

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.001

演化博弈视角下需求侧参与电力市场的策略 均衡稳定性分析综述

程乐峰¹, 邹涛¹, 倪曼琦¹, 陈傲立¹, 董健¹, 朱继忠²

(1. 广州大学机械与电气工程学院, 广东 广州 510006; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要:随着新能源渗透率的不断提升, 电力市场的结构发生了深刻变化, 尤其是需求侧资源参与电力市场在提升电力系统灵活性以及推动低碳转型等方面的作用愈发突出。传统的供给侧调控逐渐转向以需求侧调控为主的多主体决策模式, 涉及政府、电力供应商、电网运营商和消费者等多个主体之间的复杂博弈。演化博弈论(evolutionary game theory, EGT)作为研究多主体动态博弈和策略演化的重要工具, 在电力市场的需求侧参与分析中展示了独特优势。与传统博弈论不同, EGT 充分考虑有限理性、不完全信息以及策略演化的动态过程, 能够有效分析不同激励和政策框架下的市场均衡状态与稳定性。文中综述 EGT 在电力市场中的应用, 重点分析基于 EGT 的需求侧参与的电力市场策略演化过程及均衡机制, 探讨 EGT 如何帮助理解和预测多主体博弈中的策略调整、政策激励对市场稳定性的影响, 并展望未来研究方向。通过对现有文献的整理与分析, 为政策制定者、市场监管者和研究人员提供理论框架和实践参考, 以促进新能源背景下电力市场的协同演化与可持续发展。

关键词:演化博弈论(EGT); 需求侧; 电力市场; 策略演化; 市场均衡; 政策激励

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)03-0003-15

0 引言

当前, 全球能源转型正加速推进, 新能源的高渗透率正在重塑电力市场结构。随着对传统化石能源依赖问题的关注日益增强, 清洁能源和可再生能源的比例逐步上升, 这种转变给电力市场带来深远的影响。新能源的间歇性和不确定性挑战电力供应的稳定性, 同时电力需求波动性增大, 对电网稳定运行提出更高要求。在此背景下, 需求响应(demand response, DR)作为一种关键的电力资源管理手段, 在新型电力系统中的重要性日益凸显。

在电力市场的多主体决策环境下, 需求侧管理(demand side management, DSM)和 DR 不仅涉及电力用户的个体决策, 还与电力供应商、电网运营商及政策制定者等多个主体密切相关。这些主体的互动对电力市场的运行效率和稳定性具有重要影响^[1]。DR 通过激励用户调整用电行为, 在电网稳定和资源配置中起到了关键作用。尤其在供应紧张或可再生能源过剩时, DR 能有效平衡电网负荷并促进清洁能源消纳。电力市场改革推动了需求侧资源参与的电力市场发展, 在市场改革进程中, 需求侧资源的系统性整合呈现出显著的范式创新特征。DR 机制作为市场交易体系的重要组成部分

分, 其制度性建构有效提升市场主体参与度。根据激励方式的不同, DR 可分为基于电价和基于激励的模式, 前者通过调整电价引导用户行为, 后者则通过经济补偿鼓励用户在电网需求波动时主动调节用电负荷。

然而, 需求侧参与的电力市场发展也面临着诸多挑战, 如信息不对称、市场机制不完善等问题^[1]。随着需求侧资源的大规模接入与灵活调度, 电力系统的可靠性和安全性要求也随之提高。如果调度管理不当, 可能引发电压波动、频率偏差等问题, 甚至影响系统运行的安全性。

在电力市场博弈行为分析中, 经典的 Nash 博弈假设市场参与者拥有完全理性与完全信息, 然而这与现实情况并不相符。演化博弈论(evolutionary game theory, EGT)则通过动态交互决策过程, 强调不完全理性和不完全信息, 提供分析电力市场多主体决策行为的重要工具^[2]。应用 EGT, 可以揭示需求侧用户在面对不同激励和政策条件下的策略调整过程, 深入分析市场均衡的形成机制和稳定性, 为政策制定和市场监管提供理论依据。

此外, EGT 外的其他博弈理论也在电力市场中得到广泛应用, 如 Stackelberg 博弈解决信息不完全问题, 合作与非合作博弈优化分布式能源配置, 贝叶斯博弈应对居民用户的交易信息不对称^[2]。通过应用 EGT, 还可建立 N 群体非对称博弈模型, 分析智能电网中的 DR 行为^[1]。

收稿日期: 2024-12-20; 修回日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171331); 广东省自然科学基金资助项目(2023A151501131)

总体而言,随着新能源渗透率的提高和电力市场改革的推进,传统的供给侧调控模式已经逐渐转向更加多元化、分布式的需求侧调控。需求侧资源参与电力市场已经成为提升电力系统灵活性及促进低碳转型的关键因素。然而,电力市场中的参与者越来越多,且各方利益关系复杂,导致 DR 和 DSM 的策略决策过程充满不确定性和动态性。文中聚焦新能源驱动下需求侧参与电力市场的多主体博弈决策问题,基于 EGT 框架,深入分析这一过程中的策略演化和均衡机制。研究意义及必要性总结如下:

(1) 背景与问题界定。随着新能源技术的发展和应用,电力市场正经历深刻的结构性变化。传统电力系统逐渐向多元化、分布式系统转型,在这一过程中,各个主体(如电力用户、分布式能源运营商、储能提供商、电网运营商等)参与到电力市场的决策中,形成了一个复杂的多主体博弈环境。如何有效解决多主体之间的决策冲突,并实现市场效率的最大化,是电力市场面临的重要挑战。文中阐述基于 EGT 的博弈模型在这一复杂环境中的应用,明确需求侧参与电力市场的研究背景和核心问题,为相关领域的进一步研究奠定理论基础。

(2) EGT 应用。EGT 作为分析多主体博弈和策略演化的有力工具,能够有效刻画有限理性、信息不完全以及参与者之间的动态学习过程^[3]。传统博弈理论假设市场参与者是完全理性且信息对称的,但现实中,电力市场的参与者通常在有限理性和不完全信息的约束下做出决策。EGT 模拟参与者在反复博弈中的策略更新,能够更真实地反映电力市场中的决策行为,特别是涉及 DR 和 DSM 时。文中综述 EGT 在电力市场中的应用,揭示其如何帮助分析需求侧参与市场的策略调整,并提供更符合实际情况的决策框架。

(3) 多主体决策与策略演化。电力市场中的多主体博弈呈现出高度的复杂性和动态性。EGT 能够在不确定的市场环境下揭示各主体之间的博弈机制,探讨如何通过策略演化形成协同共赢的演化稳定策略(evolutionarily stable strategy, ESS)。在需求侧参与电力市场的过程中,不同的激励政策和市场设计往往会对各方的策略产生重大影响。通过 EGT 分析,文中展示如何通过合理的政策设计促进不同主体之间的合作,推动 DR 优化,为如何在多主体博弈中实现长期稳定的市场平衡提供深刻的理论洞见。

(4) 均衡分析与政策启示。文中深入分析电力

市场中各主体在不同激励和政策框架下的动态演化过程,提出基于 EGT 的均衡分析方法。研究表明,政策激励和市场机制的设计直接影响市场均衡的形成和演化。通过 EGT 模型,文中提出一些优化政策设计与市场机制的建议,例如如何通过调整激励机制促进 DR,如何优化电网运行和新能源消纳率等。这些政策启示对于提升电力市场的灵活性和实现低碳转型具有重要参考价值。

