2021 年 第 21 卷 第 35 期
2021, 21(35): 15072-12

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:谢敬东, 王诗瑶, 周雪梅, 等. 基于三方演化博弈的电力市场监管策略[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15072-15083.
Xie Jingdong, Wang Shiyao, Zhou Xuemei, et al. Electricity market supervision strategy based on tripartite game[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15072-15083.

基于三方演化博弈的电力市场监管策略

谢敬东[1], 王诗瑶[2], 周雪梅[3], 孙 波[2], 孙 欣[3]
(1. 上海电力大学能源电力科创中心, 上海 200082; 2. 上海电力大学经济与管理学院, 上海 200082;
3. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200082)

摘 要 中国电力市场的建设还处于初级阶段,市场参与者的交易行为尚不规范,存在许多违规行为,为维护电力市场的平稳高效运行,迫切需要制定科学有效的监管和激励机制。从监管实际需求出发,建立了监管机构、发电企业和电力用户的三方博弈模型,分别分析静态奖惩和动态奖惩机制下系统的演化稳定策略。仿真分析结果表明:静态奖惩机制下三方无法达到演化稳定;动态奖惩机制下三方策略可以达到稳定平衡,通过调整相关参数可以达到理想的稳定状态,实现了有效监管。最后根据三方演化结果和仿真分析结果给出相关政策建议。

关键词 电力市场; 监管机制; 三方演化博弈; 奖惩机制; 信用管理
中图法分类号 TM715; **文献标志码** A

Electricity Market Supervision Strategy Based on Tripartite Game

XIE Jing-dong[1], WANG Shi-yao[2], ZHOU Xue-mei[3], SUN Bo[2], SUN Xin[3]
(1. Energy and Power Science and Technology Center, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China;
2. College of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China;
3. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

[**Abstract**] The construction of China's electricity market is still in the primary stage, the trading behavior of market participants is not standardized, and there are many violations. In order to maintain the stable and efficient operation of the electricity market, scientific and effective supervision and incentive mechanisms are urgently needed. Starting from the actual needs of supervision, a three-party game model of regulatory agencies, power generation companies and power users were established. The evolutionary and stable strategies of this system was analyzed under the static and dynamic premium and penalty mechanisms respectively. The simulation results show that the evolution and stability of the system could not be achieved under the static premium and penalty mechanism. In contrast, the stable balance of the system can be achieved under the dynamic mechanism. By adjusting the relevant parameters, an ideal stable state can be achieved, and effective supervision can be realized. Finally, relevant policy recommendations are given based on the results of the evolutionary game and simulation analysis.

[**Keywords**] electricity market; regulatory mechanism; tripartite evolutionary game; premium and penalty mechanism; credit managemen

随着中国电力市场化改革的不断深入,电力市场监管的重要性愈发突出。为此,2021 年 1 月国家能源局印发的《2021 年能源监管工作要点》[1]中强调了要切实加强能源监管工作,将其作为能源治理体系现代化建设的重要任务。现阶段电力市场监管体系尚不成熟,存在许多问题:①监管能力亟需提升,风险防范技术手段较为缺乏;②信用管理机制和相应的奖励惩罚措施尚不完善,难以调动市场参与者提升自身信用等级的积极性;③市场行为难以规范,市场参与者利用市场机制漏洞采取违规交易行为(串谋、容量持留、极端报价等[2-4])抬高市场价格,谋取超额利润,不利于市场竞争的公平性;④监管机构对违规行为的处置手段较为缺乏,配套的政策文件和法律法规需要加快落地。因此,迫切需要探索一套有效的电力市场监管制度,形成对守信企业的有效激励和失信企业的有效惩戒,规范市场交易行为,为电力市场平稳有效运营提供保障。

目前关于电力市场监管机制的研究主要集中于:基于问题现状探究监管能力提升路径、建立信用评价标准提升市场参与者诚信水平、对市场中的潜在违规行为进行识别并进行相应防范。文献[5]基于电力市场信息披露现状和存在的问题,对信息

收稿日期: 2021-07-13; **修订日期**: 2021-08-16
基金项目: 国家自然科学基金(51507099);教育部人文社会科学研究基金(15YJCZH147);上海市经济和信息化委员会科研项目(20200606)
第一作者: 谢敬东(1968—),男,汉族,江苏启东人,博士后,教授。研究方向:电力市场改革。E-mail:xie_jd@ shiep. edu. cn。

披露机制的内容进行优化设计。文献[6]基于电力市场中的操纵行为并结合欧美市场监管经验,为中国电力市场监管体系的建设提出了意见。文献[7]主要介绍了市场主体利用电力市场设计缺陷,动用其市场力进行操纵的行为,提出了电力市场进行规则设计时需要注意的问题。文献[8]基于核主成分分析法建立了电力市场售电公司信用评价指标体系,提高了电力市场的信用管理水平。文献[9]基于信用风险管理,以广东电力市场为背景,建立了信用评级模型,降低了市场主体参与交易的风险。文献[10]建立了一套电力市场交易违规行为识别指标体系,评估市场主体的违规风险,并给出了相应的政策性风险控制手段。文献[11]结合分阶段离群点检测算法与主成分分析法对电力市场中存在的异常交易行为进行识别,为监管机构提供了监测违规行为的手段。文献[12]基于多种监督机器学习方法对电力市场的日前数据进行分析,可识别出参与串谋的发电商,并在四发电商的十发电机测试系统中证明了该方法的有效性。

综上所述,中外学者对电力市场的监管问题进行了广泛的研究,但鲜少有学者对市场管理的机理进行分析,博弈论是用来分析机理问题的优良方法,通过梳理市场主体的利益关系,可以确定每个主体的演化规律和方向[13-14]。文献[15]通过构建地方政府和发电企业之间的博弈模型,得出了在碳交易模式下引导发电企业自觉节能减排的政府监管策略。文献[16]通过建立监管机构、电网公司和微网三方的博弈模型对微网接入配网所带来的服务质量问题进行分析,最后通过影响决策的因素为监管机构的政策实施提供建议。文献[17]构建了在电力市场竞价中的博弈模型,基于三发电商模型并结合发电商的内在利益关系进行博弈分析,最后可以给出每个发电商的最佳竞价策略。

基于电力市场运营环境,构建了电力监管机构、发电市场主体和电力用户之间的三方演化博弈模型,重点研究探讨电力监管机构的监管模式、发电企业的交易行为和电力用户的满意程度对系统博弈稳定状态的影响,根据演化博弈结果提出有效的电力监管策略,从而为日后电力监管政策的有效实施提供坚实的理论基础。

1　监管机构、发电企业及电力用户三方博弈模型描述

电力市场交易过程中,电力监管机构、发电企业与电力用户三方会相互影响。当发电企业在电力市场中进行交易时,监管机构可以采取主动监管或被动监管,主动监管往往需要投入更多成本,但可以有效防范市场风险,被动监管的监管成本较低,但如果市场中的发电企业存在违规交易行为会使社会遭受一部分损失。一些发电企业为了提高利润可能会采取违规交易行为如串谋、容量持留、极端报价等,抬高市场电价从而获得超额利润,这些行为会导致电力用户的购电成本上升,用户可以向监管机构进行反映。当监管机构采取主动监管模式时,发电企业的串谋行为将会被查处,并实施相应惩戒措施;当监管机构采取被动监管模式时,发电企业的违规交易行为会造成不利的社会效益损失,需要监管机构承担。因此,监管机构、发电企业和电力用户各自作出的决定会影响彼此的策略选择。

1.1　模型假设

本文中作出以下假设。

(1)监管机构、发电企业和电力用户都是有限理性的,且各方信息是不完全且不对称的。考虑到电力市场实际情况,在决策过程中监管机构起主导作用。

(2)监管机构的策略选择空间为{主动监管,被动监管}对应概率为$\{x,1-x\}$;发电企业的策略选择空间为{无违规交易行为,有违规交易行为}对应概率为$\{y,1-y\}$;电力用户的选择空间为{对交易结果满意、对交易结果不满意}对应概率为$\{z,1-z\}$。

