B_{d,i}$ 如式

(14)所示。

$$B_{d,t} = \omega_1 V_{d,t} + \omega_2 D_{d,t} + \omega_3 L_{d,t}^Q \quad (13)$$

$$B_{d,i} = \sum_{t=1}^T B_{d,t} / T \quad (14)$$

式中 $\omega_1 - \omega_3$ 为指标权重。

3.1.4.2 下层模型

下层模型为优化出清层, 是事中风险防范机制的落地环节, 在市场出清环节向上修正风险机组报价, 以市场化手段约束风险机组中标容量。将风险机组与无风险机组的报价信息一同输入, 统一出清。目标函数和约束条件等内容详见文献[14], 不再赘述。

演化出清模型采用由上至下的循环迭代流程, 具体步骤如图6所示。



图6 模型迭代流程图

Fig. 6 Model iteration flowchart

3.1.5 博弈参与方量化策略

3.1.5.1 监管机构策略制定

监管机构风险防范策略的制定考虑主、客观因素, 实施方法为调整机组报价修正函数的调形系数 a 。市场客观因素从风险机组的发电收益历史表现和报价行为3个方面制定指标。衡量风险机组发电

收益方面指标如式(15)~(17)所示。

1) 机组电价偏离程度 $P_{n,d}$ [22]

衡量风险机组出清电价偏离同成本类型机组平均出清电价的程度。

$$P_{n,d} = \sum_{t=1}^T \frac{\lambda_{n,d,t}^r - \overline{\lambda_{n,d,t}^c}}{\overline{\lambda_{n,d,t}^c}} / T \quad (15)$$

式中: $\lambda_{n,d,t}^r$ 为 d 交易日风险机组 n 在 t 时刻的出清电价; $\overline{\lambda_{n,d,t}^c}$ 为 d 交易日正常机组(与风险机组 n 同成本类型)在 t 时刻的平均出清电价。

2) 机组高价中标率 $R_{n,d}^h$

计算机组中标电量占报高价的有效申报电量的比例。

$$R_{n,d}^h = \sum_{t=1}^T \frac{Q_{n,d,t}^h}{q_{n,d,t}^h} / T \quad (16)$$

式中: $Q_{n,d,t}^h$ 为风险机组 n 在 d 交易日 t 时刻报高价且中标的有效中标电量; $q_{n,d,t}^h$ 为风险机组 n 在 d 交易日 t 时刻报高价的有效申报电量。高报价下限为所有报价的前四分之一。

3) 实际加成指数 $A_{n,d}^1$ [23]

实际加成指数衡量市场出清电价偏离机组发电边际成本的程度, 如式(17)所示。

$$A_{n,d}^1 = \sum_{t=1}^T \frac{\lambda_{n,d,t}^r - C_{n,d,t}^{\text{ac}}}{C_{n,d,t}^{\text{ac}}} / T \quad (17)$$

式中 $C_{n,d,t}^{\text{ac}}$ 为风险机组 n 在 d 交易日 t 时段的发电成本。

监管策略中衡量风险机组发电收益的总指标。

$$I_{\text{RUGR}_{n,d}} = \eta_1 P_{n,d} + \eta_2 R_{n,d}^h + \eta_3 A_{n,d}^1 \quad (18)$$

式中 η_1 — η_3 为指标权重。

判断风险机组的历史表现的指标分为: 机组历史异常级别和机组信用级别。

1) 历史异常级别

通过统计历史中机组被标记为风险的次数, 评估其异常等级。

2) 机组信用级别

根据有关部门对发电企业的综合信用记录, 评估其信用等级。

衡量风险机组报价行为方面指标如式(19)~(20)所示。

(1) 极端申报容量配置 $W_{n,d}$ [23]