(5) 前沿挑战与研究展望。尽管 EGT 在电力市场中的应用取得了显著进展,但仍然面临一些挑战,例如如何将更多的实际因素(如大数据、智能决策系统等)融入到演化博弈模型中,如何应对更加复杂的多智能体仿真等问题。因此,文中展望未来研究方向,包括如何利用跨学科的方法,如大数据、智能决策和多智能体仿真等,提升演化博弈模型的实用性和预测能力。这些研究将有助于进一步完善电力市场中的博弈分析框架,为政策制定者和市场监管者提供更加精准的决策依据。

综上,文中旨在综述基于 EGT 的需求侧参与电力市场的多主体博弈决策及其策略演化机制。通过对现有研究成果的梳理与分析,揭示 EGT 在电力市场中的应用潜力,并为政策设计和市场机制优化提供理论依据。在新能源背景下,需求侧的灵活性和响应能力在提升电力系统运行效率和推动低碳转型等方面具有重要作用。基于 EGT 的框架为需求侧参与电力市场的策略演化提供了系统性的理论分析工具,能够有效揭示多主体博弈决策过程中的复杂性和演化规律。文中对现有文献进行梳理与总结,为电力市场政策优化与机制设计提供理论参考,并为未来相关研究提供广阔的研究方向。

1 EGT 概述

1.1 EGT 的基本概念

EGT 最初由 Maynard Smith 于 1973 年提出^[4],旨在解释生物个体在进化过程中的策略选择和行为模式。EGT 借鉴达尔文的进化论思想,强调个体行为和策略随时间演化以适应环境变化。随着研究深入,EGT 逐渐应用于经济学、社会学等领域,成为分析复杂系统中个体行为和群体动态的重要工具。

图 1 清晰展示了 EGT 的知识来源、理论脉络及关键构成要素的形成过程。由图 1 可见,EGT 的实质在于将生物进化与博弈理论的思想相互交织,从而为分析多主体群体行为的长期动力学过程、策略调整与稳定性提供创新的方法论基础与理论工

具。EGT 结合博弈论和生物进化论, 描述策略群体在长期演化中的动态变化。通过引入适应度和 ESS, EGT 分析策略组合的长期稳定状态。在电力市场中, ESS 能够帮助理解多主体博弈中的稳定配置, 并为电网安全与智能电网的健康发展提供理论支持。

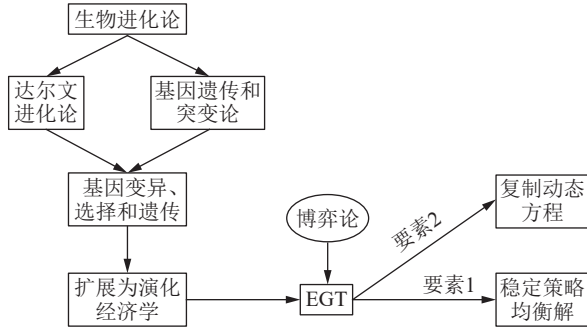


图 1 EGT 的形成脉络与核心要素

Fig.1 EGT foundations and core elements

ESS 是 EGT 中的核心概念, 描述了给定环境下, 种群中个体行为策略的一种稳定配置。在电力市场中, ESS 对于电网安全稳定运行水平的提高以及智能电网的健康发展都具有重要意义。复制者动态(replicator dynamics, RD)是描述 ESS 如何在种群中传播的数学模型。这一概念由 Taylor 和 Jonker 在 1978 年提出^[5], 并在后续研究中得到发展。RD 通过模拟个体的繁殖和死亡过程来预测策略的演化路径^[6]。在 RD 中, 个体的适应度差异决定了其策略在种群中的传播速度。随着时间的推移, 那些具有更高适应度的策略将在种群中传播, 而适应度较低的策略则会逐渐消失。

在处理多主体、非完全理性决策时, EGT 优势明显, 其充分考虑生物系统中的随机性。文献^[7]通过随机过程和动力学分析, 准确描述分子过程、个体相互作用及环境的不确定性, 实现对策略变化的精确刻画, 这是经典博弈论所无法做到的。EGT 为理解复杂系统中的决策提供了更贴合实际的框架。基于 EGT 的方法为分析电力市场中的多主体博弈决策提供一个新的视角。与传统博弈论的静态分析不同, EGT 能够模拟参与者在有限理性、不完全信息及动态反馈中的策略演化过程, 特别适用于电力市场这一复杂系统, 能够揭示各主体如何在长期博弈中通过不断学习与调整策略, 最终趋向稳定的演化均衡。

1.2 主要模型与方法

1.2.1 RD 模型

RD 模型是 EGT 中用于描述群体策略演化的

重要模型之一, 在有限种群的演化博弈分析中起着关键作用。RD 模型描述群体中策略频率的变化。在该模型中, 策略的适应性与其获得的支付相关, 支付高于平均水平的策略会在群体中逐渐增加其频率, 而支付低于平均水平的策略则会逐渐减少频率。这种模型反映群体中策略的演化过程。在有限种群中, 个体的策略选择会受到种群中其他个体的影响。文献^[8]引入一种频率依赖的 Moran 过程来描述这种演化博弈的动态, 在 Moran 过程中, 种群由 N 个个体组成, 个体被分为使用策略 A 和策略 B 的两类, 对于使用策略 A 的个体, 其适应度受到种群中其他个体策略的影响。

1.2.2 最优反应动态模型

最优反应动态模型描述个体如何根据其他玩家的策略选择自己的最优策略^[9]。在演化过程中, 个体倾向于选择对其他策略的最佳反应, 推动群体策略随时间演化。该模型可用来分析电力市场中多主体策略的调整与稳定性。

对于一个具有有限策略集 $S, S = \{1, 2, \dots, n\}$ 的对称博弈, 当群体策略分布为 $x, x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x_i 为群体中选择策略 i 的比例且 $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ 时, 令 $u_i(x)$ 为在策略分布 x 下选择策略 i 的收益 (或适应度)。则最优反应集合定义为:

$$U_{BR}(x) = \{i \in S \mid u_i(x) \geq u_j(x), \forall j \in S\} \quad (1)$$

简言之, $U_{BR}(x)$ 包含在策略分布 x 下能够产生最高收益的策略。基于此, 最优反应动态模型的基本思想是: 个体在一定的学习或适应过程中, 会倾向于切换 (或保持) 为当前状态的最优策略, 从而使整体策略分布随时间演化。通常可将演化过程刻画为一个动力系统。当时间以连续变量 t 表示时, 策略份额 $x_i(t)$ 的变化可表示为微分方程。若在策略分布 x 下, 最优反应集合 $U_{BR}(x)$ 唯一且为策略 k , 则群体将逐渐向策略 k 的方向迁移。此时动态方程可写为:

$$\begin{cases} \frac{dx_k}{dt} = \alpha(1 - x_k) \\ \frac{dx_j}{dt} = -\alpha x_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $j \neq k; \alpha > 0$, 为速度参数。当策略 k 是唯一最优反应时, 其频率将逐渐增大, 其他非最优策略的频率则会衰减。若存在多个策略并列为最优反应, 即 $U_{BR}(x)$ 包含多个元素, 则最优反应集合内的策略平分频率增量。例如, 若 $U_{BR}(x)$ 中包含 m 个策略, 则对每个 $i \in U_{BR}(x)$:

$$\frac{dx_i}{dt} = \beta \left(\frac{1}{m} - x_i \right) \quad (3)$$

式中： $\beta > 0$ ，为相应的调整参数。

对于非最优反应策略 $j \notin U_{BR}(x)$ ，有：

$$\frac{dx_j}{dt} = -\beta x_j \quad (4)$$

该形式体现了演化过程中个体对当前最优策略的趋同与对非最优策略的淘汰。

通过最优反应动态模型的分析，研究者可识别在长期演化过程中可达到且稳定的策略组合(即 ESS)，并评估不同政策激励、市场机制或外生扰动下，群体策略的收敛性和稳健性。这对于需求侧参与的电力市场、多主体动态决策以及其他复杂系统的行为分析具有重要理论意义与实践价值。