(3)监管机构的"主动监管模式"是指监管机构投入一定人力物力对参与市场交易的发电企业从资格审查到参与市场交易全程都进行监管,定期对企业进行材料核查与现场检查。对信用良好的发电企业进行表彰与奖励,对失信企业进行处罚,加强检查力度,进行行政指导督促其改正;监管机构的"被动监管模式"是指对发电企业减少检查次数,采取抽查的方式对企业进行审查,对信用评价良好的企业采取高效审批优先办理等措施,同时可以减免一定的保证金。

(4)发电企业的"无违规交易行为"是指发电企业在参与市场交易的过程中遵守市场秩序,维护市场平稳有序运行,正常在市场中进行交易;发电企业的"有违规交易行为"是指发电企业在交易过程以其主要市场份额影响市场价格的行为,主要包括串谋、报高价、容量持留行为,同时还包括向交易机构提交虚假的市场注册信息、发电商签订交易合同并上传电力市场系统后,无故不遵守合约等交易失信行为。

(5)电力用户对交易结果"满意"是指电力用户对交易结果无异议,或是监管机构采取惩罚措施对

失信企业予以查处,电力用户权益得到维护,或是电力用户权益受到侵害后其投诉成本较大而被迫妥协。电力用户对交易结果“不满意”是指电力用户认为发电企业存在违规交易行为导致交易价格提高从而向监管机构投诉。

(6)模型中设置的各项经济性参数如表 1 所示,且表中参数均是经过标准化处理的。

表 1 参数说明

Table 1 Parameter description

符号	说明
C_1	监管机构的主动监管成本
C_2	监管机构的被动监管成本
S	监管机构需要承担因发电企业违规交易行为造成的社会效益损失
B	监管机构监督有效时获得的公信力效益
A	发电企业基本收益
r	违规交易获得的额外利润
F	主动监管模式下监管机构对违规企业罚款
J	主动监管模式下监管机构对无违规企业奖励
R	被动监管模式下手续减免、保证金减免带给发电企业的收益
H	发电企业正常交易时电力用户购电所获效用
G	电力用户不满意时选择投诉的投诉成本
P	电力用户投诉成功所获赔偿金

1.2 模型构建

根据以上假设可得监管机构、发电企业和电力用户三者之间的混合策略博弈矩阵如表 2 所示。

表 2 监管机构、发电企业和电力用户策略博弈矩阵

Table 2 Strategy game matrix of regulators, power generation companies and power users

策略选择	监管机构	发电企业	电力用户
x,y,z	$-C_1+B-J$	$A+J$	H
$x,y,1-z$	$-C_1+B-J$	$A+J$	$H-G$
$x,1-y,z$	$-C_1+B+F-S$	$A+r-F$	$H-r$
$x,1-y,1-z$	$-C_1+B+F-S$	$A+r-F-P$	$H-r-G+P$
$1-x,y,z$	$-C_2$	$A+R$	H
$1-x,y,1-z$	$-C_2$	$A+R$	$H-G$
$1-x,1-y,z$	$-C_2-S$	$A+r$	$H-r$
$1-x,1-y,1-z$	$-C_2-S$	$A+r$	$H-r-G$

2 三方主体演化博弈分析

2.1 监管机构的演化稳定策略

设监管机构选择主动监管模式的期望收益为

$$U_{x1}=yz(-C_1+B-J)+y(1-z)(-C_1+B-J)+(1-y)z(-C_1+B+F-S)+(1-y)(1-z)(-C_1+B+F-S) \quad (1)$$

设监管机构选择被动监管模式的期望收益为

$$U_{x2}=yz(-C_2)+y(1-z)(-C_2)+(1-y)z(-C_2-S)+(1-y)(1-z)(-C_2-S) \quad (2)$$

设监管机构平均期望收益为

$$U_x=xU_{x1}+(1-x)U_{x2} \quad (3)$$

由此推出监管机构选择主动监管模式策略概率的复制动态方程为

$$F(x)=\frac{dx}{dt}=x(U_{x1}-U_x)=x(x-1)[y(F+J)+(C_1-C_2-B-F)] \quad (4)$$

对复制动态方程 $F(x)$ 求偏导,得

$$F'(x)=\frac{dF(x)}{dx}=(2x-1)[y(F+J)+(C_1-C_2-B-F)] \quad (5)$$

(1)若 $y=\dfrac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$ 时,系统处于稳定状态,此时监管机构的策略选择概率不会随时间变化。

(2)若 $y\neq\dfrac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$,令 $F(x)=0$,可以得到 $x=0$,$x=1$ 两个平衡点。当 $y>\dfrac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$ 时,可以判断 $\left.\dfrac{dF(x)}{dx}\right|_{x=0}<0$,$\left.\dfrac{dF(x)}{dx}\right|_{x=1}>0$,此时 $x=0$ 为演化稳定点,说明当发电企业在交易中无违规行为的概率大于 $\dfrac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$ 时,监管机构倾向于选择被动监管策略。当 $y<\dfrac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$ 时,可以判断 $\left.\dfrac{dF(x)}{dx}\right|_{x=0}>0$,$\left.\dfrac{dF(x)}{dx}\right|_{x=1}<0$,此时 $x=1$ 为演化稳定点,说明当发电企业在交易中无违规行为的概率小于 $\dfrac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$ 时,监管机构倾向于选择主动监管策略。

2.2 发电企业的演化稳定策略

设发电企业选择无违规交易行为的期望收益为

$$U_{y1}=xz(A+J)+x(1-z)(A+J)+(1-x)z\times(A+R)+(1-x)(1-z)(A+R) \quad (6)$$

设发电企业选择有违规交易行为的期望收益为

$$U_{y2}=xz(A+r-F)+x(1-z)(A+r-F-P)+(1-x)z(A+r)+(1-x)(1-z)(A+r) \quad (7)$$

设发电企业平均期望收益为

$$U_y=yU_{y1}+(1-y)U_{y2} \quad (8)$$

由此推出发电企业选择无违规交易行为策略概率的复制动态方程为

$$F(y)=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=y(U_{y1}-U_y)=y(1-y)\times$$
$$[-xzP+x(F+J+P-R)+R-r] \quad (9)$$

对复制动态方程 $F(y)$ 求偏导,得

$$F'(y)=\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}=(1-2y)[-xzP+$$
$$x(F+J+P-R)+R-r] \quad (10)$$

(1)若 $x=\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$ 时,一般认为串谋获利 $r>R$,即系统处于稳定状态,此时发电企业的策略选择概率不会随时间变化。

(2)若 $x\neq\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$,令 $F(y)=0$,可以得到 $y=0$、$y=1$ 两个平衡点。当 $x>\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$ 时,可以判断 $\left.\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}\right|_{y=0}>0$,$\left.\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}\right|_{y=1}<0$,此时 $y=1$ 为演化稳定点,说明当监管机实施主动监管模式的概率大于 $\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$ 时,发电企业倾向于选择在交易中不采取违规交易行为。当 $x<\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$ 时,可以判断 $\left.\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}\right|_{y=0}<0$,$\left.\frac{\mathrm{d}F(y)}{\mathrm{d}y}\right|_{y=1}>0$,此时 $y=0$ 为演化稳定点,说明当监管机构实施主动监管模式的概率小于 $\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$ 时,发电企业倾向于选择在交易中采取违规交易行为。

2.3　电力用户的演化稳定策略

设电力用户选择对交易结果满意的期望收益为

$$U_{z1}=xyH+x(1-y)(H-r)+(1-x)yH+$$
$$(1-x)(1-y)(H-r) \quad (11)$$

设电力用户选择对交易结果不满意的期望收益为

$$U_{z2}=xy(H-G)+x(1-y)(H-r-G+P)+$$
$$(1-x)y(H-G)+$$
$$(1-x)(1-y)(H-r-G) \quad (12)$$

