

12-21-2022

Long-term Resilience Simulation on Low-carbon Urban Grid Based on Evolutionary Game

Zhengda Cui

1.Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China,;
cuizd21@mails.tsinghua.edu.cn

Weiqiang Yao

2.State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

Qin Xu

2.State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

Chen Fang

2.State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Long-term Resilience Simulation on Low-carbon Urban Grid Based on Evolutionary Game

Abstract

Abstract: Because of the more frequent extreme disasters, the resilience of urban grid becomes more important. In the background of carbon neutralization policy, the decarbonization transition of urban grid also affects the development of grid resilience. *An evolutionary game is used to simulate the resilience evolution of low-carbon urban grid and the evolution model is constructed.* The decision to install photovoltaic and energy storage system for residents and to upgrade the grid for resilience is considered in the model and the stability conditions of equilibriums of the evolutionary game are analyzed. The resilience evolution simulation model considering disaster stochasticity is constructed and verified. The results can provide decision reference for the low-carbon urban grid resilience development.

Keywords

low-carbon grid, resilience, photovoltaic and battery energy storage system, evolutionary game, evolutionarily stable strategy

Authors

Zhengda Cui, Weiqiang Yao, Qin Xu, Chen Fang, and Ying Chen

Recommended Citation

Zhengda Cui, Weiqiang Yao, Qin Xu, Chen Fang, Ying Chen. Long-term Resilience Simulation on Low-carbon Urban Grid Based on Evolutionary Game[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(12): 2595-2604.

基于演化博弈的低碳城市电网长期韧性仿真方法

崔正达¹, 姚维强², 徐琴², 方陈², 陈颖^{1*}

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 极端灾害频发, 城市电网韧性重要性日趋凸显。而在碳中和政策背景下, 城市电网的低碳化转型将影响电网韧性发展。使用演化博弈理论对低碳城市电网的长期韧性仿真方法进行研究, 建立电网韧性演化仿真模型。该模型考虑居民安装光储系统以及电网韧性升级决策, 并基于仿真模型分析演化博弈均衡结果。建立考虑灾害随机性的韧性演化仿真模型。对上述模型进行仿真验证, 仿真结果可以为低碳城市电网韧性发展决策提供参考。

关键词: 低碳电网; 韧性; 光储系统; 演化博弈; 演化均衡策略

中图分类号: TP391.9; TM743

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)12-2595-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-FZ0917

Long-term Resilience Simulation on Low-carbon Urban Grid Based on Evolutionary Game

Cui Zhengda¹, Yao Weiqiang², Xu Qin², Fang Chen², Chen Ying^{1*}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Because of the more frequent extreme disasters, the resilience of urban grid becomes more important. In the background of carbon neutralization policy, the decarbonization transition of urban grid also affects the development of grid resilience. An evolutionary game is used to simulate the resilience evolution of low-carbon urban grid and the evolution model is constructed. The decision to install photovoltaic and energy storage system for residents and to upgrade the grid for resilience is considered in the model and the stability conditions of equilibriums of the evolutionary game are analyzed. The resilience evolution simulation model considering disaster stochasticity is constructed and verified. The results can provide decision reference for the low-carbon urban grid resilience development.

Keywords: low-carbon grid; resilience; photovoltaic and battery energy storage system; evolutionary game; evolutionarily stable strategy

引言

随着城市化进程发展, 城市基础设施的规模和重要性不断上升, 城市居民的日常生活离不开城市基础设施的正常运转。作为城市基础设施体系的重要组成部分, 电力系统的安全可靠是社会生产和人民生活的重要保障。然而, 随着极端天

气发生频率增加, 由自然灾害造成的大规模停电事故数量在世界范围内呈上升趋势^[1-2]。由自然灾害、人为攻击等事件引起的小概率高损失的停电事故已经成为电力系统的主要威胁。电力系统韧性^[3]是指电力系统在重大灾害、人为攻击等极端情况时, 改变自身状态, 减少故障损失, 并尽快恢复正常供电的能力^[4]。提升电力系统韧性能够有效

收稿日期: 2022-08-06

修回日期: 2022-10-18

基金项目: 上海科技委碳达峰、碳中和专项(21DZ1208300)

第一作者: 崔正达(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为电网韧性防御方法。E-mail: cuizd21@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 陈颖(1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统高性能计算、信息物理系统和电网韧性防御方法。

E-mail: chen_ying@tsinghua.edu.cn

减小系统在极端情况下遭受的损失, 因此城市电网韧性研究的重要性日益凸显。

另一方面, “碳中和”政策的提出将推动中国能源革命进程, 可再生能源迅猛发展, 占一次能源消费比重也越来越高, 电力行业取得新的发展。构建清洁低碳、安全高效的新一代能源系统, 以实现最大限度地开发利用可再生能源, 最大程度提高能源利用效率, 已经成为我国当前能源转型和革命的核心战略目标。

在此背景下, 城市电网形态将进一步演化^[5]。终端用能电气化水平提升, 使得电网负荷不断增加; 低碳分布式电源接入, 使得电网可用韧性资源增多、不确定性变大^[6], 低碳城市电网的韧性发展面临挑战, 亦存在机遇^[7]。因此, 亟需电网韧性演化的仿真方法。现有的电力系统演化仿真大多基于复杂网络理论^[8], 着重研究电网形态拓扑在新能源接入^[9-10]、连锁故障^[11]等因素影响下的演化过程。此外, 文献[12]使用全局灵敏度方法对于电力系统宏观层面的可再生能源渗透率演化趋势进行研究。而现有研究对于电网韧性性能演化方面的仿真研究则较少。

为此, 本文借助演化博弈理论, 研究探讨城市电网低碳转型过程中长期韧性仿真方法, 通过仿真分析发展过程中不同要素对于电网韧性演化结果的影响。

1 演化博弈发展及其应用现状

对于博弈理论来说, 其要素包括博弈的参与者、策略和支付。在传统博弈论中, 常假定参与者是完全理性的, 参与者会根据最优结果做出决策, 并根据这一假设分析博弈的均衡策略。然而, 现实中参与者的完全理性通常不成立。