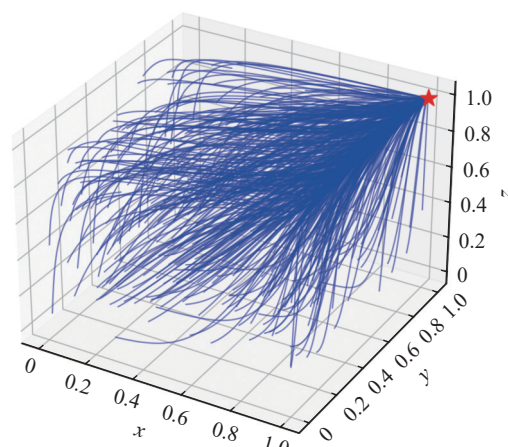
1.3 EGT 在电力市场中的应用

在电力市场中，参与者的有限理性和市场信息的不完全性使得传统博弈论在分析市场行为时存在局限性，而 EGT 以有限理性的个体为研究对象，强调系统达到均衡的动态调整过程，更能准确反映电力市场的实际情况^[10]。通过运用 EGT 建立发电企业竞价模型，如单群体 RD 模型、随机性 RD 模型和多群体 RD 模型等，可以深入分析发电企业的竞价策略及其稳定性^[11]。文献[12]以某区域电力市场为例，运用 EGT 将发电企业视为参与者，投标策略系数为关键变量，在不完全信息交易中，企业依反馈调整策略，其报价策略存在多个均衡点，市场初始状态如企业投标倾向、供需状况和对手策略估计等因素会影响最终收敛的均衡点。

在电力市场 DSM 中，文献[13]将政府、电网企业和用户视为多主体参与博弈。政府可选择激励或不激励 DSM 政策，电网企业能决定是否实施，用户可选择接受或不接受 DSM 服务，各方策略相互影响。通过构建演化博弈模型，运用 RD 方程分析策略调整过程，得出不同情况下的稳定均衡点及策略选择倾向。这充分展示 EGT 在分析电力市场多主体博弈、促进 DSM 方面的重要作用，为理解各方互动决策及制定相关政策提供有力依据。EGT 还可用于判断电力市场的均衡状态及其稳定性^[14]，这对于电力市场的监管和调控具有重要意义，并且可以最小化环境影响。根据 EGT 的分析结果，可以设计合理的电力市场机制。通过调整市场中的一些因素，如竞价电量空间等，能够引导发电企业的行为，实现市场设计者期望的均衡状态。

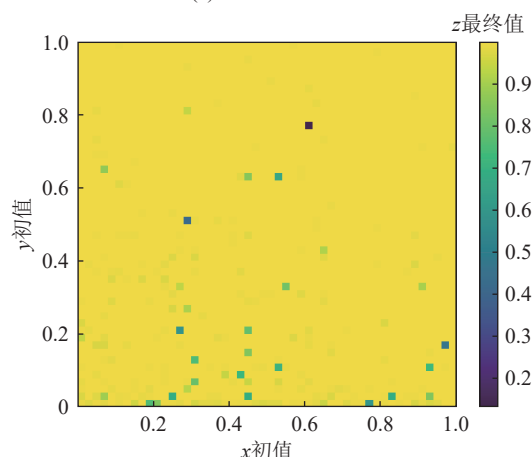
基于此，文中基于 EGT 给出一个仿真实例，聚

焦于新能源驱动下需求侧参与的电力市场多主体(包括政府、电网企业和用户)间的策略演化过程，仿真结果如图 2 所示。图 2 中， x 、 y 、 z 分别为政府、电网、用户策略概率。与传统博弈分析不同的是，文中采用 EGT 刻画主体间的有限理性、动态适应与策略更新行为。在该模型中，政府策略(激励与否)、电网企业策略(实施与否)、用户策略(接受与否)共同构成一个复杂的多维演化决策体系。通过复制动力学方程迭代 500 次仿真，考察各策略占比的动态变化和最终稳定点的形成。同时，在收益矩阵(以无量纲化收益为基础)和初始条件(概率区间为 0~1)设定下，通过变化政府、电网企业和用户的初始策略分布，研究系统在不同参数与初值条件下的稳定均衡状态(ESS)的出现与特征。这些关键参数(如策略概率无量纲、迭代时间 $T=500$ s)均以国际标准计量，确保结果具有可比性与可扩展性。仿真目的是展示 EGT 在分析电力市场 DR 与政策激励机制设计中的独特优势，为电力市场的有效调控、灵活运行及低碳转型提供理论支持和实证参考。

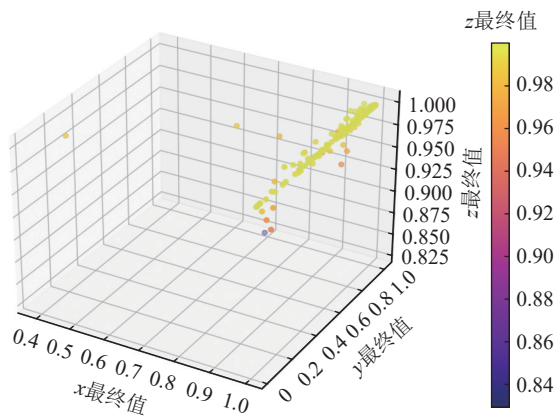


★ 演化稳定均衡点(ESS)

(a) 三维相轨迹图



(b) 不同初值下 z 最终值热力图



(c) 多次初值下最终状态分布三维统计图

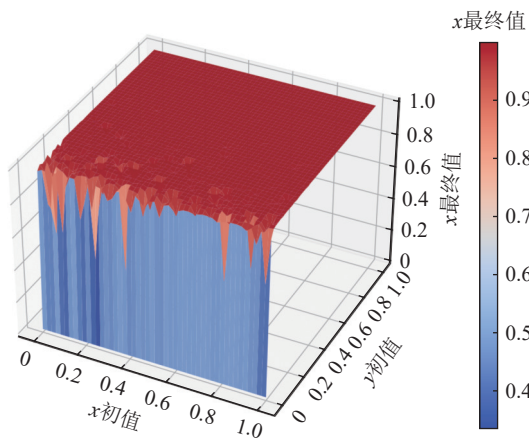
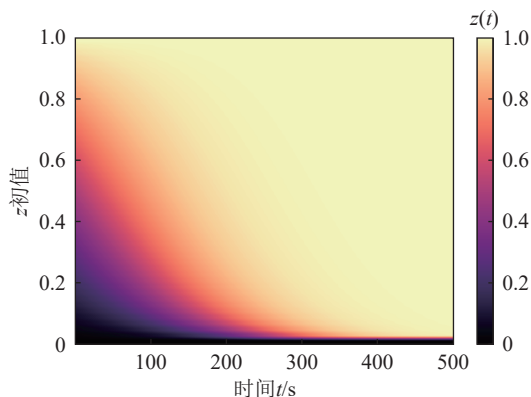
(d) x 最终值的三维响应面图(e) 不同 z 初值下的演化过程热力图

图2 针对政府、电网企业与用户在新能源驱动下参与电力市场DR所进行的演化博弈决策仿真结果

Fig.2 The evolutionary game decision simulation results of government, grid enterprises, and users participating in the power market demand response driven by new energy

图2(a)展示了在多种初始条件下,系统策略(x, y, z)演化轨迹在三维相空间中向ESS收敛的过程。这表明在重复的演化互动下,政府、电网企业、用户三者的策略存在一个或若干演化稳定均衡点。当外部条件与收益结构满足一定条件时,系统自适应地选择出有利于需求侧响应及可再生能源有效利用的策略组合。图2(a)清晰展示演化过程