设电力用户平均期望收益为

$$U_z=zU_{z1}+(1-z)U_{z2} \quad (13)$$

由此推出电力用户选择对交易结果满意策略概率的复制动态方程为

$$F(z)=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=z(U_{z1}-U_z)=z(1-z)(xyP-xP+G) \quad (14)$$

对复制动态方程 $F(z)$ 求偏导,得

$$F'(z)=\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}=(1-2z)(xyP-xP+G) \quad (15)$$

(1)若 $y=\frac{xP-G}{xP}$ 时,所有水平处于稳定状态,此时电力用户的策略选择概率不会随时间变化。

(2)若 $y\neq\frac{xP-G}{xP}$,令 $F(z)=0$,可以得到 $z=0$,$z=1$ 两个平衡点。需要分两种情况讨论:①当 $G>P$ 时,有 $\left.\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}\right|_{z=0}>0$,$\left.\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}\right|_{z=1}<0$,此时 $z=1$ 为演化稳定点。说明当电力用户的投诉成本大于赔偿金时,电力用户倾向于对交易结果满意。②当 $G<P$ 时,又分为两种情况讨论:当 $y>\frac{xP-G}{xP}$ 时,可以判断 $\left.\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}\right|_{z=0}>0$,$\left.\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}\right|_{z=1}<0$,此时 $z=1$ 为演化稳定点,说明当发电企业不采取违规交易行为概率大于 $\frac{xP-G}{xP}$ 时,电力用户倾向于选择对交易结果满意。当 $y<\frac{xP-G}{xP}$ 时,可以判断 $\left.\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}\right|_{z=0}<0$,$\left.\frac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}\right|_{z=1}>0$,此时 $z=0$ 为演化稳定点,说明当发电企业不采取违规交易行为的概率小于 $\frac{xP-G}{xP}$ 时,电力用户向于选择对交易结果不满意。

3　三方主体策略选择的演化稳定性分析

由上述三方的复制动态方程分析可知:演化模型中监管机构的决策只取决于发电企业的决策行为,而发电企业和电力用户的策略选择概率则取决于剩下两方主体的决策选择概率,因此可采用分步分析的方法来分析系统的演化稳定性。即先把电力用户的策略选择概率 z 视为常量,分析监管机构与发电企业的演化稳定策略,再把监管机构的策略选择概率 x 视为常量,分析发电企业与电力用户的演化稳定策略。

3.1　监管机构与发电企业动态博弈分析

由式(4)和式(9)可知(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)、(x^*,y^*) [其中,$x^*=\frac{r-R}{(1-z)P+F+J-R}$,$y^*=\frac{-C_1+C_2+B+F}{F+J}$] 是监管机构和发电企业演化博弈的均衡点。可以根据 Friedman 提出的判定方法[18],通过检验动态系统雅可比矩阵行列式和迹的符号,分析系统均衡点稳定性。雅可比矩阵表达式为

$$\boldsymbol{J}_1=\begin{bmatrix}\frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y}\\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}(2x-1)[y(F+J)+C_1-C_2-B-F]\\ y(1-y)[(1-z)P+F+J-R]\\ x(x-1)(F+J)\\ (1-2y)[-xzP+x(F+J+P-R)+R-r]\end{bmatrix} \tag{16}$$

由 $\boldsymbol{J}_1$ 可知,矩阵行列式为

$$\begin{aligned}\det\boldsymbol{J}_1 = {} & (2x-1)[y(F+J)+(C_1-C_2-B-F)]\times\\ & (1-2y)[-xzP+x(F+J+P-R)+\\ & R-r]-y(1-y)[(1-z)P+F+\\ & J-R]x(x-1)(F+J)\end{aligned} \tag{17}$$

矩阵的迹为

$$\begin{aligned}\mathrm{tr}\boldsymbol{J}_1 = {} & (2x-1)[y(F+J)+(C_1-C_2-B-F)]+\\ & (1-2y)[-xzP+x(F+J+P-R)+R-r]\end{aligned} \tag{18}$$

根据 Friedman 提出的判定方法[18],当同时满足 $\det\boldsymbol{J}_1>0$ 和 $\mathrm{tr}\boldsymbol{J}_1<0$ 时,系统中的均衡点才是稳定的,即达到了演化稳定策略(evolutionarily stable strategy,ESS)。因此,可以对 5 个平衡点进行分析,其稳定性如表 3 所示。

表 3 稳定性分析

Table 3 Stability analysis

	条件	均衡点	$\det\boldsymbol{J}_1$	$\mathrm{tr}\boldsymbol{J}_1$	结果
(1)	$-C_1+C_2+B-J>0$ $(1-z)P+F+J>r$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	>0	>0	不稳定点
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	>0	<0	ESS
(2)	$-C_1+C_2+B-J>0$ $(1-z)P+F+J<r$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	>0	>0	不稳定点
		(1,0)	>0	<0	ESS
		(1,1)	<0	不确定	鞍点
(3)	$-C_1+C_2+B+F<0$ $R-r>0$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	>0	<0	ESS
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	>0	>0	不稳定点
(4)	$-C_1+C_2+B+F<0$ $R-r<0$	(0,0)	>0	<0	ESS
		(0,1)	<0	不确定	鞍点
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	>0	>0	不稳定点
(5)	$-F<-C_1+C_2+B<J$ $R-r<0$ $(1-z)P+F+J>r$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	<0	不确定	鞍点
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	<0	不确定	鞍点
		(x^*,y^*)	>0	0	中心点

注:只有在条件(5)下,(x^*,y^*) 满足条件 $0<x^*<1$ 和 $0<y^*<1$,故其他条件下不对 (x^*,y^*) 进行讨论。

(1)由表 3 可知,条件(1)下演化稳定点为(1,1)即演化稳定策略为(主动监管,无违规交易行为)。此时系统的动态演化趋势如图 1(a)所示。说明对于监管机构,若主动监管所带来的公信力效益较高,监管机构选择主动监管获得的综合效益大于被动监管效益,则监管机构会选择主动监管。对于发电企业,由于监管机构选择了主动监管并将奖励和惩罚相结合,此时发电企业采取无违规交易行为的综合效益大于有违规交易行为的综合效益,因此发电企业在交易过程中会选择无违规交易行为的策略。

(2)由表 3 可知,条件(2)下的演化稳定点为(1,0)即演化稳定策略为(主动监管,采取违规交易行为)。此时系统的动态演化趋势如图 1(b)所示。说明对于监管机构,只要主动监管带来公信力效益足够高,监管机构将趋于选择主动监管。对于发电企业,虽然监管机构采取主动监管,但由于采取违规交易获利过高,或主动监管机制形同虚设,对违规企业惩罚力度不足,导致发电企业选择采取违规交易行为所获效益大于选择无违规交易行为的效益,这时发电企业趋于选择有违规交易行为。

(3)由表 3 可知,条件(3)下的演化稳定点为(0,1)即演化稳定策略为(被动监管,无违规交易行为)。此时系统的动态演化趋势如图 1(c)所示。说明对于监管机构,当实施奖励机制的成本过高,监管机构将趋于选择被动监管。对于发电企业,若减