演化博弈由 Maynard Smith 创立^[13], 其思想源于生物进化学。与传统博弈理论不同, 演化博弈论只要求博弈的参与者具有有限理性, 并关注博弈均衡的动态发展过程。

演化博弈中的研究重点是选取合适的适应度函数和合理的选择变异机制^[14]。演化博弈认为, 选择

不同策略的群体数量会根据该种策略的适应度进行增减, 这一过程类似生物学中动物行为的演化过程。选择变异机制方面, 复制者动态方程^[15]是演化博弈中的应用广泛的一种重要方法, 其基本思想为: 假设某种策略的增长率与该策略适应度与群体平均适应度之差成正比。随着演化过程的进行, 复制者动态会使得较优策略逐渐占据主导。根据适应度函数和选择变异机制, 演化博弈可以分析模拟系统中策略的动态变化过程, 研究演化博弈均衡。

因此, 演化博弈可以较好地描述现实世界中复杂系统的演化趋势, 常用于经济学领域研究, 如市场竞价^[16]等。在工程领域, 演化博弈在疫苗接种策略^[17]、通信网络演化^[18]等领域也有较多应用, 用于分析复杂系统的发展趋势。在电力行业相关研究中, 演化博弈理论亦有较多应用。文献[19]利用演化博弈动力学研究多群体用户的需求响应决策问题。文献[20]关注政府监管被体制下的可再生能源消纳问题, 利用演化博弈分析政策对可再生能源发展的影响。文献[21]分析车网互动的演化稳定策略, 为车网互动的电价定价提供参考依据。

2 低碳城市电网韧性演化仿真模型

2.1 演化博弈建模

本文考虑博弈发生在配电网层级上, 不考虑输电网对配电网韧性的影响, 参与的博弈主体为电网公司和居民, 电网公司和居民群体可以采用相应策略, 提升城市电网中的配电网韧性水平。为了使用演化博弈对低碳城市电网韧性进行研究, 需要对电网公司和居民的策略进行一定的简化。本文假设居民在城市电网低碳发展的过程中, 可以选择参与这一发展过程, 安装光伏和储能系统, 亦可以选择不安装光储系统。而对于电网公司来说, 为了应对极端灾害的挑战, 可以选择对自己的配电区域进行韧性升级, 亦可选择不进行韧性升级。因此, 在该演化博弈中, 居民群体的策略集为 $S_{RS} = \{PV, NPV\}$, 其中 PV 表示安装光储的策略

略, NPV表示不安装光储的策略。电网公司群体的策略集为 $S_{GR}=\{UP, NUP\}$, 其中UP表示对电网进行韧性升级的策略, NUP表示不进行韧性升级的策略。假设居民群体中选择安装光储系统的比例为 x , 电网公司群体中选择韧性升级的比例为 y , 演化博弈的支付矩阵如图1所示。

		电网	
		UP (y)	NUP ($1-y$)
居民	PV (x)	a_{RS}, a_{GR}	b_{RS}, b_{GR}
	NUP ($1-x$)	c_{RS}, c_{GR}	d_{RS}, d_{GR}

图1 电网公司与居民的博弈支付矩阵

Fig. 1 Payoff matrix of grid companies and residents

具体而言, 记居民群体的支付矩阵为 $\mathbf{P}$, 电网公司的支付矩阵为 $\mathbf{Q}$, 矩阵各元素为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_{RS} & b_{RS} \\ c_{RS} & d_{RS} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} a_{GR} & b_{GR} \\ c_{GR} & d_{GR} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_{RS} 为居民群体安装光伏且电网公司进行韧性升级时居民群体获得的支付; a_{GR} 为此时电网公司获得的支付; b_{RS} 、 b_{GR} 为居民群体安装光伏且电网公司不进行韧性升级时居民群体和电网公司获得的支付; 其余情况以此类推。

2.2 演化博弈支付

在韧性场景中, 极端灾害的影响建模至关重要。假设灾害发生频率为 p , 每次灾害造成的平均负荷损失量为 C_{loss} 。此外, 本文对传统的韧性升级手段以及其防护效果进行了一定的抽象, 认为常见的如加固线路、配置应急资源等手段均涵盖在韧性升级^[22]之内, 韧性升级的效果为可以使得电网内的用户受到的灾害损失以系数 k_1 ($0 < k_1 < 1$) 减少, 即单次灾害损失为 $k_1 C_{loss}$ 。而对于安装光储系统的居民来说, 可以将低于光储系统防护效果 C_{pro} (储能在停电时段进行供电) 的灾害损失归

零, 高于防护效果则能抵消一定的灾害损失, 可表示为 $\max\{0, C_{loss} - C_{pro}\}$ 。

因此, 支付矩阵中各元素为

$$a_{RS} = -C_{PV} + B_{PV} - \omega_1 p \cdot \max\{0, k_1 C_{loss} - C_{pro}\} \quad (3)$$

$$a_{GR} = -C_{UP} - B_{PV} - \omega_2 p \cdot \max\{0, k_1 C_{loss} - C_{pro}\} \quad (4)$$

$$b_{RS} = -C_{PV} + B_{PV} - \omega_1 p \cdot \max\{0, C_{loss} - C_{pro}\} \quad (5)$$

$$b_{GR} = -B_{PV} - \omega_2 p \cdot \max\{0, C_{loss} - C_{pro}\} \quad (6)$$

$$c_{RS} = -\omega_1 p k_1 C_{loss} \quad (7)$$

$$c_{GR} = -C_{UP} - \omega_2 p k_1 C_{loss} \quad (8)$$

$$d_{RS} = -\omega_1 p C_{loss} \quad (9)$$

$$d_{GR} = -\omega_2 p C_{loss} \quad (10)$$

式中: C_{PV} 为居民安装光储系统的成本; B_{PV} 为居民安装光储系统的收益, 一般为光伏发电的售电收益, 由电网公司向居民支付; C_{UP} 为电网公司韧性升级的成本; ω_1 与 ω_2 分别为居民和电网公司的负荷重要度系数。