的动态特点和最终稳定性状态。

图2(b)为不同政府与电网企业初值条件下,用户策略 z 值的最终平衡分布热力图。可观察到,当政府与电网企业策略初值趋向于激励与实施时,用户最终策略的选择趋向更高的接受概率。这意味着当外部市场信号与政策激励(如价格补贴、碳排放约束)明确且有利时,用户会更倾向积极参与需求侧响应,为电力市场调节提供弹性。

在图2(c)中,对多次随机初值进行统计,最终稳定点在三维空间中呈现出较高的集中度,说明无论初始状态如何分布,系统在一定参数条件下都会逐渐收敛至某一区域。这种收敛性验证了演化博弈模型的鲁棒性,为市场设计者提供了信心,即合理的政策设计将引导主体策略向有利于可再生能源消纳和需求侧灵活性的方向演化。

图2(d)展示了在政府-电网企业初值空间中最终政府策略 x 值的三维响应面特征。从图2(d)可以直观了解到政府初始激励程度与电网企业初始实施程度对最终政府策略的影响趋势。当政策初始方向与激励措施明确时,政府在长期演化中更有可能保持或强化正向激励策略,这为政府部门在制定与调整政策时提供定量参考依据。

图2(e)刻画了用户策略 z 值随时间 t 的动态变化过程,对不同 z 初值进行观察。结果表明,无论初值如何,用户策略往往在长期演化中趋向于某一稳定状态。这体现了用户在持续的市场信号与政策引导下,会不断调整自身行为模式,从而实现某种ESS分布,有利于DR的可持续实施。

图2表明:将EGT引入新能源驱动下需求侧参与的电力市场多主体决策分析中,展现出EGT在捕捉不完全信息下的有限理性决策者动态适应性与策略演化路径方面的独特优势。相较于传统静态博弈方法,EGT不仅能揭示均衡点的存在性,还可刻画策略群体在长期互动中达成ESS的动态过程。借此,研究者与政策制定者可以更全面地理解和预测市场参与者对不同激励和约束条件的反应,为设计更灵活、高效和低碳的电力市场机制提供科学依据。

1.4 需求侧参与的电力市场策略行为的演化

1.4.1 DSM与DR

DSM是提升能源效率和可持续发展的关键措施,旨在减少峰值负荷,避免过度投资发电和配电设施^[15-16]。DSM通过调整用户的用电时间和功率,平稳电力需求,降低系统能源成本,增强电力系统的稳定性和可靠性^[17-18]。常见DSM方法包括:(1)

结合高效发电单元,提高发电效率,推广清洁能源;(2) 峰荷削减,通过峰谷电价政策调节用户用电行为;(3) 转移,通过储热和储能设备平衡用电负荷;(4) 提升电力使用效率,推广节能设备。

DR 则是用户根据电力市场价格信号调整用电需求,以优化电力供应和需求的平衡^[19-20]。DR 方法包括:(1) 价格响应,用户在电价高时减少用电;(2) 激励响应,通过电力公司激励用户调整用电;(3) 直接负荷控制,电力公司远程控制用户设备;(4) 可中断负荷,用户在紧急情况下减少用电以获得补偿。

1.4.2 需求侧参与的电力市场交易模式

随着电力市场改革的不断深入,深入调动需求侧资源潜力,对于促进电力供需互动,协力保障电力系统经济、安全、绿色运行具有重要意义^[21]。需求侧对电力资源的优化配置和电力系统的稳定运行起着关键作用,在电力市场中的作用日益凸显。图 3 为电力市场的交易模式结构。

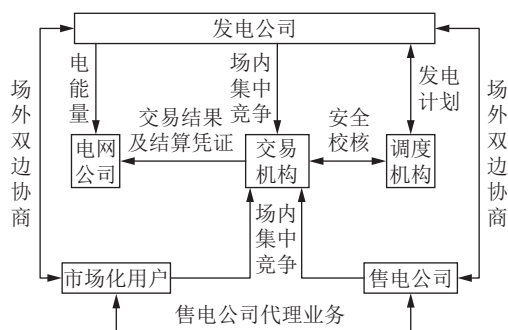


图 3 电力市场的交易模式结构
Fig.3 The structure of trading models in the electricity market

需求侧参与的电力市场交易模式主要有 3 种:批发市场、零售市场、虚拟电厂(virtual power plant, VPP)。

(1) 批发市场。在批发市场中,DR 是用户参与电力竞价的重要途径,用户可根据电价信号和激励机制灵活调整用电负荷^[22]。新加坡批发市场的 DR 计划是典型案例,用户可在电价较高时投标削减用电。参与者根据市场规则、价格信号及自身用电设备特性,制定策略并提交响应信息(如响应电量、时间和报价)。市场运营方将用户报价纳入出清模型,确定价格和调度计划。用户按计划调整用电行为,若符合要求,则获得补偿,否则可能受罚。用户参与有助于平抑峰谷电价波动和缓解供需矛盾。同时,负荷削减有助于能源价格下降,用户可获得激励支付,基于额外消费者剩余分配^[22]。

(2) 零售市场。零售市场是连接小型用户与电

力供应商的关键部分,通过价格机制和服务竞争优化资源配置,推动绿色电力和新能源应用^[23]。零售商通过动态价格信号引导用户调整用电行为,双方在 DR 活动中协作^[24]。用户选择套餐时根据成本效益和舒适度权衡,而零售商则优化定价与服务质量,以应对市场竞争。在不同电价套餐中,用户根据需求和价格敏感度选择,双方通过信息互动优化策略^[24]。

(3) VPP。VPP 整合分布式能源、储能系统和能源管理技术,能解决传统能源的高能耗和环境污染问题,并应对可再生能源波动带来的挑战^[25]。用户根据成本效益和政府政策选择是否参与 VPP,策略包括完全采用(R 策略)、维持现状(NR 策略)或部分采用(HR 策略)。VPP 通过优化资源调度,依据市场价格、技术和政策信号,调整分布式发电和储能,以实现供需平衡^[25]。国网冀北公司的实践展示了 VPP 在调度中的有效性,用户设备成为可调度资源,按 VPP 指令调整用电行为^[25]。

1.5 基于 EGT 的策略行为分析

EGT 可以用于分析需求侧参与的电力市场中各主体的策略行为和演化过程。在电力市场 DR 中,参与者包括用户、能源服务提供商、电力供应商等,其策略选择会受到多种因素的影响,如市场价格、政策法规、竞争对手的行为等。EGT 为深入剖析用户策略行为提供关键视角。通过建立演化博弈模型,可以研究参与者的策略互动和演化趋势,为市场机制的设计和政策的制定提供参考。文献^[26]构建电力用户与电力公司的博弈模型,在价格信号波动情境下,电力用户的策略演化过程清晰呈现。起初,用户基于自身用电习惯及对电价的初步认知选择策略,当价格信号出现波动,如峰谷电价差距拉大时,用户开始权衡参与 DR 的利弊。若电力公司实施激励措施,且用户参与 DR 后所获经济激励及降低用电成本的综合收益大于不参与时,用户会倾向于调整策略参与 DR;反之则可能继续观望或维持原有策略。在这一动态过程中,用户持续依据价格信号变化及电力公司策略调整自身行为,逐渐趋近于相对稳定的策略模式。文献^[27]基于 EGT 提出动态交互演化博弈算法模型。在价格信号波动影响下,用户群体根据用电量分类,其策略空间围绕是否参与智能用电调配展开。随着电价波动,如协议电价根据参与智能用电调配的用户比例等因素实时调整,用户会根据自身用电成本与舒适度收益综合考量策略选择。当电价调整使得参与智能用电调配的收益更优时,用户参与比例会