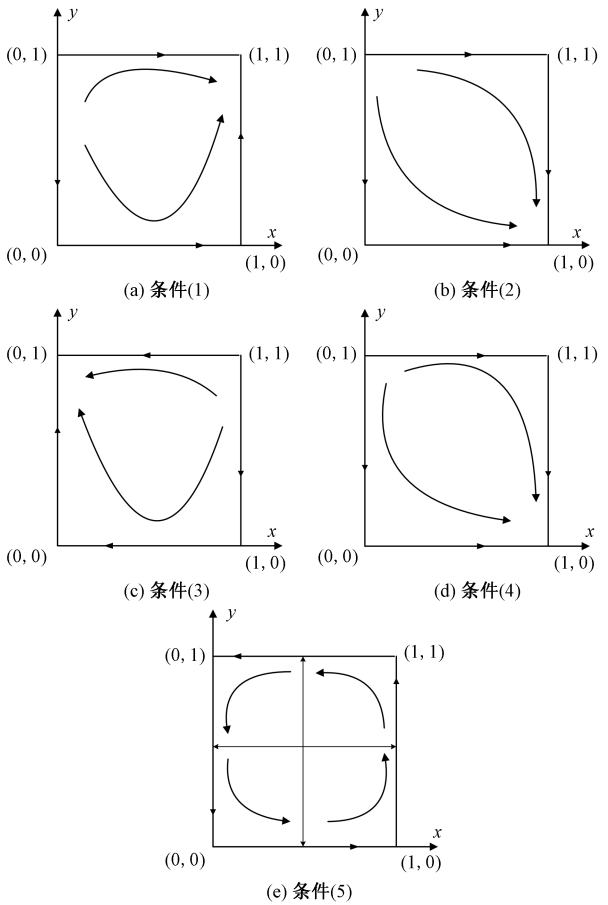

图 1 监管机构与发电企业演化相位稳定图

Fig. 1 Phase diagram of regulators and power generation companies

免手续和保证金所带来的额外利润较为可观,大于采取违规交易行为获利,则发电企业趋于选择无违规交易行为。

(4)由表 3 可知,条件(4)下的演化稳定点为(0,0)即演化稳定策略为(被动监管,采取违规交易行为)。此时系统的动态演化趋势如图 1(d)所示。说明对于监管机构,若主动监管所带来的公信力效益较小,监管机构考虑其效益将趋于选择被动监管。对于发电企业,若采取违规交易行为获利较为可观,将会趋于选择采取违规交易行为。

(5)由表 3 可知,条件(5)下,中心点(x^*,y^*)对应的特征根为一对纯虚根。根据 Taylor 等的研究可知,(x^*,y^*)是系统的稳定点,但非渐近稳定点。系统的动态演化趋势是围绕着中心点(x^*,y^*)的闭环路径,如图 1(e)所示。这是由于若监管机构主动监管,迫于其监管压力,发电企业将在交易过程中不采取违规交易行为。但当发电企业不采取违规交易行为时,监管机构采取主动监管的效益小于采取被动监管的效益,此时监管机构的策略将由主动监管转变为被动监管。而当监管机构采取被动监管时,发电企业采取违规交易行为的收益大于不采取违规交易行为的收益。从自身利益最大化的角度考虑,发电企业不再遵守市场规则,采取违规交易行为获利,就会形成双方策略选择的恶性循环,系统也无法达到稳定状态。

3.2　发电企业与电力用户动态博弈分析

由式(9)和式(14)可知(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)、(y^*,z^*)[其中,$y^*=\dfrac{xP-G}{xP}$,$z^*=\dfrac{(1-x)R+x(F+J+P)-r}{xP}$]是发电企业和电力用户演化博弈的均衡点,并可求其雅可比矩阵,即

$$\boldsymbol{J}_2=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial F(y)}{\partial y} & \dfrac{\partial F(y)}{\partial z}\\ \dfrac{\partial F(z)}{\partial y} & \dfrac{\partial F(z)}{\partial z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(1-2y)[x(1-z)P+x(F+J-R)+R-r] & y(1-y)(-xP)\\ z(1-z)xP & (1-2z)(xyP-xP+G)\end{bmatrix} \tag{19}$$

由 $\boldsymbol{J}_2$可知,矩阵行列式为

$$\begin{aligned}\det\boldsymbol{J}_2=&(1-2y)[x(1-z)P+x(F+J-R)+\\&R-r](1-2z)(xyP-xP+G)-\\&z(1-z)(xP)y(1-y)(-xP)\end{aligned} \tag{20}$$

矩阵的迹为

$$\begin{aligned}\mathrm{tr}\boldsymbol{J}_2=&(1-2y)[x(1-z)P+x(F+J-R)+\\&R-r]+(1-2z)(xyP-xP+G)\end{aligned} \tag{21}$$

对上述五个平衡点进行分析,其稳定性如表 4 所示。

表 4　稳定性分析

Table 4　Stability analysis

条件		均衡点	$\det\boldsymbol{J}_2$	$\mathrm{tr}\boldsymbol{J}_2$	结果
(1)	$xJ+(1-x)R>r-xF$ $xP-G>0$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	>0	>0	不稳定点
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	>0	<0	ESS
(2)	$xJ+(1-x)R>r-xF$ $xP-G<0$	(0,0)	>0	>0	不稳定点
		(0,1)	<0	不确定	鞍点
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	>0	<0	ESS
(3)	$xJ+(1-x)R<r-x(F+P)$ $xP-G>0$	(0,0)	>0	<0	ESS
		(0,1)	<0	不确定	鞍点
		(1,0)	>0	>0	不稳定点
		(1,1)	<0	不确定	鞍点
(4)	$xJ+(1-x)R<r-x(F+P)$ $xP-G<0$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	>0	<0	ESS
		(1,0)	>0	>0	不稳定点
		(1,1)	<0	不确定	鞍点
(5)	$xP+x(F+J)+(1-x)R-r>0$ $x(F+J)+(1-x)R-r<0$ $xP-G>0$	(0,0)	<0	不确定	鞍点
		(0,1)	<0	不确定	鞍点
		(1,0)	<0	不确定	鞍点
		(1,1)	<0	不确定	鞍点
		(y^*,z^*)	>0	0	中心点

注:在前四种条件下,(x^*,y^*)均不满足条件 $0<y^*<1$ 和 $0<z^*<1$,所以不再讨论。

(1)由表 4 可知,条件(1)、(2)下演化稳定点均为(1,1)即演化稳定策略为(无违规交易行为,电力用户满意)。系统的动态演化趋势如图 2(a)、图 2(b)所示。说明对于发电企业,只要发电企业不采取违规交易行为时所获奖励大于其违规交易综合收益时,发电企业趋于选择无违规交易行为。对于电力用户,在发电企业选择无违规交易行为的前提下,电力用户的投诉是无效的,所以不论电力用户的投诉成本是否大于投诉成功获得的赔偿金,电力用户趋于选择对交易结果满意。

(2)由表 4 可知,条件(3)下的演化稳定点为(0,0)即演化稳定策略为(采取违规交易行为,电力用户不满意)。此时系统的动态演化趋势如图 2(c)所示。说明对于发电企业,只要在交易中采取违规交易行为所获综合利润大于在交易中遵守规则所获奖励,发电企业将趋于选择采取违规交易行为。对于电力用户,只要投诉成功所获赔款大于其投诉成本时,电力用户将趋于选择对交易结果不满意。

(3)由表 4 可知,条件(4)下的演化稳定点为(0,1)即演化稳定策略为(采取违规交易行为,电力用户满意)。此时系统的动态演化趋势如图 2(d)所

示。说明对于发电企业,只要在交易中采取违规交易行为所获综合利润大于在交易中遵守规则所获奖励,发电企业将趋于选择在交易中采取违规交易行为。对于电力用户,考虑到即使投诉成功,所获赔偿金小于投诉成本,因此电力用户将被迫妥协,趋于选择对交易结果满意。