韧性升级成本和光储安装成本按时间折算的单位成本:

$$C_{UP} = C_0 \frac{r(1+r)^{L_{UP}}}{(1+r)^{L_{UP}} - 1} \quad (11)$$

$$C_{PV} = C_1 \frac{r(1+r)^{L_{PV}}}{(1+r)^{L_{PV}} - 1} + C_2 \quad (12)$$

式中: C_0 、 C_1 为韧性升级、光储安装的一次性成本; r 为折旧率; L_{UP} 、 L_{PV} 为韧性升级、光储安装的使用寿命; C_2 为光储系统的日常运行成本。

光伏安装成本的计算方法:

$$C_1 = P_1 \cdot n_1 + E_2 \cdot n_2 \quad (13)$$

式中: P_1 为光伏安装规模; n_1 为单位功率光伏的安装成本; E_2 为储能安装规模; n_2 为单位容量储能的安装成本。

光伏售电收益的计算方法:

$$B_{PV} = P_1 \cdot i_1 \cdot T_1 \quad (14)$$

式中: i_1 为售电价格; T_1 为光伏的发电时长。

光储系统的防护效果取决于系统的储能容量, 光储系统可以减少相当于系统储能容量的灾害负荷损失:

$$C_{pro} = E_2 \quad (15)$$

单次灾害损失的平均负荷损失量的计算方法:

$$C_{\text{loss}} = P \cdot T_{\text{loss}} \quad (16)$$

式中： P 为居民用户的日常负荷功率； T_{loss} 为每次灾害的平均停电时长，可通过历史统计获取。

2.3 演化博弈仿真平衡条件

演化博弈仿真模型中，假设策略增长率与该策略的收益与群体平均收益之差成正比，即演化博弈的复制者动态为

$$\dot{x} = x(u_{\text{RS}_1} - u_{\text{RS}}) \quad (17)$$

$$\dot{y} = y(u_{\text{GR}_1} - u_{\text{GR}}) \quad (18)$$

计算安装光储策略和韧性升级策略的期望支付：

$$u_{\text{RS}_1} = y \cdot a_{\text{RS}} + (1-y) \cdot b_{\text{RS}} \quad (19)$$

$$u_{\text{GR}_1} = x \cdot a_{\text{GR}} + (1-x) \cdot c_{\text{GR}} \quad (20)$$

计算居民群体和电网公司的平均支付：

$$u_{\text{RS}} = x \cdot u_{\text{RS}_1} + (1-x)[y \cdot c_{\text{RS}} + (1-y) \cdot d_{\text{RS}}] \quad (21)$$

$$u_{\text{GR}} = y \cdot u_{\text{GR}_1} + (1-y)[x \cdot b_{\text{GR}} + (1-x) \cdot d_{\text{GR}}] \quad (22)$$

为了分析上述演化博弈仿真模型的均衡，需要根据单次灾害损失 C_{loss} 的大小进行讨论。

2.3.1 情况1： $C_{\text{pro}} > C_{\text{loss}} > k_1 C_{\text{loss}}$

在本情况中，可以认为灾害损失相对较小。复制者动态经过化简可得：

$$\dot{x} = x(1-x)(B_{\text{PV}} - C_{\text{PV}} + \omega_1 p(1+(k_1-1)y)C_{\text{loss}}) \quad (23)$$

$$\dot{y} = y(1-y)(-C_{\text{UP}} + \omega_2 p C_{\text{loss}}(1-k_1)(1-x)) \quad (24)$$

令 $\dot{x}=\dot{y}=0$ ，可以得到4个平衡点(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1)。可根据雅克比矩阵的行列式 $\det J$ 和迹 $\text{tr } J$ 的正负判断平衡点的稳定性。 $\det J > 0$ 且 $\text{tr } J < 0$ 时平衡点稳定，稳定条件如表1所示。

表1 情况1平衡点稳定条件
Table 1 Stability conditions of equilibrium under circumstance 1

平衡点	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定条件
(0, 0)	$\beta_1 \beta_2$	$\beta_1 + \beta_2$	$\beta_1 < 0, \beta_2 < 0$
(0, 1)	$-\beta_2 \beta_3$	$-\beta_2 + \beta_3$	$\beta_2 > 0, \beta_3 < 0$
(1, 0)	$C_{\text{UP}} \beta_1$	$-C_{\text{UP}} - \beta_1$	$\beta_1 > 0$
(1, 1)	$-C_{\text{UP}} \beta_3$	$-C_{\text{UP}} - \beta_3$	无法稳定

复制者动态的雅克比矩阵：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dx} & \frac{dx}{dy} \\ \frac{dy}{dx} & \frac{dy}{dy} \end{bmatrix} \quad (25)$$

在当前情况下居民在电网不升级时安装光储后的收益：

$$\beta_1 = B_{\text{PV}} - C_{\text{PV}} + \omega_1 p C_{\text{loss}} \quad (26)$$

居民不安装光储时电网升级后的收益：

$$\beta_2 = -C_{\text{UP}} + \omega_2 p(1-k_1)C_{\text{loss}} \quad (27)$$

居民在电网升级时安装光储的收益：

$$\beta_3 = B_{\text{PV}} - C_{\text{PV}} + \omega_1 p k_1 C_{\text{loss}} \quad (28)$$

由表1结果可以看到，由于灾害损失比较小，若居民群体安装了光储系统，则光储系统可以消除灾害，电网韧性升级将没有抵御灾害的收益。因此，在这种情况下，平衡点(1, 1)无法稳定，也即居民安装了光储系统后，电网不存在进行韧性升级的必要。而其余的3个平衡点的稳定条件则取决于该平衡点对应策略的收益是否优于平均收益。

2.3.2 情况2： $C_{\text{loss}} > C_{\text{pro}} > k_1 C_{\text{loss}}$

在本情况中，可以认为灾害损失处于中等水平。复制者动态经过化简可得：

$$\dot{x} = x(1-x)(B_{\text{PV}} - C_{\text{PV}} + \omega_1 p(1+(k_1-1)y)C_{\text{pro}}) \quad (29)$$

$$\dot{y} = y(1-y)(-C_{\text{UP}} + \omega_2 p(C_{\text{loss}}(1-k_1+k_1x) - C_{\text{pro}}x)) \quad (30)$$