发生变化,不同用电量类别的用户在这种动态交互中不断调整策略,如用电量较大的用户可能更先响应电价变化调整参与度,通过持续的学习演化机制,整体用户群体逐渐达到一种相对稳定的状态,体现了在价格信号波动的不确定性环境下,用户如何通过策略演化趋向最优行为模式,以实现自身利益与电力系统供需平衡的协调。

2 需求侧参与的电力市场演化博弈分析

2.1 新兴博弈行为的形成

在传统电力市场中,电力需求侧的用户通常只能被动地接受电力侧制定的销售电价,而激烈的博弈一般仅存在于发电企业和电网公司之间的电力竞价博弈,用户群体与电力侧群体之间并无直接竞争关系。因此,需求侧用户无需进行相互博弈。然而,随着电力市场结构的不断发展,新增了大量的分布式能源用户、居民群体及高能耗工业用户等多样化主体,电力需求侧的互动模式愈加复杂,这些用户在电力市场中的参与方式和博弈方式逐渐增加。

电力体制改革打破传统电力市场中只存在于电力侧的博弈模式,进而形成新的博弈行为模式。文献[28]展示了需求侧参与的电力市场中新兴的博弈结构,如图4所示。

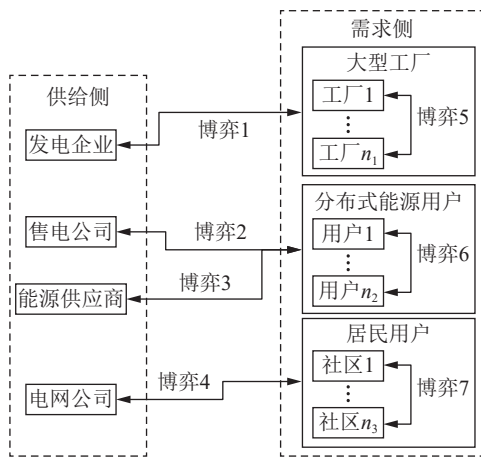


图4 供需侧博弈关系结构

Fig.4 Structure of supply and demand side game relationship

图4中主要包括以下3种博弈行为。

(1) 分布式能源用户博弈: 分布式能源用户通过其自有电源和储能设备进行市场交易,涉及与电网公司、售电公司及其他用户的博弈;

(2) 中低能耗用户博弈: 以居民群体为代表的中低能耗用户在电价机制激励下调整用电行为,与电力公司及其他用户进行博弈;

(3) 高能耗用户博弈: 高能耗用户(如大型工厂)通过与发电公司进行直购电交易,减少电力成本,与同类高能耗用户也有博弈关系^[28]。

2.2 分布式能源用户博弈行为分析

随着分布式能源(如太阳能、风能和储能设备)的迅速发展,分布式能源市场中的博弈行为愈加复杂,涉及的主体包括用户、售电公司及能源供应商(energy supplier, ES)等。在此市场中,三方之间存在着复杂的互动关系,这些关系并非简单的对立,更多的是相互依存和博弈。在分布式能源市场中,用户希望以最低成本获得能源供应,甚至通过分布式能源实现逆向售电获取收益;而售电公司则面临激烈的市场竞争,需要在保持盈利的同时确保电力供应的稳定性;ES则需要平衡分布式能源带来的市场影响,以保证其市场份额和盈利。

文献[29]构建分布式能源交易的三层博弈模型框架,研究售电侧和能源社区联盟之间的主从博弈、社区能源管理者之间的合作博弈、社区能源管理者和产消者之间的纳什议价博弈,提出能源社区内部产消者之间、能源社区之间以及能源社区联盟与电网之间的能源交易机制,优化产消者、能源社区以及能源社区联盟的能源交易功率,降低分布式能源并网对电网的冲击。文献[30]使用包括但不限于合作与非合作博弈、Stackelberg 博弈、演化博弈等理念研究能源需求侧中的分布式能源产消者的博弈,并提出 EGT 等博弈理念研究如何协调分布式能源集群的交易周期和功率以维持电力系统安全稳定运行,以及产消者如何优化分布式能源配置以实现自身利益最大化具有良好前景。在分布式能源的多主体参与中,文献[31]研究多个 ES、多个能源用户(energy user, EU)和一个系统运营商(system operator, SO)在日内交易决策中的博弈行为。SO 作为领导者发布能源采购信息给 ES,发布能源销售价格给用户;ES 作为追随者根据 SO 的能源采购信息设定能源价格,同时 ES 之间存在非合作博弈;用户在需求侧 Stackelberg 博弈框架下根据 SO 的售价制定自己的负荷调整策略,用户之间基于复杂网络结构存在网络演化博弈。文献[31]通过构建 SO 优化模型、ES 优化模型、以及 EU 综合 DR 模型来求解供需间的纳什均衡,其研究表明,ES 积极参与博弈互动增强了市场活力,SO 的存在增加了社会价值链,提高了社会效益,EU 参与综合 DR 提高了自身综合效益,降低了能源成本,提高了能源满意度,同时 EU 的电力负荷明显减缓,峰谷差削减效果明显。

电动汽车(electric vehicle, EV)作为电力系统中的一种灵活负荷资源,与可再生能源(如光伏)相结合,能够有效调节电网负荷,促进清洁能源的消纳。虽然EV在某些文献中被讨论为一种分布式能源的形式,但其本质上应被视为可调节负荷而非传统的分布式电源,这一点与光伏等设备有所不同。因此,EV和光伏在电力系统中的作用应被明确区分,EV作为负荷调节工具,在博弈论的框架下发挥了其在电力市场中的重要作用。

文献[32-34]分析EV在电力系统中的应用,并运用博弈论的方法来解决电力系统中各主体之间的决策问题,从而实现系统优化。文献[32]构建一种用于管理当地EV和可再生能源电力市场的随机博弈论优化方法,基于实际案例研究的数值结果表明,增加本地交易中心(local transaction center, LTC)的储能容量及其初始充电状态可以使LTC的利润提高255%,并且与忽略关键参数不确定性的确定性建模相比,利润提高433%。文献[33]则侧重于EV充电策略的研究,基于主从博弈的思想提出基于用户自主设置充电和放电权重的优化方法。文献[34]提出一个两阶段方案来解决充电站的功率分配和EV充电协调问题。在该方案中,第一阶段确定光伏、储能和电网之间的功率分配以及EV的总充电功率;第二阶段则协调单个EV之间的充电功率分配。通过非合作博弈和广义Nash均衡方法,该模型同时考虑并网模式和孤岛模式,确保了EV与电力系统其他部分的高效协调运行。

2.3 中低能耗用户博弈行为分析

居民为代表的中低能耗用户数量群体庞大,对于居民用电,其根据自身需求、电价等因素决定用电量;对于电力公司,其需要制定电价策略、供电策略等以实现利润最大化。所以,该群体与电网公司的利益交互不可避免地会产生博弈关系。

文献[35]中研究了在居民具有完全信息的条件下,以配有风光和储能系统的居民社区为基本单元,对社区储能系统的容量配置以及负荷安排进行优化管理,其中所建立的非合作博弈模型和合作博弈模型在用能安排以及社区和电网有功交互波动方面具有相似的结果,并经过研究发现处在合作博弈模型中的社区日费用略低于处于非合作博弈模型中的社区的费用。而与文献[35]类似,文献[36]通过建模人的行为,构建邻居效用函数与居民决策函数,表明通过邻居合作,可利用微电网中邻居的合作能力,使消费者以更低成本供应过剩需求,与日前市场价格相比,该算法可使能源购买价格降低