(4)由表4可知,条件(5)下,中心点(y^*,z^*)对应的特征根λ_1、λ_2为一对纯虚根。(y^*,z^*)是系统的稳定点,但非渐近稳定点。系统的动态演化趋势为围绕着中心点(y^*,z^*)的闭环路径,如图2(e)所示。这是由于若发电企业采取无违规交易行为所获奖励收益大于采取违规交易行为的效益,发电企业趋于选择无违规交易行为的策略。由于当发电企业在交易过程中无违规交易行为,电力用户的投诉是无效的,这时电力用户倾向于选择对交易结果满意。由于电力用户选择变化,发电企业采取违规交易行为的效益提高,大于其遵守交易规则的所获奖励收益,这时发电企业将不再遵守市场规则,采取违规交易行为获利,就会形成双方策略选择的恶性循环,系统也无法达到稳定状态。

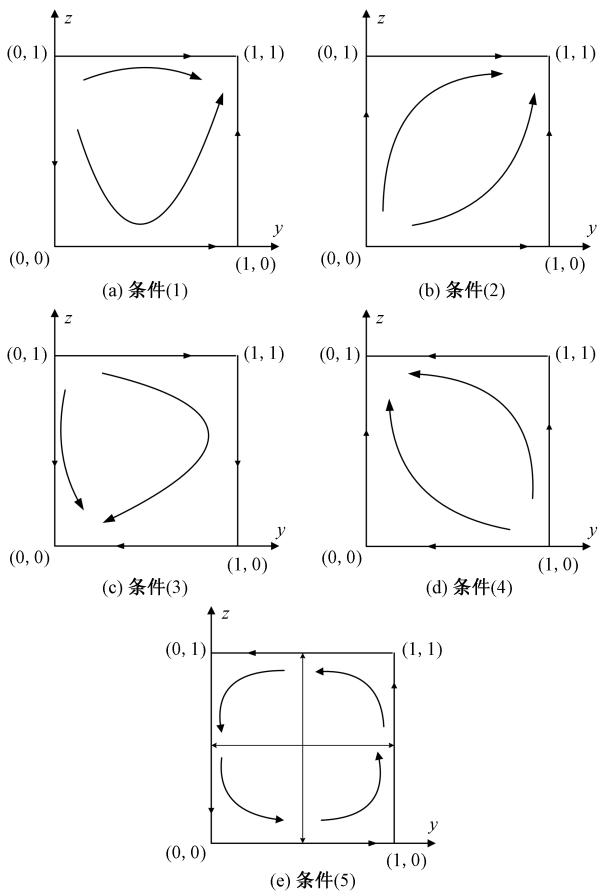

图2 发电企业与电力用户演化相位稳定图

Fig. 2 Phase diagram of power generation companies and power users

4 监管机构动态奖惩机制下的演化博弈分析

针对上述分析中发现在监管机构静态奖惩机制下系统无法达到演化稳定的情况,引入动态奖惩机制以改进系统的演化稳定性[19],并分析相关参数变化对三方演化稳定策略的影响。

4.1 动态奖惩下的演化稳定性分析

在动态奖惩机制下,监管机构的奖惩额度与发电企业的策略选择概率挂钩,由于信用评价时,发电企业采取违规行为概率是确定其信用等级的一项重要指标[20],发电企业的信用等级越高可以认为其采取违规交易行为的概率越低,因此可以将奖惩额度与发电企业的信用等级挂钩。信用等级越高,奖励额度越高,同时信用等级越低惩罚力度越大。设监管机构主动监管模式下奖励为$f(y)=yJ'$ $(0<J'<r,J'$为奖励上限),惩罚为$g(y)=(1-y)F'$ $(F'>r,F'$为惩罚上限),被动监管模式下减免保证金而给发电企业带来的收益为$h(y)=yR'$ $(R'<r,R'$为减免保证所带来的收益上限),电力用户投诉成功所获赔偿金为$s(y)=(1-y)P'$ $(P'>0,P'$为所获赔偿金上限),监管机构获得的公信力效益为$u(y)=yB'$ $(B'>0,B'$为公信力效益上限),令$C_0=-C_1+C_2$则可构建三方的复制动态方程组,即

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt}&=x(1-x)\{-y[g(y)+f(y)]-\\&\quad C_1+C_2+u(y)+g(y)\}\\\frac{dy}{dt}&=y(1-y)\{x(1-z)s(y)+x[f(y)+\\&\quad g(y)]+(1-x)h(y)-r\}\\\frac{dz}{dt}&=z(1-z)[xys(y)-x(1-y)s(y)+G]\end{aligned}\tag{22}$$

令复制动态方程组(16)中$\frac{dx}{dt}=0,\frac{dy}{dt}=0$求解可知(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)为均衡点。当$x'^*\in[0,1],y'^*\in[0,1]$时,可以得到均衡点$(x'^*,y'^*)$,同理令复制动态方程组[式(22)]中$\frac{dy}{dt}=0,\frac{dz}{dt}=0$可以得到均衡点$(y'^*,z'^*)$。将$(x'^*,y'^*)$,$(y'^*,z'^*)$分别代入对应的雅可比矩阵中,可求出一对具有负实部的特征根,可知系统可以达到渐进稳定,即(x'^*,y'^*,z'^*)是动态奖惩机制下三方博弈的演化平衡点。

4.2 参数分析

由于平衡点的位置影响最后的演化平衡结果,可以转为分析平衡点的参数变化对三方策略选择的影响。以下主要分析参数变化对监管机构和电力用户

策略选择的影响,关于参数变化对发电企业策略选择的影响放到后文仿真算例中进行更加直观的分析。(x'^*,y'^*,z'^*)为动态奖惩机制下系统的渐进稳定点,对相关参数分别求偏导可得如下结论。

(1)$\frac{\partial x'^*}{\partial G}>0$,$x'^*$是$G$的增函数,监管机构主动监管的概率随着电力用户的投诉成本G的增大而增大,反之亦然;$\frac{\partial z'^*}{\partial G}>0$,$z'^*$是$G$的增函数,电力用户满意概率随着电力用户的投诉成本$G$的增大而增大,反之亦然。

(2)$\frac{\partial x'^*}{\partial P'}<0$,$x'^*$是$P'$的减函数,监管机构主动监管的概率随着电力用户所获赔偿金上限P'的增大而减小,反之亦然;$\frac{\partial z'^*}{\partial P'}<0$,$z'^*$是$P'$的减函数,电力用户满意概率随着电力用户所获赔偿金$P'$的增大而减小,反之亦然。

(3)$\frac{\partial x'^*}{\partial B'}>0$,$x'^*$是$B'$的增函数,监管机构主动监管的概率随着公信力效益上限B'的增大而增大,反之亦然;$\frac{\partial z^*}{\partial B'}>0$,$z'^*$是$B'$的增函数,电力用户满意概率随着公信力效益上限$B'$的增大而增大,反之亦然。

(4)$\frac{\partial x'^*}{\partial F'}>0$,$x'^*$是$F'$的增函数,监管机构主动监管的概率随着对违规企业罚款上限的增大而增大,反之亦然;$\frac{\partial z'^*}{\partial F'}>0$,$z'^*$是$F'$的增函数,电力用户满意概率随着对违规企业罚款的增大而增大,反之亦然。

(5)$\frac{\partial x'^*}{\partial J'}<0$,$x'^*$是$J'$的减函数,监管机构主动监管的概率随着对无违规企业奖励上限的增大而减小,反之亦然。$\frac{\partial z'^*}{\partial J'}>0$,$z'^*$是$J'$的增函数,电力用户满意概率随着对无违规企业奖励的增大而增大,反之亦然。

(6)$\frac{\partial x'^*}{\partial C_0}>0$,$x'^*$是$C_0$的减函数,监管机构主动监管的概率随着不同监管模式成本差值C_0的增大而减小,反之亦然;$\frac{\partial z'^*}{\partial C_0}<0$,$z'^*$是$C_0$的减函数,电力用户满意概率随着不同监管模式成本差值C_0的增大而减小,反之亦然。

(7)$\frac{\partial z'^*}{\partial R'}>0$,$z'^*$是$R'$的增函数,电力用户满意概率随着保证金减免所获利润上限的增大而增大,反之亦然。