令 $\dot{x}=\dot{y}=0$ ，可得到4个平衡点(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1)。根据雅克比矩阵的行列式 $\det J$ 和迹 $\text{tr } J$ 的正负判断平衡点稳定性，如表2所示。

表2 情况2平衡点稳定条件
Table 2 Stability conditions of equilibrium under circumstance 2

平衡点	$\det J$	$\text{tr } J$	稳定条件
(0, 0)	$\beta_2 \beta_4$	$\beta_2 + \beta_4$	$\beta_2 < 0, \beta_4 < 0$
(0, 1)	$-\beta_2 \beta_3$	$-\beta_2 + \beta_3$	$\beta_2 > 0, \beta_3 < 0$
(1, 0)	$-\beta_4 \beta_5$	$-\beta_4 + \beta_5$	$\beta_4 > 0, \beta_5 < 0$
(1, 1)	$\beta_3 \beta_5$	$-\beta_3 - \beta_5$	$\beta_3 > 0, \beta_5 > 0$

在当前情况下居民在电网不升级时安装光储后的收益：

$$\beta_4 = B_{PV} - C_{PV} + \omega_1 p C_{pro} \quad (31)$$

电网在居民安装光储后韧性升级的收益:

$$\beta_5 = -C_{UP} + \omega_2 p (C_{loss} - C_{pro}) \quad (32)$$

可以看到, 随着灾害损失增大, 居民群体安装了光储系统后, 电网韧性升级也有抵御灾害的收益, 因此在这种情况下, 平衡点(1, 1)可能稳定。

2.3.3 情况3: $C_{loss} > k_1 C_{loss} > C_{pro}$

在本情况中, 可以认为灾害损失相对较大。复制者动态经过化简可得:

$$\dot{x} = x(1-x)(B_{PV} - C_{PV} + \omega_1 p C_{pro}) \quad (33)$$

$$\dot{y} = y(1-y)(-C_{UP} + \omega_2 p(1-k_1)C_{loss}) \quad (34)$$

令 $\dot{x} = \dot{y} = 0$, 可以得到4个平衡点(0, 0)、(0, 1)、(1, 0)、(1, 1)。可根据雅克比矩阵特征根 λ_1 、 λ_2 的正负判断平衡点的稳定性, 当特征根均为负时平衡。

$$\lambda_1 = (1-2y)(-C_{UP} + \omega_2 p(1-k_1)C_{loss}) \quad (35)$$

$$\lambda_2 = (1-2x)(B_{PV} - C_{PV} + \omega_1 p C_{pro}) \quad (36)$$

平衡点稳定性如表3所示。类似情况2, 情况3的平衡点稳定性取决于在该平衡点时对应策略的收益是否优于平均收益。

表3 情况3平衡点稳定条件
Table 3 Stability conditions of equilibrium under circumstance 3

平衡点	稳定条件
(0, 0)	$\beta_2 < 0, \beta_4 < 0$
(0, 1)	$\beta_2 > 0, \beta_4 < 0$
(1, 0)	$\beta_2 < 0, \beta_4 > 0$
(1, 1)	$\beta_2 > 0, \beta_4 > 0$

3 灾害随机性影响的演化仿真模型

由于韧性考虑小概率高损失的极端事件, 因此若要设计更加符合现实情况的仿真模型, 需要考虑灾害随机性对演化博弈仿真的影响。为了将灾害随机性引入演化仿真, 并对随机性影响进行定量分析, 本节对第2节的演化仿真模型进行了一定的修改。

3.1 演化博弈建模

演化博弈主体与策略集均与第2.1节一致, 而使用离散形式的演化博弈模型, 并将演化博弈支

付分为发生灾害与不发生灾害2种情况。记居民群体的支付矩阵为 P , 电网公司的支付矩阵为 Q 。

不发生灾害时, 支付矩阵 P_0 , Q_0 为

$$P_0 = \begin{bmatrix} -C_{PV} + B_{PV} & -C_{PV} + B_{PV} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} -C_{UP} + B_{PV} & B_{PV} \\ -C_{UP} & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

即将 $p=0$ 带入式(3)~(10)中得到矩阵对应元素。类似地, 发生灾害时, 支付矩阵 P_1 , Q_1 即为将 $p=1$ 带入式(3)~(10)中得到的支付矩阵。将 p 设置为灾害发生的概率, 可得期望支付矩阵 $\bar{P}$, $\bar{Q}$ 为

$$\bar{P} = (1-p)P_0 + pP_1 \quad (39)$$

$$\bar{Q} = (1-p)Q_0 + pQ_1 \quad (40)$$

为了将灾害随机性引入演化博弈, 本节使用离散的演化博弈模型, 并每次根据灾害发生概率, 以 p 的概率选择 P_1 , Q_1 , 以 $(1-p)$ 的概率选择 P_0 , Q_0 。离散演化博弈均衡分析时要求支付矩阵各元素非负, 因此在实际计算时, 需要将 P , Q 减去2个矩阵8个元素中小于0的最小元素值, 使2个矩阵内各元素非负。

记仿真中的变量向量 $X=(x, 1-x)^T$, $Y=(y, 1-y)^T$, 则离散形式的演化仿真方程^[23]为

$$x_{t+1} = \frac{x_t(P(t)Y_t)_1}{X_t P(t) Y_t} \quad (41)$$

$$y_{t+1} = \frac{y_t(Q(t)X_t)_1}{Y_t Q(t) X_t} \quad (42)$$

式中: 下标 t 为该离散仿真模型的第 t 步对应变量取值; $(P(t)Y_t)_1$ 与 $(Q(t)X_t)_1$ 为对应计算结果向量的第一个元素。

3.2 演化博弈仿真平衡条件

为分析该包含随机性的演化博弈仿真模型均衡的平衡条件, 需要计算各矩阵元素的方差信息, 将 P , Q 矩阵第 i 行第 j 列元素 p_{ij} , q_{ij} 的方差记为 $\sigma_{p_{ij}}^2$, $\sigma_{q_{ij}}^2$ 。