25%。文献[35-36]都是基于合作博弈,研究社区居民之间的策略博弈,而文献[37]则是探讨售电侧与用户之间的策略博弈,其针对含有多个售电商的智能住宅小区,提出基于主从博弈和动态实时电价的DR模型。在售电商和住宅用户之间策略互动生成的主从博弈中,当售电商宣布电价时,所有住宅用户收到价格信息并参与演化过程。售电商之间达到Nash均衡后,用户进行动态演化达到演化均衡,售电商和用户之间的博弈为主从博弈,追随者的均衡策略是对售电商宣布的价格作出最优反应。总的来说,文献[35-37]证明了主从博弈行为均衡存在性并设计算法求解,并通过数值仿真表明模型可实现DR并达到供需平衡,未来可扩展和探索住宅用户电力负荷不确定性及环境变量影响。

但现有研究中对居民用户的不完全理性和强随机性特点考虑较少,文献[38]构建对称和非对称2种演化博弈模型,其中利用对称演化博弈模型研究一个由多个智能建筑组成的住宅社区场景,居民用户可自主决定是否参与集成需求响应(integrated demand response, IDR)项目,智能建筑聚合器(intelligent building aggregator, IBA)根据参与比例制定激励多能源价格。居民用户的策略集为是否参与IDR,收益模型包括经济支出和舒适指数,通过计算不参与和参与IDR的用户的收益期望以及所有用户的平均收益期望,得出居民用户参与IDR的RD方程,通过雅可比矩阵判断RD方程的解对应的点是否为稳定均衡点,稳定均衡点对应演化博弈的最终策略比例,且不同的激励定价政策会对均衡点的稳定性产生影响。在此基础上,文献[38]进行了场景扩展,考虑具有不同家庭结构和生活方式的居民用户,增加居民类别来构建不对称演化博弈模型,并且协商能源价格根据用户对电、热、冷价格的敏感度参数来确定。在模型建立方面,居民用户的策略集保持不变,但不同类别的居民用户收益不同,通过计算参与和不参与IDR的用户的收益期望以及平均收益期望,得到RD方程,该方程的解和稳定性分析与对称演化博弈类似。此外,文献[38]还考虑居民用户的随机策略,并提出一种基于演化博弈的方法来研究居民用户参与IDR的趋势。该研究通过分析演化博弈中的RD,表明ES或稳定均衡的存在高度依赖于IDR可管理的收益参数。研究表明,不同的合同价格政策会显著影响居民参与IDR的趋势,并改变演化博弈的稳定均衡点,证明所提出的方法在分析和制定合适的合同定价机制方面是可行的。在文献[38]研

究基础上, 未来工作可集中在不同类型居民用户之间的多方多策略型不对称演化博弈问题研究上, 特别是考虑到不同居民群体在能源需求、经济状况、生活方式等方面的异质性, 如何通过演化博弈模型准确捕捉这些差异对决策行为的影响。下一步研究可以探索如何在多策略博弈框架下, 通过动态调整各方策略, 优化需求响应机制, 并提高电力市场的整体效率和可持续性。此外, 针对不同类型居民用户的博弈策略与利益冲突, 还可以考虑引入新的政策激励机制, 如碳减排奖励、价格信号调节等, 分析这些激励在促进居民用户参与 IDR 中的作用及其效果。

2.4 高能耗用户博弈行为分析

在当下的电力市场交易中, 大型工厂等高能耗用电用户为了降低自身的成本投入, 通常会跳过售电侧的电网公司而与发电侧的发电公司进行直接购电交易。高能耗用户为了能够更进一步实现自身成本最低化, 发电侧为了实现自身利益最大化, 两者之间必然存在博弈关系。对于发电侧, 基于多人合作对策思想的供电企业联盟利益分配方法能公平合理地分配供电企业在联盟中的利益大小, 合作对策模型可作为供电企业对大用户直接售电交易的优化决策^[39]。

基于此, 相关研究主要集中于在电力市场中, 研究发电厂与大用户之间的定价博弈以及相关的博弈策略优化, 尤其是在直购电交易的框架下。例如, 文献[40]采用 Stackelberg 博弈的双层优化模型, 分析发电厂与大用户的定价策略及其收益, 并通过混沌优化算法求得收益均衡, 进一步证明在合作与非合作的博弈状态下, 发电厂可以通过稳定的定价策略实现较高的收益, 并保持市场稳定性。文献[41]则从非完全信息静态博弈的角度, 提出双向拍卖与序贯谈判机制, 研究多个大用户与多个发电商之间的博弈模型, 分析不同交易状态下的均衡, 并提出有助于大用户直接购电的稳定性理论。文献[42-43]进一步强化该观点, 应用博弈理论对大用户直接购电的交易模式进行优化, 提升交易模式的实用性。文献[44]探讨发电企业与大用户的报价策略, 提供关于报价平衡点的理论支持, 帮助大用户制定合理的报价决策。文献[45]结合风电和热电站联盟, 提出通过双边博弈模型优化直购电模式的方式, 强调风电消纳和系统灵活性的提升。

总体而言, 文献[40-45]展示了多种博弈模型在电力市场中的应用, 尤其是在直购电交易领域。通过博弈理论, 这些研究实现了市场参与者收益的优

化与市场稳定性的增强。特别是采用 Stackelberg 博弈和非完全信息博弈的研究成果, 为实际市场操作提供重要的理论支持。同时, 通过计算方法和算法优化, 有效改善电力市场的供需平衡, 并促进各方利益的协调。因此, 未来研究可以进一步扩展到更复杂的市场环境中, 考虑更多类型的参与者和多层次的博弈分析, 从而为电力市场的改革与优化提供更深入的理论依据和实际操作方案。同时, 结合可再生能源(如风电、光伏)的整合和智能电网的优化, 进一步推动电力市场的绿色转型与高效运行。

3 未来发展方向

在新能源驱动下, 需求侧参与的电力市场逐渐成为提升电力系统灵活性与高效性的关键手段。基于 EGT 的方法已经为分析电力市场中的多主体博弈决策提供强有力的理论支持, 然而, 现有研究仍存在一定的局限性, 并且随着市场环境和技术的不断发展, 进一步的研究仍然是必要的。

3.1 现有研究的局限性

3.1.1 模型的简化与现实复杂性

当前的演化博弈模型通常为了便于求解和分析而做出一些简化假设。这些假设有时过于理想化, 未能充分捕捉电力市场的复杂现实问题, 导致模型与实际情况之间存在一定偏差。

(1) 高理性假设: 许多模型假设用户在需求响应中的行为是高度理性的, 假定用户能根据电价变化做出最优决策^[2]。然而, 实际中用户往往受限于有限理性、信息不对称、认知能力和对未来电价变化的预测不准确, 导致决策不完全理性。例如, 在面对电价波动时, 家庭用户可能难以及时调整其用电行为, 这与现有模型中假设的理性行为不符。因此, 未来研究应更加注重考虑有限理性对策略演化的影响, 尤其是用户在复杂环境下的行为适应和决策调整^[46]。

(2) 静态市场条件假设: 现有模型大多假设市场条件是相对静态的, 忽略了电力市场中的动态变化因素。实际情况中, 电力需求和供应都充满不确定性, 尤其是可再生能源的接入会加剧电力供应的波动性^[47-48]。在这种复杂动态的市场中, 现有模型对用户决策的预测可能不足, 因此, 未来的研究应注重引入市场动态性, 特别是如何将可再生能源的波动性及其对市场策略的影响纳入演化博弈分析中。