判断机组通过策略性地调整其可发容量至高报价段, 利用市场力量获取超额电价, 而其中标出力

并未显著降低的情形。

$$\begin{cases} W_{n,d} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \frac{p_{n,d,t,k}^r q_{n,d,t,k}^r}{\lambda_{\max} Q_n} / T \\ \text{s.t.} \begin{cases} \lambda_{n,d,t,v-1}^r \leq C_{n,d,t}^{\text{ac}} < \lambda_{n,d,t,v}^r \\ \sum_{k=1}^{v-1} q_{n,d,t,k}^r < 90\% q_{n,d,t}^r \leq \sum_{k=1}^v q_{n,d,t,k}^r \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $W_{n,d}$ 为风险机组 n 在 d 交易日的相对持留指标; K 为满足约束的最大报价段数; $p_{n,d,t,k}^r$ 和 $q_{n,d,t,k}^r$ 分别为风险机组 n 在 d 交易日 t 时刻的第 k 段报价和报量; $\lambda_{\max}$ 和 Q_n 分别为市场规定报价上限和第 n 个边际机组的可用容量; v 为机组数量。

(2) 最大报价邻差指标 $\Delta_{n,d}^{\max}$

判断机组将大部分可发容量设定在低报价段确保中标, 同时保留小部分可发容量在高报价段, 以此策略性地影响市场出清价格。

$$\Delta_{n,d}^{\max} = \begin{cases} 1, \max_{1 \leq k \leq K-1} \{p_{n,d,t,k+1}^r - p_{n,d,t,k}^r\} \geq \delta(p_{\max} - p_{\min}) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $p_{\max}$ 、 $p_{\min}$ 分别为市场规定报价上限和下限; δ 为规定邻差幅度系数。

监管策略中衡量风险机组报价行为的总指标。

$$I_{\text{RUOB}_{n,d}} = \pi_1 W_{n,d} + \pi_2 \Delta_{n,d}^{\max} \quad (21)$$

式中 π_1 、 π_2 为指标权重。

基于博弈论有限理性假设, 监管机构的策略选择概率 y 和 $1-y$ 反映了其对报价修正的主观倾向。 y 越大, 监管机构倾向于采取更严厉的处罚策略, 相应地, 报价修正力度也越大, 反之亦然。报价修正力度 a 的取值如式(22)~(23)定义。

$$a_1 = a_0 \times (\mu_1 C_1 + \mu_2 C_2) \times S_1(y) \quad (22)$$

$$a_2 = a_0 \times (\mu_1 C_1 + \mu_2 C_2) \times S_2(y) \quad (23)$$

式中: 报价修正力度 a 在 a_1 (强处罚)和 a_2 (弱处罚)之间, 取值范围为 $[0.8, 1.2]$; a_0 为初始报价修正力度; C_1 和 C_2 为根据发电收益、报价行为及历史表现量化计算而来的客观修正因子; μ_1 和 μ_2 为相应的权重; $S_1(y)$ 和 $S_2(y)$ 为监管方的主观处罚意愿对策略的修正因子。

3.1.5.2 机组风险竞价策略

风险机组在基准报价基础上调整其竞价策略以反映风险程度。作为有限理性参与者, 且与监管机构存在信息不对称, 机组倾向于根据主观风险偏好来制定其竞价策略^[13]。具体的高风险和低风险竞价

策略 $\lambda_{i,n}^h$ 、 $\lambda_{i,n}^l$ 分别在式 (24) — (25) 中给出。

$$\lambda_{i,n}^h = \lambda_{i,n} S_1(x) \tag{24}$$

$$\lambda_{i,n}^l = \lambda_{i,n} S_2(x) \tag{25}$$

式中: $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$ 为风险偏好因子, 量化主体风险偏好水平; $\lambda_{i,n}$ 为在 t 时刻风险机组 n 的基准报价。参考文献 [24—25], 风险报价的调整范围被限定在基准风险报价的 $\pm 10\%$ 。

3.1.5.3 策略因子与修正因子计算

量化博弈策略数据, 需基于模糊数学理论, 建立指标数据模糊分类规则, 从而得到策略修正因子和风险偏好因子。分类规则如下。

1) 策略选择概率

将概率集合 $\{x, y, 1-x, 1-y\}$ 划分为 4 个等级, 具体分类方式参照表 7。

表 7 概率模糊分类等级

Tab. 7 Probabilistic fuzzy classification grades

概率	分类等级			
	小	较小	较大	大
$x, y/x, 1-y$	[0, 0.25]	[0.25, 0.5]	[0.5, 0.75]	[0.75, 1]