对于本文这类 2×2 支付矩阵, 平衡点的平衡条件与矩阵各元素的方差和期望有关^[24]。平衡点(1, 1)的平衡条件为

$$\ln \frac{\bar{p}_{11}}{\bar{p}_{21}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{p_{11}}^2}{\bar{p}_{11}^2} - \frac{\sigma_{p_{21}}^2}{\bar{p}_{21}^2} \right) \quad (43)$$

$$\ln \frac{\bar{q}_{11}}{\bar{q}_{21}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{q_{11}}^2}{\bar{q}_{11}^2} - \frac{\sigma_{q_{21}}^2}{\bar{q}_{21}^2} \right) \quad (44)$$

平衡点(0, 0)的平衡条件为

$$\ln \frac{\bar{p}_{22}}{\bar{p}_{12}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{p_{22}}^2}{\bar{p}_{22}^2} - \frac{\sigma_{p_{12}}^2}{\bar{p}_{12}^2} \right) \quad (45)$$

$$\ln \frac{\bar{q}_{22}}{\bar{q}_{12}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{q_{22}}^2}{\bar{q}_{22}^2} - \frac{\sigma_{q_{12}}^2}{\bar{q}_{12}^2} \right) \quad (46)$$

平衡点(1, 0)的平衡条件为

$$\ln \frac{\bar{p}_{12}}{\bar{p}_{22}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{p_{12}}^2}{\bar{p}_{12}^2} - \frac{\sigma_{p_{22}}^2}{\bar{p}_{22}^2} \right) \quad (47)$$

$$\ln \frac{\bar{q}_{21}}{\bar{q}_{11}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{q_{21}}^2}{\bar{q}_{21}^2} - \frac{\sigma_{q_{11}}^2}{\bar{q}_{11}^2} \right) \quad (48)$$

平衡点(0, 1)的平衡条件为

$$\ln \frac{\bar{p}_{21}}{\bar{p}_{11}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{p_{21}}^2}{\bar{p}_{21}^2} - \frac{\sigma_{p_{11}}^2}{\bar{p}_{11}^2} \right) \quad (49)$$

$$\ln \frac{\bar{q}_{12}}{\bar{q}_{22}} > \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{q_{12}}^2}{\bar{q}_{12}^2} - \frac{\sigma_{q_{22}}^2}{\bar{q}_{22}^2} \right) \quad (50)$$

根据式(43)~(50)即可判断各个平衡点的稳定情况, 需要注意的是, 平衡点对应的2个平衡条件同时成立时, 平衡点才能稳定。

4 仿真验证

4.1 仿真初始参数设置

在进行仿真验证时, 将初始参数以月为单位进行计算。参数取值参考文献[25]。

在居民参数方面, 取居民负荷重要度系数 $\omega_1=1$ \$/kW·h, 光储系统使用寿命 $L_{PV}=480$ 月, 每月折旧率 $r=0.4\%$, 光伏装机 $P_1=15$ kW, 储能装机 $E_2=60$ kW·h, 单位光伏成本 $n_1=400$ \$/kW, 单位储能成本 $n_2=200$ \$/kW, 光储每月运行成本 $C_2=25$ \$, 光伏月发电时长 $T_1=250$ h。

在电网相关参数方面, 取电网负荷重要度系数 $\omega_2=5$ \$/kW·h, 韧性升级使用寿命 $L_{UP}=480$ 月, 每月折旧率 $r=0.4\%$, 韧性升级的防护系数 $k_1=0.5$,

光伏上网电价 $i_1=0.05$ \$/kW·h, 韧性升级一次性成本 $C_0=9\ 000$ \$。

灾害相关参数根据第2.3节分类的3种情况进行设置。

4.2 演化博弈均衡仿真

4.2.1 情况1: $C_{pro} > C_{loss} > k_1 C_{loss}$

取 $p=1$, $C_{loss}=45$ kW·h。 x , y 的初值设置为0.1。在初始参数下, 得到平衡点(1, 0); 将光伏上网电价 i_1 降低为0.01 \$/kW·h后, 平衡点变为(0, 1); 进一步提升韧性升级成本 C_0 至18 000 \$后, 平衡点变为(0, 0)。各平衡点的收敛情况如图2所示。通过调低新能源售电收益, 平衡点从(1, 0)移动到了(0, 1), 即居民不再愿意安装光储系统, 此时电网需要进行韧性升级以减小灾害损失。进一步提升韧性升级的成本后, 电网韧性升级的期望收益也无法超过升级的成本, 使得电网放弃了韧性升级。调整不同初值, 平衡点收敛情况如图3所示, 可发现初值不影响最终的平衡点。这与2.3.1节的分析相符合, 验证了均衡分析的正确性。