(3) 用户行为的同质性假设: 许多演化博弈模型假设市场中的所有用户表现出同质的行为。然

而,现实中用户群体的用电需求、响应能力、对价格信号的敏感度等方面存在显著差异^[49]。例如,商业用户和居民用户的需求弹性和用电时间结构差异巨大。未来的研究应重视用户行为的异质性,特别是不同类型用户在策略选择和演化过程中的差异性,以便更准确地反映电力市场中的多样性和复杂性^[50]。

基于此,表1总结当前演化博弈模型中的简化假设及其与电力市场现实复杂性的差异。现有模型常假设市场参与者具备高度理性和信息完备,但现实中用户往往受到有限理性、市场动态波动及不确定性等因素的影响。此外,模型对市场参与者行为的同质性假设和忽视电价信号反应的延迟等问题,使得预测结果与实际情况存在偏差。未来研究应更加注重模型的现实适应性,融入更多市场复杂性因素。

表1 演化博弈模型简化假设与电力市场现实复杂性的对比

Table 1 Comparison of EGT-based model simplifications and the real complexity of the electricity market

假设类型	现实复杂性	对模型的影响
高理性假设	用户通常是有限理性的,受到信息不对称和认知偏差的影响	简化假设忽视用户的有限理性,导致对策略演化过程的预测不够准确
静态市场条件假设	电力市场具有动态波动性,包括需求波动和可再生能源的接入	模型忽视市场波动性,无法准确模拟用户在动态市场中的决策行为
用户行为同质性假设	用户在需求响应中的行为差异显著,如商业用户与居民用户的需求弹性不同	简化假设忽略了用户异质性,导致对群体行为的预测过于简化
市场不确定性忽视	可再生能源波动、政策变化等不确定性影响需求响应策略	忽略市场中的不确定性因素,模型无法准确捕捉真实市场的变化
电价信号反应假设	用户对电价波动的反应存在延迟,且受限于设备惯性与预测能力不足	过于理想化的电价反应假设导致模型无法反映真实的用户响应过程

3.1.2 长期与短期效应的权衡

现有研究大多集中于电力市场中的短期效应优化,忽视长期效应对市场稳定性和用户策略演化的深远影响^[51]。短期的市场机制优化能够提高市场即时效率,但过于关注短期效应可能会导致市场长期的不稳定性。

(1) 长期效应的具体表现与影响:在电力市场中,长期效应主要体现在用户的长期行为演化和市场对长期激励的响应^[52]。例如,随着时间的推移,用户可能会逐步降低对外部电价信号的敏感性,而更依赖自主发电(如太阳能和储能系统)来满足需求。这种长期趋势可能导致需求侧响应行为的变

化,进而影响电力市场的运行模式。因此,未来研究应更多地考虑电力市场中长期效应,特别是如何将长期投资决策(如分布式能源和储能设备投资)纳入策略演化模型中^[53]。

(2) 长期演化稳定性不足:许多研究侧重于短期内的策略优化,缺乏对长期演化稳定性(ESS)的研究。尽管演化博弈模型能够揭示短期均衡点,但如何确保这些均衡点能够在长期博弈中保持稳定,仍是一个亟待解决的问题^[54-55]。未来研究应关注如何将长期的政策激励、技术进步和市场变动因素结合,设计能够维持长期稳定的策略组合。

(3) 过于关注即时响应机制:现有研究大多聚焦于用户对短期电价波动的响应,而忽略用户在长期内的行为变化^[56]。随着时间的推移,用户可能选择投资节能设备或分布式发电设施,改变其对外部电价信号的响应。为了更好地理解电力市场的长期稳定性,未来的研究需要将这些长期决策引入演化博弈模型^[2,57-58],分析其对市场策略演化的影响。

基于此,表2总结电力市场中短期效应与长期效应的主要区别和优化策略。短期效应优化着眼于提高市场的即时响应能力,如电价波动与需求响应调节,而长期效应则更加关注市场的稳定性和参与者的持续行为演化,特别是技术投资和政策激励的长远影响。尽管短期优化有助于提升市场效率,但过于集中于短期效果可能会导致长期市场的不稳定。相反,长期策略通过考虑政策变化和可再生能源接入等因素,能够有效促进电力市场的可持续发展。因此,未来研究应平衡短期和长期效应,以推动电力市场的高效与稳定运行。

表2 长期与短期效应的权衡与优化策略

Table 2 Balancing and optimizing long and short-term effects

维度	短期效应	长期效应
优化重点	电力市场即时效率、需求响应的快速调节	市场稳定性、参与者的长期行为演化与适应
决策机制	基于电价波动、灵活的需求响应策略	长期投资决策(如分布式能源、储能)与长期激励政策
影响因素	电价波动、即时市场反馈	可再生能源的逐步接入、政策变化(如碳排放目标)
挑战与问题	短期内的策略优化可能导致市场的长期稳定性下降	长期策略演化可能受到政策执行的延迟和不稳定性影响
研究方向	即时市场调节机制优化、短期响应模型	长期市场行为预测、结合长期政策激励设计与市场机制

3.2 研究前景与挑战

随着新能源在电力系统中的渗透率的不断提升,电力市场正逐步经历从传统供给侧调控到需求

侧调控为主的转型,需求侧的参与成为电力市场优化与低碳转型的重要组成部分。EGT作为研究多主体博弈决策与策略演化的有效工具^[59-60],能够为分析需求侧参与的电力市场提供理论支持和实践指导。文中对EGT在电力市场中的应用进行系统综述,并分析需求侧参与中多主体博弈的策略演化过程与市场均衡机制。然而,现有研究在多个方面仍存在局限性,且随着电力市场环境的变化与技术的进步,未来仍须进一步深入研究和完善。

3.2.1 不确定性与复杂性的引入

现有研究大多假设电力市场中的部分关键因素已知或稳定,例如电价波动、需求波动以及可再生能源供应等。然而,电力市场的实际运行面临大量的不确定性因素,尤其是可再生能源如风能、太阳能的波动性以及政策环境的变化,这些因素都会对电力市场的稳定性和需求侧响应的策略选择产生深远影响。未来研究应加强对市场不确定性的建模,采用随机博弈模型或动态随机演化博弈模型^[61-63],以更好地捕捉电力市场中的不确定性。例如,研究可以引入随机过程来模拟风能、太阳能等可再生能源的不确定性,并分析这种不确定性如何影响市场参与者的策略选择与策略演化。此外,行为经济学的非对称偏好模型可以帮助研究者深入理解在不确定市场环境中,用户如何做出决策,并相应调整其策略,以适应日益变化的市场条件。

3.2.2 长期与短期效应的综合分析

当前研究多集中于电力市场中的短期效应优化,尤其是市场价格的波动及短期电力需求响应。尽管短期优化有助于提高市场即时效率,减少电力系统的供需波动,但过于关注短期效应可能导致市场长期稳定性的失衡,甚至影响系统的可持续性。因此,未来研究应更加注重长期效应对电力市场策略演化的影响。短期内,用户可能根据即时电价波动做出响应,而长期内,用户的行为可能会因为技术投资(如分布式发电、储能设备等)和政策激励(如碳排放补贴、绿色证书等)发生根本变化^[59]。未来的演化博弈模型应综合考虑短期与长期效应,通过多时间尺度的博弈模型分析策略演化过程,探讨如何平衡短期市场效率和长期市场稳定性。此类研究可以帮助设计出兼顾短期需求响应与长期市场发展目标的政策框架。