2) 指标数据

风险机组发电收益总指标 $I_{RUGR_{n,d}}$ 和报价行为总指标 $I_{RUOB_{n,d}}$ 分别根据市场出清数据 4 等分, 具体模糊划分规则如表 8 所示。历史表现指标数据模糊分类同理, 如表 9 所示。

表 8 收益指标模糊分类等级

Tab. 8 Profuse index fuzzy classification grades

指标名称	模糊分类等级			
	小	较小	较大	大
$I_{RUGR_{n,d}}$	$[0, j_1]$	$(j_1, j_2]$	$(j_2, j_3]$	$(j_3, +\infty)$
$I_{RUOB_{n,d}}$	$[0, g_1]$	$(g_1, g_2]$	$(g_2, g_3]$	$(g_3, +\infty)$

注: j_1-j_3 和 g_1-g_3 分别为 $I_{RUGR_{n,d}}$ 和 $I_{RUOB_{n,d}}$ 的四分位数。

表 9 表现指标模糊分类表

Tab. 9 Fuzzy classification table of performance indicators

指标名称	模糊分类等级			
	好	较好	较差	差
历史异常等级	$[0, e_1]$	$(e_1, e_2]$	$(e_2, e_3]$	$(e_3, +\infty)$
信用等级	A	B	C	D

注: e_1-e_3 为历史异常等级的四分位数。

为确定监管策略中的修正因子和风险机组策略中的风险因子, 须建立它们与相关指标之间的隶属

度函数关系。

修正因子 C_1 和 C_2 的隶属度函数如式 (26) — (27) 所示。

$$C_1 = \varphi_1 e^{p_1 + p_2} + \nu_1 \tag{26}$$

$$C_2 = \frac{\varphi_2}{q_1 + q_2} + \nu_2 \tag{27}$$

式中: p_1 分别取 1、2、3、4 与 $I_{RUGR_{n,d}}$ 为小、较小、较大、大建立隶属度关系; $I_{RUOB_{n,d}}$ 与 p_2 的隶属度关系同理; q_1 分别取 1、2、3、4 与机组历史异常等级为差、较差、较好、好建立隶属度关系; 信用等级与 q_2 的隶属度关系同理; φ_1 、 ν_1 、 φ_2 、 ν_2 为待定系数。

$S_1(y)$ 和 $S_2(y)$ 由 a 、 C_1 、 C_2 决定, 分别与概率 y 、 $1-y$ 均成隶属度函数, 如表 10 所示。 $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$ 由风险机组报价上下限值确定, 同理如表 11 所示。

表 10 $S_1(y)$ 与 $S_2(y)$ 隶属度关系

Tab. 10 Affinity relationship of factors $S_1(y)$ and $S_2(y)$

修正因子	概率 $y, 1-y$ 分类等级			
	小	较小	较大	大
$S_1(y)$	1.000	1.017	1.034	1.050
$S_2(y)$	1.000	0.944	0.887	0.830

表 11 $S_1(x)$ 与 $S_2(x)$ 隶属度关系

Tab. 11 Affinity relationship of risk factors $S_1(x)$ and $S_2(x)$

风险因子	概率 $x, 1-x$ 分类等级			
	小	较小	较大	大
$S_1(x)$	1.000	1.033	1.066	1.100
$S_2(x)$	1.000	0.966	0.933	0.900

3.2 事后风险处置技术

引入盖然性理论^[26], 聚焦于事中未受处罚的橙色预警机组, 收集其风险线索, 经过推理分析形成证据链, 对超过 RPN 阈值的风险机组发布红色预警, 形成监管机构法规化处置依据。

3.2.1 风险逻辑推理机

逻辑推理机利用专家知识对事中未受处罚的橙色预警机组推理分析, 包含主要因素及佐证因素, 如图 7 所示。

主要因素是指风险识别阶段得到的机组 RPN; 佐证因素是指由行使动机、行使条件和历史表现 3 方面选定指标^[14], 如表 12 所示。由指标确定隶属度函数, 逐级修正机组 RPN 值。