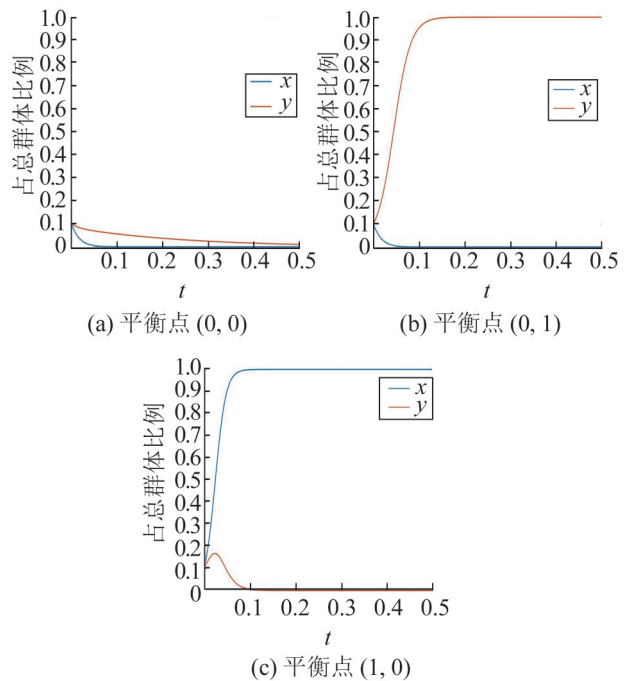


图2 情况1下变量 x , y 的演化情况
Fig. 2 Evolution of x , y under circumstance 1

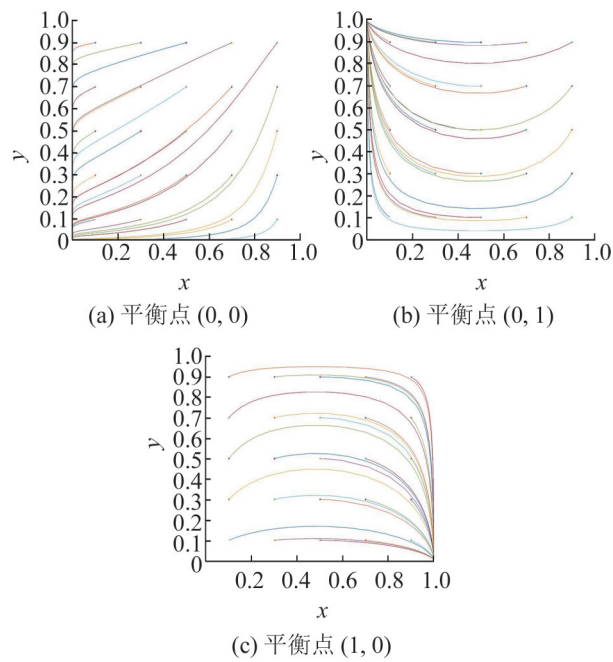


图3 情况1下不同初值的平衡点

Fig. 3 Equilibrium under circumstance 1 of different initial value

4.2.2 情况2: $C_{\text{loss}} > C_{\text{pro}} > k_1 C_{\text{loss}}$

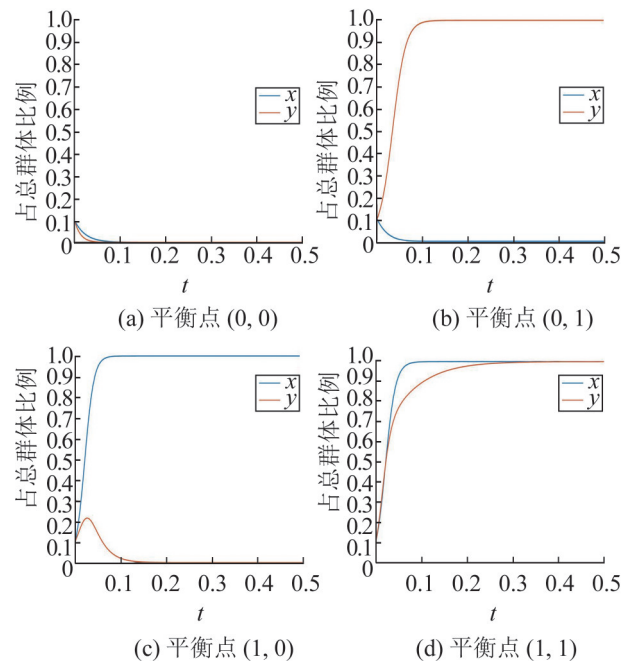
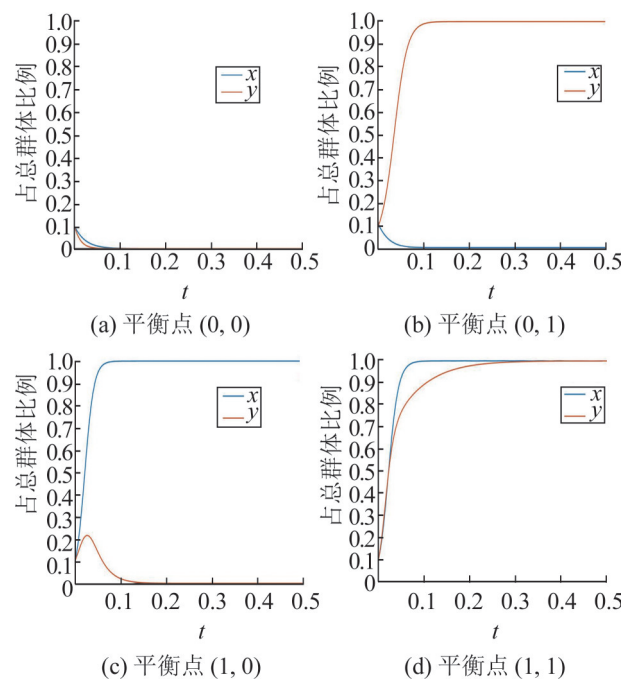
取 $p=1$, $C_{\text{loss}}=75 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。 x , y 的初值设置为 0.1。在初始参数下, 得到平衡点(1, 1); 将光伏上网电价 i_1 降低为 0.01 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$ 后, 平衡点变为(0, 1); 若将韧性升级成本 C_0 至 18 000 $\text{\$}$, 则平衡点变为(1, 0); 若将 i_1 降低为 0.01 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$, 电网损失系数 ω_2 降低为 1 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$, 则平衡点变为(0, 0)。各平衡点的收敛情况如图4所示。

降低新能源售电收益后, 居民将不再愿意安装光储系统; 提升韧性升级的成本或降低电网的负荷重要度系数后, 电网韧性升级的期望收益也无法超过升级的成本, 电网将不会选择韧性升级。类似情况1, 不同初值不会影响平衡点。这与2.3.2节的分析相符合, 验证了均衡分析的正确性。

4.2.3 情况3: $C_{\text{loss}} > k_1 C_{\text{loss}} > C_{\text{pro}}$

取 $p=1$, $C_{\text{loss}}=150 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。在初始参数下, 得到平衡点(1, 1); 将光伏上网电价 i_1 降低为 0.01 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$ 后, 韧性升级成本 C_0 提升至 18 000 $\text{\$}$ 后, 平衡点变为(0, 1); 若将电网损失系数 ω_2 降低为 1 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$,

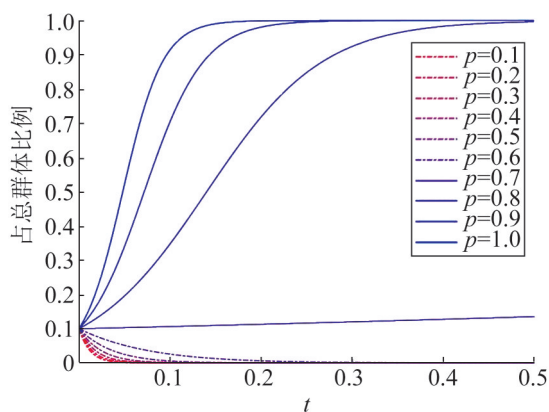
韧性防护系数 k_1 调整为 0.7, 则平衡点变为(1, 0); 若将 i_1 降低为 0.01 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$, ω_2 降低为 1 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$, k_1 调整为 0.7, 则平衡点变为(0, 0)。各平衡点的收敛情况如图5所示。