(8)$\frac{\partial z'^*}{\partial r}<0$,$z'^*$是$r$的减函数,电力用户满意概率随着违规交易所获利润的增大而减小,反之亦然。

5　数值实验与仿真分析

5.1　静态奖惩机制下的仿真分析

电力市场监管的理想状态为监管机构主动监管、发电企业不采取违规行为、电力用户满意($x\to1$、$y\to1$、$z\to1$),通过表3、表4可知,参数需满足$-C_1+C_2+B-J>0$;$(1-z)P+F+J>r$;$xJ+(1-x)R>r-xF$。设演化初始时间为0,演化结束时间为20,参数的取值分别为:$C_1=5$,$C_2=3$,$B=4$,$J=1.5$,$P=2$,$F=2$,$R=2.5$,$r=3$,$G=1.5$。演化初始概率设为:$x=0.4$,$y=0.5$,$z=0.8$,仿真结果如图3所示。二维仿真图和三维仿真图验证了在上述演化条件下$x\to1$、$y\to1$、$z\to1$的演化趋势,由监管机构、发电企业和电力用户组成的系统演化至良性状态。

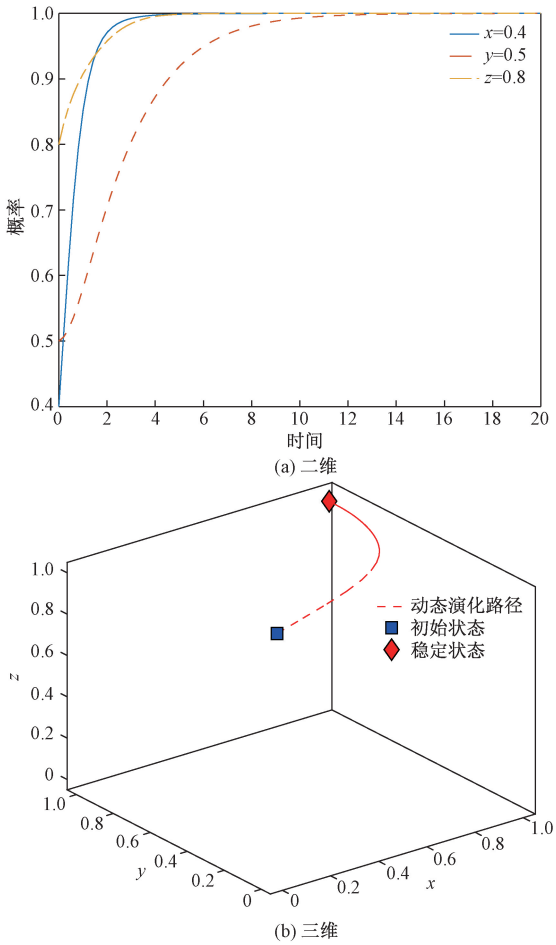

图3　稳定状态为$x\to1$、$y\to1$、$z\to1$时的演化过程

Fig. 3　Evolution process when the stable state is $x\to1$, $y\to1$, $z\to1$

同时三方博弈演化到监管机构被动监管、发电企业不采取违规行为、电力用户满意($x\to0$、$y\to1$、$z\to1$)的状态也是希望看到的,各方参数要满足$-C_1+C_2+B-J<0$;$R-r>0$;$xJ+(1-x)R>r-xF$的演化条件。设演化初始时间为0,结束时间为20,参数的取值分别为:$C_1=5$,$C_2=2$,$B=1.5$,$J=1$,$P=2$,$F=1$,$R=2.5$,$r=2$,$G=1.5$。演化初始概率设为:$x=0.4$,$y=0.5$,$z=0.8$,仿真结果如图4所示。二维和三维仿真图验证了在上述初始条件下$x\to0$、$y\to1$、$z\to1$的演化趋势,由监管机构、发电企业和电力用户组成的系统演化至良性状态。

在满足$-F<-C_1+C_2+B<J$、$R-r<0$、$(1-z)P+F+J>r$、$xP+x(F+J)+(1-x)R-r>0$、$x(F+J)+(1-x)R-r<0$;$xP-G>0$的条件下对各方参数进行赋值,取$C_1=6.5$,$C_2=3$,$B=3$,$J=3$,$P=3.5$,$F=3$,$R=4$,$r=6$,$G=1$。设演化初始时间为0,结束时间为100,初始状态假设为:$x=0.6$,$y=0.3$,$z=0.5$。仿真实验如图5所示。由图5可知,监管机构与发电企业的演化轨迹是无限振荡的,无法达到演化稳定,验证了3.1和3.2节中条件(5)的分析。在此阶段,由于策略选择对于三方收益均有影响,有限理性的监管机构、发电企业和电力用户会根据收益变动情况不断学习、调整策略,造成了三方策略选择不断变化的状况。

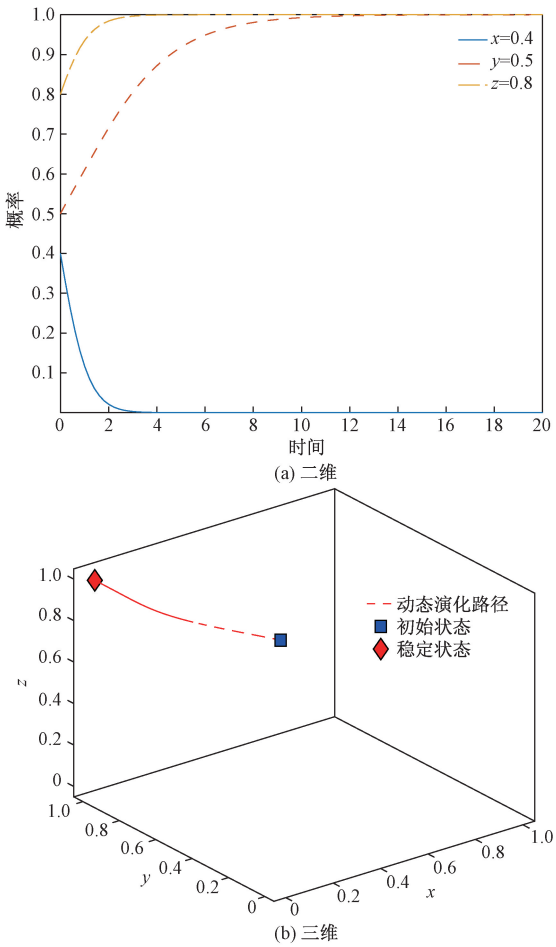

图4 稳定状态为$x\to0$、$y\to1$、$z\to1$的演化过程

Fig. 4 Evolution process when the stable state is $x\to0$, $y\to1$, $z\to1$

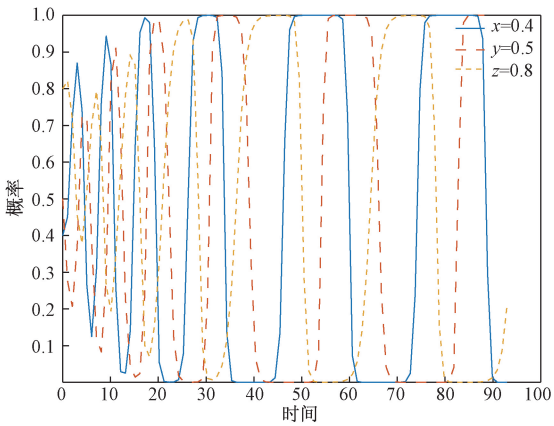

图5 系统振荡演化过程

Fig. 5 System shock evolution process

5.2 动态奖惩机制下的仿真分析

在满足$xs(y)+x[g(y)+f(y)]+(1-x)h(y)-r>0$;$-g(y)<-C_1+C_2+B<f(y)$;$h(y)-r<0$;$xs(y)-G>0$;$(1-z)P+g(y)+f(y)>r$的条件下,仿真分析动态奖惩机制下的系统演化稳定结果。取$B'=3$、$J'=4$、$P'=5$、$F'=7$、$R'=4$,其他参数与5.1节中的一致,即$C_1=6.5$、$C_2=3$、$r=6$、$G=1.5$。设演化初始时间为0,结束时间为50,演化初始状态假设不变:$x=0.6$,$y=0.3$,$z=0.5$,系统的动态演化路径如图6所示。