风险逻辑推理流程如图 8 所示。

具体步骤如下。

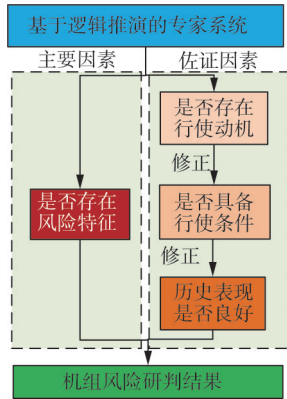


图7 风险推理机分析框架

Fig. 7 Analytical framework for risk inference machines

表 12 风险逻辑推理机考虑因素及其指标

Tab. 12 Risk logic reasoning machine considerations and their indicators

一级指标	二级指标
行使动机	机组电价偏离程度 发电企业市场份额
行使条件	市场高供需比程度 市场低供需比程度
历史表现	历史异常等级 信用等级

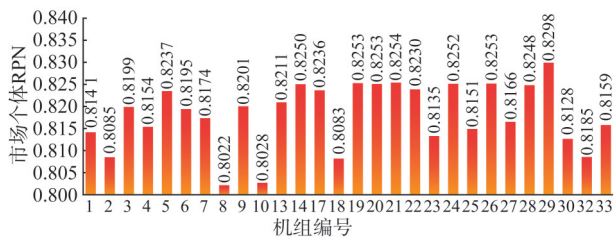


图8 动态加权后的个体RPN

Fig. 8 Individual RPN after dynamic weighting

步骤 1: 输入机组 RPN 分值 p , 若 $p < N_{s2}$ (N_{s2} 为某个常值), 计算该台机组的行使动机修正系数 Z_1 , 更新 $p = Z_1 p$, 转步骤 2; 反之, 发布红色预警, 推理结束。

步骤 2: 若 $N_{s1} < p < N_{s2}$ (N_{s1} 为某个常数) 则计算该台机组的行使条件修正系数 Z_2 , 更新 $p = Z_2 p$, 转步骤 3; 若 $p \geq N_{s2}$, 则发布红色预警, 结束推理; 若 $p \leq N_{s1}$, 则判定合规, 结束推理。

步骤 3: 若 $p > N_{s1}$ 且小于 N_{s2} , 则计算该台机组的历史表现修正系数 Z_3 , 更新 $p = Z_3 p$, 转步骤 4, 其余同步骤 2。

步骤 4: 若 $p < N_{s2}$, 则判定合规, 结束推理; 反

之, 则发布红色预警。

4 算例分析

以市场串谋为例, 数据采用国内某地单日现货市场试运行市场信息和机组数据, 共有 33 台机组参与市场交易, 均为火电机组。所有指标数据在计算时均已正向极值标准化处理, 区间范围为 $[0, 1]$ 。

4.1 风险量化评估

风险监测阶段计算 33 台机组在报价曲线相关系数和报价水平两项指标分值。指标阈值采用均数法设定, 机组任一指标超过阈值则将其纳入黄色预警机组集合 G_{CY} 。 $G_{CY} = \{ \text{机组 1—10, 13—14, 17—30, 32, 33} \}$, 黄色预警机组数占比为 84.85 %。

风险识别阶段在报价相似性视角下, 基于 SSVm 算法的黄色预警机组 RPN 分值 p_1 , 在极高报价视角下, 基于 OR-EW 算法的黄色预警机组 RPN 分值 p_2 。将 p_1 、 p_2 动态加权, 计算权重 $w_1(p_1)$ 和 $w_2(p_2)$, 得到个体 RPN 分值 p , 如图 8 所示。基于标准阈值设定方法中的均数原则法, 将 p 值超过 0.818 的机组纳入橙色预警机组集合 G_{CO} 。 $G_{CO} = \{ \text{机组 3, 5—6, 9, 13, 14, 17, 19—22, 24, 26, 28—29} \}$ 。

共有 15 个橙色预警机组, 占比为 $R=0.45$, 由表 1 可知 $S=9$ 分。由于电力市场仍处于建设初期, 专家认定价格风险被以中等的机会被查出, 由表 3 可知 $D=6$ 分。再采用专家征询法确定该研究周期内风险发生概率为 0.01~0.02, 则由表 2 可知 $O=5$ 分, 如图 10 所示。电力市场综合 RPN 值 $= S \times O \times D = 270$, 可以判定此周期内市场风险水平较高。