图4 情况2下变量 x , y 的演化情况Fig. 4 Evolution of x , y under circumstance 2图5 情况3下变量 x , y 的演化情况Fig. 5 Evolution of x , y under circumstance 3

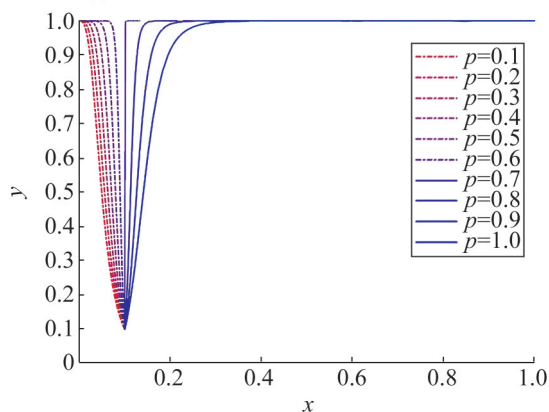
类似情况2, 降低安装光储系统收益会使得居民倾向于放弃安装光储系统; 降低韧性升级收益会使得电网倾向于放弃韧性升级。类似情况1、2, 不同初值不会影响平衡点。这与2.3.3节的分析符合, 验证了均衡分析的正确性。

4.3 灾害发生频率对演化博弈均衡的影响

在本文研究的演化博弈中, 由于韧性关注小概率高损失的灾害, 因此除了灾害的损失规模外, 灾害的发生频率 p 是另一个重要的影响因素。为此, 本节保持 $p \cdot C_{\text{loss}} = 150 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 不变, 即灾害的期望损失不变, 调整灾害发生频率和单次灾害的损失规模。在初始参数下, 可以看到随着 p 减小, 演化均衡从(1, 1)移动至(0, 1), 如图6所示。



(a) 灾害发生频率变化下 x 随时间变化情况



(b) 灾害发生频率变化下平衡点收敛情况

图6 灾害频率变化下的演化博弈均衡

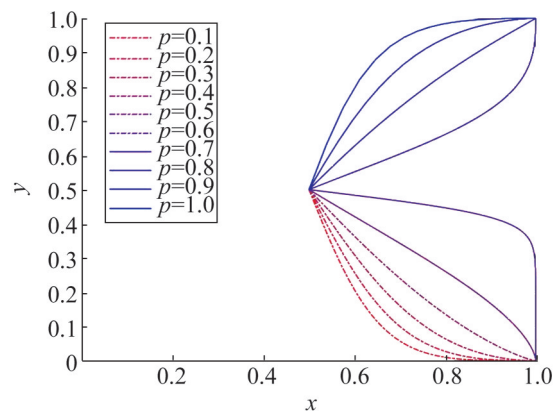
Fig. 6 Equilibrium when disaster frequency changing

在此参数下, 演化博弈均衡对应情况3。此时演化博弈均衡决定于 β_2 与 β_4 。由式(25)与式(29)可

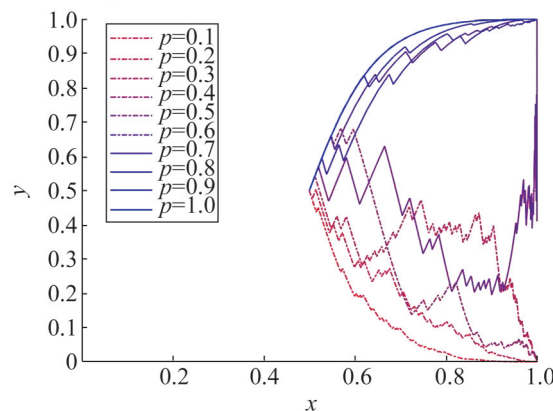
知, β_2 即居民不安装光储时电网升级后的收益不受 p 变化的影响, 而 β_4 即电网不升级时居民安装光储的收益会随着 p 的减小而减小。 p 越小, 光储系统发挥抵御灾害能力的机会也越小, 从而降低了居民安装光储系统的收益。图6中将 $\beta_4 < 0$ 的情况下的曲线用虚线表示, 可以看到 β_4 的正负确实影响了均衡结果, 当 $\beta_4 < 0$ 时, 演化均衡为(0, 1), $\beta_4 > 0$ 演化均衡为(1, 1)。

4.4 考虑灾害随机性的演化均衡仿真验证

本节使用第3.1节考虑灾害随机性的演化博弈均衡模型进行验证, 初始参数下, 调整灾害随机发生频率, 随着 p 减小, 演化均衡从(1, 1)移动至(1, 0), 如图7所示。需要指出的是, 由于第3.1节的演化博弈模型与第2.1节模型存在差别, 因此第2.3节的演化均衡分析在第3.1节模型中不一定成立。



(a) 未考虑灾害随机性时平衡点收敛情况



(b) 考虑灾害随机性时平衡点收敛情况

图7 灾害随机性对演化博弈均衡的影响

Fig. 7 Equilibrium considering random disasters

在图7中, 根据式(38)计算得到平衡点(1, 1)稳定条件, 将对应 p 的曲线标注为实线; 根据式(40)计算得到平衡点(1, 0)稳定条件, 将对应 p 的曲线标注为虚线。即根据3.2节均衡分析, 灾害随机发生的条件下, $p=0.1$ 、 0.2 、 0.3 、 0.4 时, 演化博弈均衡将演化至(1, 0), 其余情况下演化至(1, 1), 这与图6(b)展示的结果一致。仿真结果验证了3.2节的平衡点稳定性分析的正确性。