由图6可知,三方的初始概率与静态奖惩下的仿真概率一致时,随着博弈时间的变化,系统演化路径呈螺旋状并不断收敛,最终达到稳定状态。对比静态奖惩机制下中系统无法演化至稳定的状态,

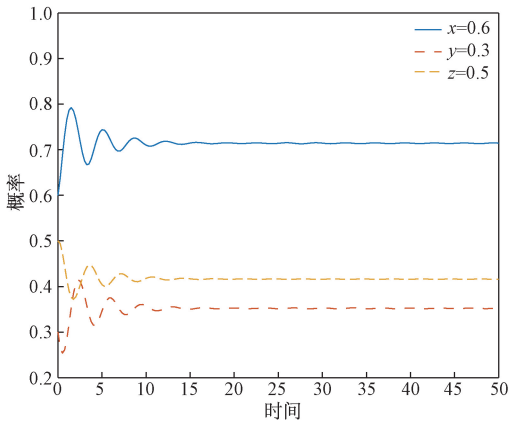

图6 动态奖惩下的演化过程

Fig. 6 The evolution process under static premium and penalty mechanism

图6说明采用动态奖惩机制的改进是有效的。这也更加符合实际情况,由于市场成员存在个体差异性,监管机构出台相关政策时也会考虑差异性管理。

5.2.1　初始概率对仿真结果的影响分析

上述条件不变,将发电企业的初始概率由0.3改为0.6,分析不同初始值对演化博弈的影响。分析图7的演化结果可知,三方会根据对方状态变化权衡自身利益,不断进行策略变化,最后达到演化稳定。图7的最终演化结果与图6相同,说明监管机构对不同违规概率的发电企业也就是不同信用等级的发电企业的奖惩力度是不同的,即对信用等级高的发电企业奖励额度大,对信用等级较差的发电企业惩戒力度大。在动态奖惩机制下,监管机构不断调整其奖惩力度,最后都能使系统达到相同的稳定状态。

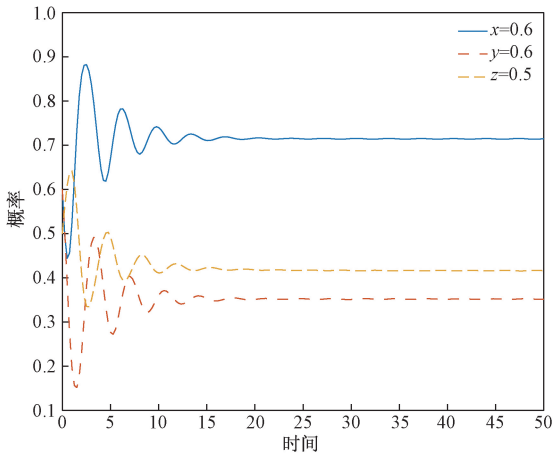

图7　初值改变后动态奖惩下的演化过程

Fig. 7　The evolution process under static premium and penalty mechanism after initial value changes

5.2.2　奖惩上下限对仿真结果的影响分析

由于 y'^{*} 只与奖励、惩罚上限和主动被动监管效益之差有关,为了分析奖惩上下限对博弈结果的影响,在其他参数不变的条件下改变奖励上限 J',惩罚上限 F'。当 $J'=4, F'=7$ 时,发电企业在不同初始概率的条件下的演化结果如图8(a)所示。提高奖惩上限,当 $J'=5, F'=8$ 时,发电企业在不同初始概率的条件下的演化结果如图8(b)所示。

对比图8(a)、图8(b)可知,当监管机构奖惩上限提高时,发电企业的无违规交易行为概率也会提高。这是由于当监管机构的奖惩上限提高时,无违规交易行为的发电企业所获奖励将增大,而有违规交易行为的发电企业受到的惩罚也会增大。由于奖惩上限发生了改变,发电企业的策略将会向综合效益较大的策略转变。这表明监管机构可以通过调整奖惩上限来控制演化平衡点的位置,以达到对整个市场的宏观调控。

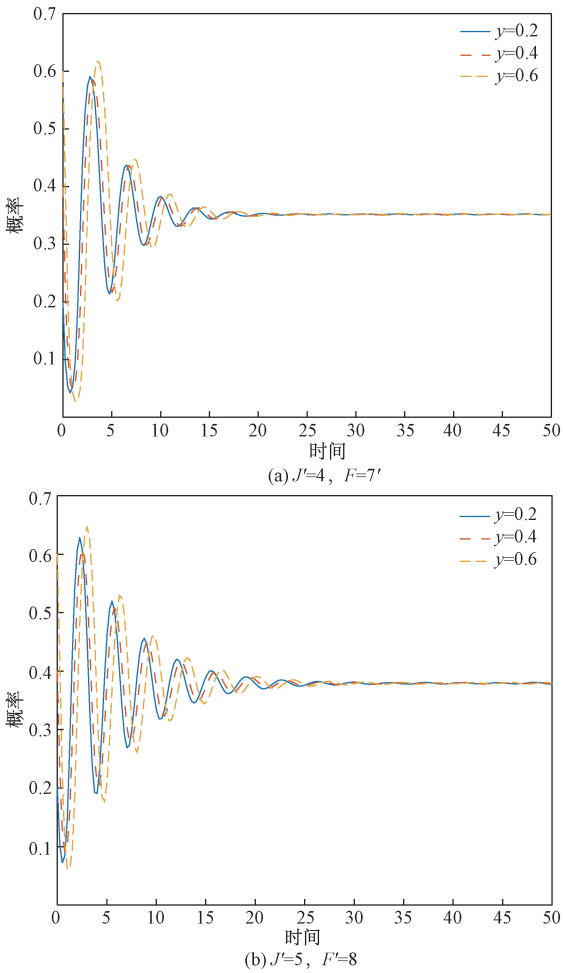

图8　J'、F'不同时发电企业的演化路径

Fig. 8　The evolution path of power generation companies with different J' and F'

5.2.3　不同监管策略成本差值对仿真结果的影响分析

为了分析监管成本差值对博弈结果的影响,在其他参数不变的条件下改变主动监管成本 C_1 与被动监管成本 C_2 之差。当 $C_1=6.5, C_2=3$ 时、$C_1=6.5, C_2=4$ 时和 $C_1=6.5, C_2=5$ 时,发电企业在初始概率为0.6条件下的演化结果如图9所示。

由图9可知,监管机构不同监管策略的成本差值 C_0 的绝对值越小,发电企业无违规交易行为概率 y 的值越大,即发电企业的信用等级会提升。其原因是,监管机构不同监管策略的成本差越小,监管机构会更倾向于选择主动监管策略。迫于监管机构的压力,发电企业将趋于选择无违规交易行为。

6　结论及建议

6.1　结论

(1)通过演化博弈和仿真发现当监管机构实施静态奖惩机制时,在 $-F<-C_1+C_2+B<J; R-r<$

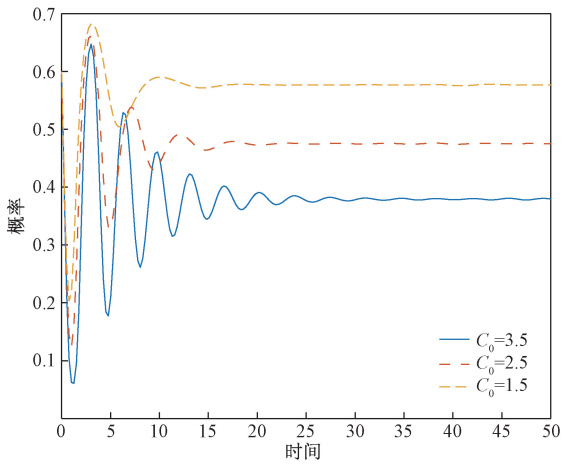

图 9 不同监管成本之差的发电企业演化路径

Fig. 9 The evolution path of power generation companies with different regulatory costs