4.2 事中风险防范

假定机组在出清时保持自身风险性质不变, 风险竞价策略在每轮交易中可以改变, 而非风险机组保持不变。令策略概率 x 为 0.7, 策略概率 y 为 0.6, 即 (0.7, 0.6) 为首轮迭代的初始演化稳定均衡点。将其连同机组量价数据, 以及计算得到的报价修正力度数据和策略数据带入演化出清模型, 得到首轮迭代演化博弈收益矩阵, 如表 13 所示。

在决策空间 $[0, 1] \times [0, 1]$ 内以 1/10 为间隔, 即经过 121 次重复博弈动态仿真的演化空间状态如图 9 所示, ESE 点收敛至 (0, 1), 双方首轮 ESS 为

表 13 首轮迭代演化博弈收益矩阵

Tab. 13 First iteration evolutionary game payoff matrix

收益矩阵		监管机构	
		强处罚 B_1 ($y=0.6$)	弱处罚 B_2 ($1-y=0.4$)
风险主体	中高风险竞价策略 A_1 ($x=0.7$)	(0.36, 0.57)	(0.43, 0.69)
	低风险竞价策略 A_2 ($1-x=0.3$)	(0.69, 0.64)	(0.86, 0.74)

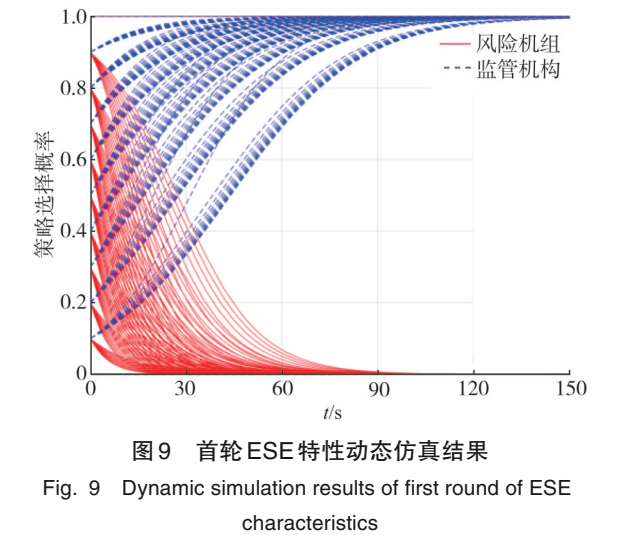


图 9 首轮 ESE 特性动态仿真结果

Fig. 9 Dynamic simulation results of first round of ESE characteristics

表 14 二轮迭代后的演化收益矩阵

Tab. 14 Evolutionary payoff matrix after two iterations

收益矩阵		监管机构	
		强处罚 B_1 ($y=0$)	弱处罚 B_2 ($1-y=1$)
风险主体	中高风险竞价策略 A_1 ($x=0$)	(0.72, 0.69)	(0.81, 0.61)
	低风险竞价策略 A_2 ($1-x=1$)	(0.76, 0.73)	(0.86, 0.76)

最终 ESE 点收敛至(0, 0), 双方在此轮博弈的 ESS 组合为表 6 的策略组合 4, 演化空间状态如图 10 所示。

第三轮迭代后收益矩阵如表 15 所示。

此轮博弈的演化空间状态依旧收敛至(0, 0), 如图 11 所示。双方 ESS 组合为策略组合 4。

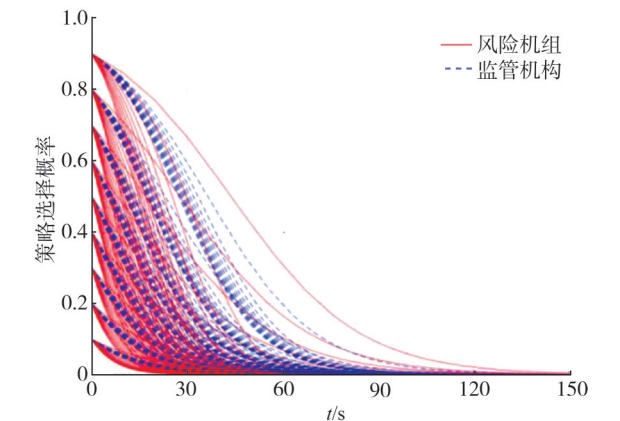


图 10 二轮 ESE 特性动态仿真结果

Fig. 10 Dynamic simulation results of second round ESE characteristics

表 15 三轮迭代后的演化收益矩阵

Tab. 15 Evolutionary payoff matrix after three iterations

收益矩阵		监管机构	
		强处罚 B_1 ($y=0$)	弱处罚 B_2 ($1-y=1$)
风险主体	中高风险竞价策略 A_1 ($x=0$)	(0.67, 0.64)	(0.76, 0.56)
	低风险竞价策略 A_2 ($1-x=1$)	(0.71, 0.68)	(0.81, 0.71)