此外, 比较图7(a)与图7(b)可以发现, $p=0.5$ 、 0.6 时, 在不考虑灾害随机性的情况下, 演化博弈收敛至(1, 1), 而考虑了灾害随机性的情况下, 演化博弈收敛至(1, 0), 这说明了灾害随机性对于演化博弈均衡确实存在影响。

5 结论

传统的电网演化仿真模型未考虑电网韧性指标, 本文将演化博弈理论引入低碳城市电网的长期韧性仿真中, 为城市电网韧性发展趋势提供新的分析方法。引入演化博弈理论后, 仿真模型可以更好地模拟电网演化过程中不同群体的决策过程, 相较传统电网演化模型中人为设定演化规则更具合理性, 也可更好地分析演化过程中各影响因素对演化结果的影响。

基于本文演化仿真模型, 开展了低碳城市电网韧性的仿真分析, 可以看出考虑光储系统等低碳资源的韧性价值后, 城市电网低碳化过程加速, 系统的韧性水平同步提升。另一方面, 电网对于未来灾害的预期会显著影响其韧性升级决策。在低碳资源丰富、灾害风险小的区域, 电网公司可以选择减少韧性方面的投资。

后续工作方面, 希望能进一步细化仿真模型, 考虑电网拓扑等电气约束和灾害具体形式、政府政策、新能源成本等边界条件的动态变化, 更好地模拟城市电网的低碳化进程和电网韧性的演化趋势。

参考文献:

- [1] 钟海旺, 张广伦, 程通, 等. 美国得州2021年极寒天气停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 1-9.
- [2] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚"9·28"大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
- [3] Francis R, Bekera B. A Metric and Frameworks for Resilience Analysis of Engineered and Infrastructure Systems[J]. Reliability Engineering & System Safety (S1879-0836), 2014, 121: 90-103.
- [4] 高海翔, 陈颖, 黄少伟, 等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-8.
- [5] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
- [6] Zhang B, Dehghanian P, Kezunovic M. Optimal Allocation of PV Generation and Battery Storage for Enhanced Resilience[J]. IEEE Transactions on Smart Grid(S1949-3053), 2019, 10(1): 535-545.
- [7] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.
- [8] 梅生伟, 龚媛, 刘锋. 三代电网演化模型及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1003-1012.
- [9] 谢宇翔, 张雪敏, 罗金山, 等. 新能源大规模接入下的未来电力系统演化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 421-430.

- Xie Yuxiang, Zhang Xuemin, Luo Jinshan, et al. Evolution Model for Future Power System under Massive Penetration of Renewable Energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 421-430.
- [10] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
- Lu Zongxiang, Huang Han, Shan Baoguo, et al. Morphological Evolution Model and Power Forecasting Prospect of Future Electric Power Systems with High Proportion of Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.
- [11] 龚媛, 梅生伟, 张雪敏, 等. 考虑电力系统规划的OPA模型及自组织临界特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2021-2028.
- Gong Yuan, Mei Shengwei, Zhang Xuemin, et al. An Improved OPA Model Considering Planning and Self-organized Criticality Analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2021-2028.
- [12] 阮前途, 梅生伟, 黄兴德, 等. 低碳城市电网韧性提升挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2819-2830.
- Ruan Qiantu, Mei Shengwei, Huang Xingde, et al. Challenges and Research Prospects of Resilience Enhancement of Low-carbon Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2819-2830.
- [13] John Maynard Smith. Evolution and the Theory of Games [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [14] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
- Lu Qiang, Chen Laijun, Mei Shengwei. Typical Applications and Prospects of Game Theory in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [15] Taylor P D, Jonker L B. Evolutionarily Stable Strategies and Game Dynamics[J]. Mathematical Biosciences (S0025-5564), 1978, 40(1/2): 145-156.
- [16] 高洁, 盛昭瀚. 演化博弈论及其在电力市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 18-21.
- Gao Jie, Sheng Shaohan. Elementary Groping for Evolutionary Game Theory and Its Application in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 18-21.
- [17] Li Q, Li M C, Lü L, et al. A New Prediction Model of Infectious Diseases with Vaccination Strategies Based on Evolutionary Game Theory[J]. Chaos, Solitons & Fractals (S1873-2887), 2017, 104: 51-60.
- [18] Tembine H, Altman E, El-Azouzi R, et al. Evolutionary Games in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B(Cybernetics) (S1941-0492), 2010, 40(3): 634-646.
- [19] 程乐峰, 杨汝, 刘贵云, 等. 多群体非对称演化博弈动力学及其在智能电网电力需求侧响应中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增1): 20-36.
- Cheng Lefeng, Yang Ru, Liu Guiyun, et al. Multi-population Asymmetric Evolutionary Game Dynamics and Its Applications in Power Demand-Side Response in Smart Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 20-36.
- [20] 李龙, 聂龑, 陟晶, 等. 政府双重监管体制下可再生能源消纳的演化博弈研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2021, 37(1): 1-10.
- Li Long, Nie Yan, Zhi Jing, et al. Game Analysis on the Consumption of Renewable Energy under the Government Supervision[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Social Sciences), 2021, 37(1): 1-10.
- [21] 程宏波, 李志成, 王勋, 等. 基于演化博弈的车网双向互动策略研究[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 40-46.
- Cheng Hongbo, Li Zhicheng, Wang Xun, et al. Research on Two-way Interactive Strategy of Electric Vehicle and Power Grid Based on Evolutionary Game[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 40-46.
- [22] Ma S, Chen B, Wang Z. Resilience Enhancement Strategy for Distribution Systems under Extreme Weather Events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2018, 9(2): 1442-1451.
- [23] Zheng X D, Li C, Lessard S, et al. Evolutionary Stability Concepts in a Stochastic Environment[J]. Physical Review E(S2470-0053), 2017, 96(3): 032414.
- [24] Feng T J, Mei J, Li C, et al. Stochastic Evolutionary Stability in Matrix Games with Random Payoffs[J]. Physical Review E(S2470-0053), 2022, 105(3): 034303.
- [25] Fang Y, Wei W, Liu F, et al. Improving Solar Power Usage with Electric Vehicles: Analyzing a Public-Private Partnership Cooperation Scheme Based on Evolutionary Game Theory[J]. Journal of Cleaner Production (S1879-1786), 2019, 233: 1284-1297.