$0;(1-z)P+F+J>r;xP+x(F+J)+(1-x)R-r>0;x(F+J)+(1-x)R-r<0;xP-G>0$ 的条件下三方主体为了寻求各自效益最大化,将造成策略恶性循环,无法达到演化稳定,监管机构无法有力约束发电企业的行为,不利于市场运行的稳定性和安全性。

(2)当监管机构实施动态奖惩机制,设立相应奖惩上限,并根据发电企业的信用等级及时调整奖惩额度。对信用等级较高,采取违规交易行为概率较低的发电企业可以增加奖励上限额度;对信用等级较低,采取违规交易行为概率较高的发电企业可以增加惩罚上限额度。这时三方的策略选择将逐步达到演化稳定,实现了监管机构对发电企业行为的调控和有效监管,表明了动态奖惩机制更适合于电力市场的实际情况。

(3)监管机构对发电企业的市场行为起主导性作用,在动态奖惩机制下,发电企业的策略选择与监管机构不同监管力度的成本之差及动态奖惩上限有关。若不同监管力度的成本之差降低、奖惩上限增加,则发电企业选择不采取违规交易行为的概率将提高。因此监管机构需要提升自身监管效率,可以通过完善信息披露机制等手段降低监管成本。

(4)在动态奖惩机制下监管机构和电力用户的策略选择受多因素影响,监管机构对电力用户的决策行为起主导作用。对于监管机构,可以采取定期信息公开以提升自身公信力效益,拓宽用户举报和投诉路径,降低用户投诉成本等手段进行宏观调控,以达到整个市场的平稳有序运行。

6.2 建议

基于上述结论,可以给出如下相关政策建议。

(1)根据发电企业信用等级划分相应的奖惩额度。信用等级较高的发电企业可以获得较高的奖励和保证金减免,信用等级较差的发电企业应被处以更高的罚金。

(2)采取差异化监管模式。对不同信用等级的发电企业采取区别监管措施,信用等级较高的发电企业可以采取被动监管,降低检查次数,同时采取一系列手续减免措施和保证金减免措施;对信用等级较差的发电企业应采取主动监管,加强监管力度,定期核查企业有无违规行为,由于违规成本过高,发电企业会自觉遵守交易规则,提升自身信用等级。

(3)完善信息披露机制,构建信息共享平台。对信用良好和信用恶劣的发电企业进行定期公示,推广红、黑名单制度;健全举报和问题反馈机制,降低投诉成本,保障电力用户的基本权益。

(4)提高监管效率,采取科学有效监管措施。不断总结工作经验,提升监管机构的交易违规行为监测能力,让发电企业难以“钻空子”谋取违规收益;加强员工培训,提升自身监管水平。

(5)完善市场准入机制和清退机制。对参加市场交易的发电企业进行严格的入市材料审核;对加入市场的发电企业进行交易规则的培训,加强企业对诚信交易的认识度;对信用等级恶劣屡教不改的发电企业实施清退机制。

(6)调动电力用户的积极作用。电力用户可以通过信息公开平台,了解发电企业的信用等级,在交易时尽量选择信用等级好的发电企业,避免与违规企业进行交易。当遇到发电企业的违规失信行为时,应及时举报、反馈给监管机构。

参 考 文 献

[1] 《2021年能源监管工作要点》(国能发监管[2021]2号).(2021-01-18)[2021-03-01]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-01/18/c_139713326.htm.
Highlights of Energy Regulatory Work in 2021. (National Energy Development Regulatory[2021] No. 2). (2021-01-18)[2021-03-01]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-01/18/c_139713326.htm.

[2] 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.

[3] 于壮状, 杨小卫, 张德亮. 基于电能-备用联合优化的容量持留监测方法[J]. 电气应用, 2018, 37(11): 60-64.
Yu Zhuangzhuang, Yang Xiaowei, Zhang Deliang. Capacity retention monitoring method based on power-reserve joint optimization[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(11): 60-64.

[4] 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. Collusion bidding identification of cartel-type generators based on ordered logit model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 109-115.

[5] 夏　凡. 我国电力市场信息披露机制及其有效性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
Xia Fan. Research on information disclosure mechanism and its effectiveness of China's electricity market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.

[6] 廖　侃, 丁肇豪, 舒　隽, 等. 欧美电力市场操纵行为监管原则分析及其对中国的启示[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 1-8.
Liao Kan, Ding Zhaohao, Shu Jun, et al. Analysis on regulatory principles of manipulative behavior for European and American electricity markets and enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 1-8.

[7] Hogan W W. Multiplemarket-clearing prices, electricity market design and price manipulation[J]. Electricity Journal, 2012, 25(4): 18-32.

[8] 张云雷, 段　光, 俞　静, 等. 基于 KPCA-MEE 的电力市场售电公司信用评价研究[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 128-135.
Zhang Yunlei, Duan Guang, Yu Jing, et al. Study on credit evaluation of power supply company in power market based on KPCA-MEE[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 128-135.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 谢敬东, 卢浩哲, 陆池鑫, 等. 基于分阶段离群点检测的电力市场异常辨识[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3633-3641.
Xie Jingdong, Lu Haozhe, Lu Chixin, et al. Identification of abnormal behavior in power market based on phased outlier detection[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3633-3641.

[12] Razmi P, Buygi M O, Esmalifalak M. Amachine learning approach for collusion detection in electricity markets based on nash equilibrium theory[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(1): 170-180.

[13] Amin-Zakhirehkar S, Hossein-Iranmanesh S, Mohammadreza M. Introducing a new market based system using game theory approach to promote energy efficiency: case of Iranian energy market[J]. Energy Efficiency, 2021, 14(6): 1-16.

[14] Abapour S, Mohammadi-Ivatloo B, Hagh-M T. Robust bidding strategy for demand response aggregators in electricity market based on game theory[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118393.

[15] 徐晶芝, 董　雨. 碳交易机制下地方政府与发电企业的演化博弈分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(11): 929-939.
Xu Jingzhi, Dong Yu. Evolutionary game analysis between local governments and power generation enterprises based on carbon trading mechanism[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(11): 929-939.

[16] 谢敬东, 卞泽远, 吕志伟, 等. 基于三方演化博弈的微网接入公共配电网服务输配电价调整监管机制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(15): 6312-6321.
Xie Jingdong, Bian Zeyuan, Lü Zhiwei, et al. The regulatory mechanism of microgrid access to public distribution network service transmission and distribution price adjustment based on triplartite evolutionary game[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15): 6312-6321.

[17] Wang Z, Lo K L. Game theory application and strategic bidding in electricity supply market[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Engineering and Technology. Shanghai: Scientific Research Publishing, 2016: 73-82.

[18] Friedman D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrical, 1991, 59(3): 637-666.

[19] 焦建玲, 陈　洁, 李兰兰, 等. 碳减排奖惩机制下地方政府和企业行为演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2017(10): 140-150.
Jiao Jianling, Chen Jie, Li Lanlan, et al. A study of local governments' and enterprises' actions in the carbon emission mechanism of Subsidy or punishment based on the evolutionary game[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017(10): 140-150.

[20] Xie J D, Wang S Y, Zhou X M, et al. Credit evaluation method of generating companies considering the market behavior in China electricity market[J]. Energy Science & Engineering, 2021, 9(9): 1554-1567.