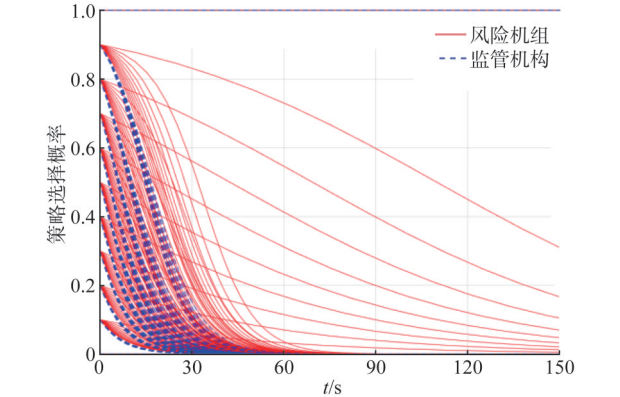


图 11 三轮 ESE 特性动态仿真结果

Fig. 11 Dynamic simulation results of third round ESE characteristics

第 4 轮迭代演化博弈收益矩阵如表 16 所示, 收益矩阵不再变化, 即博弈双方 ESE 固定。当系统和机组参数、市场环境和供需不再变化时, 出清结果亦不发生变化, 满足判定条件, 退出迭代。

风险机组在模型迭代前后中标容量对比详见图 12。

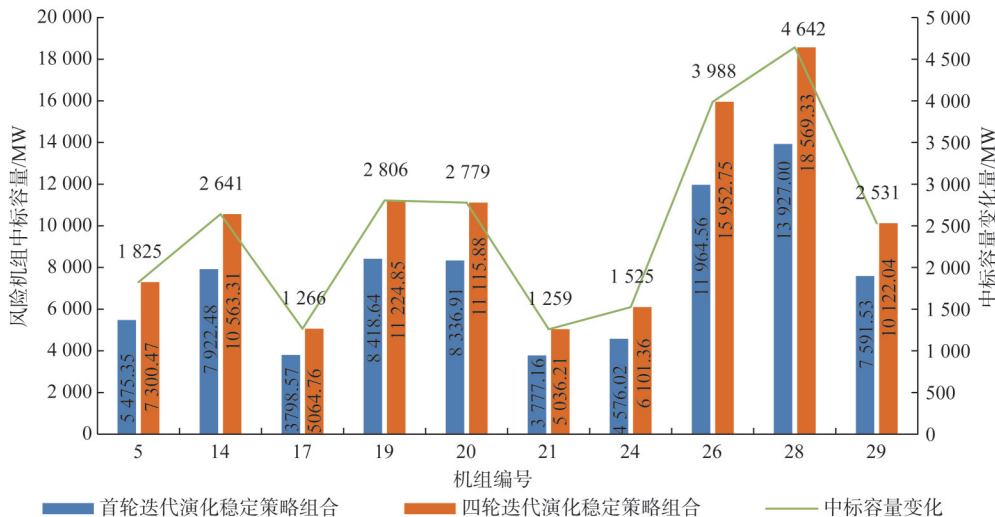


图 12 演化出清迭代前后风险机组中标容量变化

Fig. 12 Change in winning capacities of risky units before and after evolutionary clearing iterations

风险机组采用了低风险竞价策略，监管机构采用弱处罚，使得最终风险机组中标容量相较于首轮呈现不同程度的升高。其中，28号机组变化幅度最大，达到4 642.33 MW，变化率为33.33 %。这一现象体现出事中防范技术可以在处罚阈值不变的情况下，根据风险程度调整处罚力度，进行动态个性化处罚。

电力市场价格风险防范和总体运营情况变化如表16所示，报价平均相似水平下降14.85 %，说明串谋风险有所降低；报价波动水平下降84.11元，说明报价波动减小，市场交易趋于稳定。平均出清电价下降20 %，节约系统购电成本约4 125万元，表明事中风险防范技术有利与社会福利的提高。

表 16 事中防范前后市场风险和运营情况变化
Tab. 16 Mitigate market risks and operational changes in both pre- and post-ante prevention

对比项	平均出清电价/ (元·MW ⁻¹)	系统购电 成本/百万元	报价相似水 平/%	报价波动水 平/元
防范前	749.7	206.70	94.97	336.46
防范后	599.7	165.35	80.12	252.35
变化量	-150.0	-41.35	-14.85	-84.11

4.3 事后风险处置

行使动机、行使条件和历史表现3方面的修正系数 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 的计算详见先前工作^[27-28]。设定红色预警阈值 $A_{\text{bns1}}=0.80$ ， $A_{\text{bns1}}=0.90$ 。剩余RPN未超阈值的橙色预警机组集合 $G'_{\text{Co}}=\{\text{机组 } 3, 6, 9, 13, 22\}$ ，其风险推理机修正结果如表17所示。

表 17 事后处置环节风险推理结果

Tab. 16 Results of risk reasoning for ex-post disposal sessions

机组 编号	初始 p	行使动机修 正 p_1	行使条件修 正 p_2	历史表现 修正 p_3	异常	最终 p
3	0.819 9	0.830 6	0.921 9		√	0.92
6	0.819 5	0.840 8	0.933 2		√	0.93
9	0.820 1	0.793 2	0.880 4	0.890 1		0
13	0.821 1	0.876 9	0.973 4		√	0.97
22	0.823 9	0.914 5			√	0.91

通过事后处置环节的机组风险逻辑分析，筛选出事后阶段风险机组集合 $G_{\text{CR}}=\{\text{机组 } 3, 6, 13, 22\}$ ，对这4个机组发出红色预警，监管机构对其进行法规化处罚。

5 结论

对于电力市场价格风险，本文在量化机组个体和市场综合RPN的基础上，设计了“事中+事后”的闭环柔性化风险处置机制，得出结论如下。

首先，风险机组无法用市场力攫取超额利润，相反，其中标容量大幅下降。处罚前后的风险机组中标容量最大下降率达到71.3 %，平均下降率为33.33 %。正常机组因此受惠，中标容量最大上涨率为43.21 %。

其次，监管机构风险防范策略根据RPN和出清结果动态调整，对风险机组起到威慑与处罚作用，风险机组在不断试错下逐步降低自身竞价风险程度。从市场运营的角度看，监管机构处罚前后单个

交易日社会福利最高可提升4 125万元。

最后,随着需求侧主体参与市场程度加深,后续研究可聚焦于构建包含监管机构、电力用户和发电主体的策略交互模型,从多主体空间维度构建价格风险防范体系。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于进一步加快电力现货市场建设工作的通知(发改办体改[2023]813号)[EB/OL]. [2023-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6913560.htm.
- [2] 电力市场治理体系建设亟待加强[N].中国能源报,2023-01-09(06). http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2023-01/09/content_25959813.htm.
- [3] 国家能源局.关于印发《2023年能源监管工作要点》的通知国能发监管[2023]4号[EB/OL]. [2023-01-18]. https://ynb.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202403/t20240313_258714.html.
- [4] CHEN Y, WANG Z, WANG Z, et al. Self-adaptive identification model of multi electricity consumption under the market competition mechanism[C]//China International Conference on Electricity Distribution, September 17-19, 2018, Tianjin, China. New York:IEEE, 2018:1-4.
- [5] 孙波,邓瑞林,谢敬东,等.基于排序多元Logit模型的卡特尔类机组串谋竞价识别[J].电力系统自动化,2021,45(6):109-115.
SUN Bo, DENG Ruilin, XIE Jingdong, et al. Identification of cartel-like unit collusion bidding based on rank-ordered multinomial Logit model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 109-115.
- [6] 谢敬东,陆池鑫,鲁思薇,等.基于序关系-熵权法的电力市场风险评估[J].中国电力,2021,54(6):71-78.
XIE Jingdong, LU Chixin, LU Siwei, et al. Risk assessment of electricity market based on order relation-entropy weight method[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 71-78.
- [7] 刘敦楠,张潜,李霄彤,等.基于云模型与模糊Petri网的电力市场潜在危害行为识别[J].电力系统自动化,2019,43(2):25-33.
LIU Dunnan, ZHANG Qian, LI Xiaotong, et al. Identification of potential harmful behaviors in electricity market based on cloud model and fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 25-33.
- [8] HALAKOU E, FOROUD A A. Market power assessment through modelling of effective anti-competitive behaviour of participants[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020(14):14-23.
- [9] 谢敬东,鲁思薇,黄溪滢,等.基于半监督支持向量机的电力现货市场串谋识别[J].南方电网技术,2022,16(5):123-133.
XIE Jingdong, LU Siwei, HUANG Xiying, et al. Collusion identification in electricity spot market based on semi-supervised support vector machine[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 123-133.
- [10] SUN B, DENG R, REN B, et al. Identification method of market power abuse of generators based on Lasso-logit model in spot market[J]. Energy, 2022(238): 121634.
- [11] HE Chuan, WANG Haichao, CHEN Zhongyuan, et al. CreDIT Risk identification and suggestions of electricity market [C]//International Symposium on Advanced Energy Science and Environmental Engineering, February 2-4, 2018, Zhuhai, China. New York:IEEE, 2018:1-6.
- [12] 江昕玥,侯佳萱,吴华华,等.澳大利亚电力监管机制及其对中国的启示[J].电力系统自动化,2021,45(14):1-12.
JIANG Xinyue, HOU Jiaxuan, WU Huahua, et al. Electricity regulatory mechanism of Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 1-12.
- [13] 周华锋,刘映尚,彭超逸,等.基于均值聚类算法的电力现货市场报价行为分析[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(8):130-138.
ZHOU Huafeng, LIU Yingshang, PENG Chaoyi, et al. Analysis of bidding behavior in electricity spot market based on K-means clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(8): 130-138.
- [14] 谢敬东,刘思旺,孙欣,等.考虑市场力风险防范的电力市场出清机制[J].电力建设,2023,44(4):18-28.
XIE Jingdong, LIU Siwang, SUN Xin, et al. Market clearing mechanism of electricity market considering market power risk prevention[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 18-28.
- [15] 陈青,杨骏伟,黄远明,等.国外电力市场中市场力监测与缓解机制综述[J].南方电网技术,2018,12(12):9-15,63.
CHEN Qing, YANG Junwei, HUANG Yuanming, et al. Review on monitoring and mitigation mechanisms of market power in foreign electricity markets[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 9-15, 63.
- [16] 刘洁,谢倩莹,刘相锋.我国电力市场评价体系述评与监管启示[J].政府管制评论,2021(02):79-94.
LIU Jie, XIE Qianying, LIU Xiangfeng. Review and regulatory enlightenment of electricity market evaluation system in China[J]. Government Regulation Review, 2021(2): 79-94.
- [17] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等.国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1729-1752.
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and thoughts on development of electricity spot markets promoting renewable energy accommodation in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752.
- [18] 王文标,张谦谦.基于动态加权差分主成分分析的工业锅炉故障诊断[J].热能动力工程,2023,38(11):185-190.
WANG Wenbiao, ZHANG Qianqian. Fault diagnosis of industrial boilers based on dynamic weighted differential principal component analysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 185-190.
- [19] 张晓爽,罗宿明,金向明,等.基于风险优先数的航空发动机可靠性设计方法[J].航空发动机,2024,50(1):102-108.
ZHANG Xiaoshuang, LUO Suming, JIN Xiangming, et al. Reliability design method for aero-engine based on risk priority number[J]. Aeroengine, 2024, 50(1): 102-108.
- [20] 栗楠,王晓晨,刘俊,等.高受电比例电网消纳大型海上风电的运营策略研究[J].可再生能源,2018,36(6):902-910.
LI Nan, WANG Xiaochen, LIU Jun, et al. Operation strategy of high power receiving proportion grid for accommodating large-scale offshore wind power[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(6): 902-910.

(下转第77页 Continued on Page 77)