3.2.3 用户异质性与多主体博弈

现有的EGT研究大多假设电力市场中的用户为同质群体,忽略用户在需求响应中的行为差

异^[2]。实际上,用户在响应电价波动时的行为受多种因素影响,包括用电习惯、对价格信号的敏感度、经济状况以及对未来能源市场的预期等^[2,64-65]。商业用户与居民用户在电力需求的弹性、用电结构和价格敏感度方面存在显著差异。因此,未来研究应更多地关注电力市场中用户的异质性,特别是在演化博弈模型中引入不同用户群体的差异化特征,以更精确地模拟市场参与者的策略演化。通过考虑用户的异质性,研究者可以更好地揭示多主体博弈中的行为复杂性与多样性,为需求响应机制的优化提供理论支持。

3.2.4 智能优化技术与演化博弈的结合

随着电力市场的复杂度不断增加,传统的演化博弈模型在处理多主体博弈中的复杂决策时,可能面临求解效率和计算能力的挑战。近年来,智能优化技术,尤其是强化学习和深度学习,已经在复杂系统的优化与决策中展现出显著的潜力^[60,66-69]。在电力市场的需求响应分析中,强化学习算法可以通过与环境的交互学习,逐步优化用户的决策策略,帮助模型捕捉动态演化过程中的非线性规律。深度学习技术则能够通过处理高维策略空间,提取出复杂决策模型中的特征,提升策略演化的预测精度。因此,未来研究应结合智能优化技术与演化博弈理论,以更好地解决电力市场中多主体博弈的复杂性。例如,基于深度强化学习的多智能体系统能够通过自适应调整策略,实现更高效的需求侧响应优化^[60]。

3.2.5 跨学科方法的融合与多层次博弈模型

电力市场的需求侧参与涉及多个学科的交叉,包括经济学、社会学、行为科学、计算机科学等。因此,未来研究需要进一步加强跨学科方法的融合,利用大数据分析、社会网络分析和行为经济学等工具^[70],提升演化博弈模型的实用性和预测能力。通过整合不同学科的理论与方法,研究者可以更全面地理解电力市场中各主体的行为特征,并在此基础上优化市场机制与政策设计。具体而言,可以通过构建多层次、多维度的博弈模型,分析用户之间的社交影响、信息传播与决策互动,进一步揭示电力市场中的策略演化规律。此外,结合复杂网络理论与演化博弈模型,研究者还可以探讨网络结构如何影响电力市场中信息的传播与用户策略的调整。

3.2.6 政策激励机制的优化与验证

政策激励在电力市场中的作用不可忽视,特别是在促进新能源消纳、提高需求响应灵活性方面。

当前研究主要集中于演化博弈模型的理论分析,缺乏对政策激励效果的实证检验。未来研究应将演化博弈模型与政策激励机制的设计相结合^[71-72],进行实际案例研究,通过与市场数据对比,检验模型的有效性和鲁棒性。例如,可以基于实际的电力市场数据,验证不同电价补贴、碳排放激励、绿色证书制度等政策在需求侧响应中的效果。通过与实际数据的结合,研究者可以优化政策工具,设计出更加灵活且具备长远影响的激励机制,进而推动电力市场的高效、低碳运行。

综上所述,基于 EGT 的需求侧参与电力市场的策略演化与均衡分析仍面临多个挑战。未来研究应在不确定性建模、长期与短期效应平衡、用户异质性、智能优化技术结合、跨学科方法的融合以及政策激励优化等方面进行深入探索。通过这些研究,演化博弈理论有望为电力市场的高效运行、低碳转型和可持续发展提供更加系统的理论指导和实践支持。

4 结语

文中对基于 EGT 的需求侧参与电力市场的策略演化与均衡分析进行系统总结和分析。随着新能源渗透率的提升,电力市场正经历由供给侧向需求侧调控转型的深刻变革,需求侧参与不仅能优化能源的配置效率,还在促进低碳转型、提高电力系统灵活性等方面发挥重要作用。电力市场中的多主体博弈,尤其是政府、电力供应商、电网运营商和消费者等不同主体之间的互动,构成一个复杂的决策体系,而 EGT 为分析这一体系提供有效的工具和方法。

首先,文中简要介绍 EGT 的基本概念,并分析其在电力市场中的应用。与传统博弈论不同,EGT 考虑参与者在有限理性、不完全信息和动态反馈条件下的策略演化过程,能够更准确地反映电力市场中各主体的行为模式及其策略调整。EGT 的应用为分析电力市场中的需求响应机制、政策激励及多主体博弈提供了新的视角,尤其在动态环境下,能够揭示策略如何通过多轮互动逐步收敛至 ESS。

其次,文中重点分析基于 EGT 的需求侧参与的策略演化过程。DSM 和 DR 作为电力市场改革的重要组成部分,其策略演化过程不仅受到电价波动的影响,还与政策激励、技术进步以及市场机制密切相关。EGT 模型能够有效揭示不同激励政策下,参与者如何调整其策略以实现市场均衡,并为政策

制定者提供理论支持。研究表明,政府的激励措施、电力公司的价格策略以及消费者的响应行为是影响需求侧参与市场稳定性的关键因素。

进一步地,文中分析了 EGT 模型在分析电力市场中的多主体博弈时的独特优势。传统博弈论通常假设市场参与者具有完全理性和完全信息,而现实中,电力市场中的参与者常常处于信息不对称和有限理性的状态。EGT 通过引入适应性学习和策略更新过程,更加符合实际市场运作机制。研究表明,EGT 不仅能够揭示均衡点的存在性,还能够描述策略群体在长期博弈中的演化路径,为市场参与者提供更加灵活的决策支持。

然而,现有的 EGT 研究也存在一些局限性,主要体现在模型假设的简化性和对现实复杂性的忽视。许多现有的演化博弈模型假设电力市场的参与者是同质的,忽略了不同用户群体(如商业用户与居民用户)在需求响应中的异质性。此外,现有模型在处理市场的不确定性和动态变化时也存在一定的局限性。随着电力市场中可再生能源比例的提高,市场的不确定性和波动性愈加明显,未来研究需要进一步加强不确定性因素的建模,结合随机博弈理论和大数据分析等新技术,以提高模型的预测准确性和适应性。

最后,文中总结了未来研究的主要方向。未来研究应更加关注电力市场中长期与短期效应的平衡,尤其是如何通过演化博弈模型分析不同政策激励对市场长期稳定性的影响。同时,考虑到电力市场的复杂性和多变性,研究者应加强对多主体异质性行为的研究,特别是如何结合智能优化技术与演化博弈理论,提高需求响应策略的实时优化能力。此外,跨学科方法的融合也将为进一步提高 EGT 模型的实用性和预测能力提供新的视角,尤其是结合行为经济学、社会网络分析等领域的成果,能够更深入地理解消费者行为和市场动态。

综上所述,基于 EGT 的需求侧参与电力市场的策略演化与均衡分析,为理解和优化电力市场中的多主体博弈提供重要的理论框架和实践指导。未来研究将在不断完善模型假设、引入不确定性因素、平衡长期与短期效应、探索智能优化方法等方面取得突破,以实现电力市场的高效运行与可持续发展。

致谢

本文得到广州市教育局高校科研项目(2024312278)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 程乐峰. 电力市场多群体策略博弈的长期演化稳定均衡理论研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
CHENG Lefeng. Theoretical investigation on the long-term evolutionarily stable equilibrium of multi-population strategic games in electricity market[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [2] YANG B, ZHOU Y M, YAN Y F, et al. A critical and comprehensive handbook for game theory applications on new power systems: structure, methodology, and challenges[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025(99): 1-27.
- [3] CHENG L F, YU F, HUANG P R, et al. Game-theoretic evolution in renewable energy systems: advancing sustainable energy management and decision optimization in decentralized power markets[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 217: 115776.
- [4] SMITH J M, PRICE G R. The logic of animal conflict[J]. *Nature*, 1973, 246(5427): 15-18.
- [5] TAYLOR P D, JONKER L B. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. *Mathematical Biosciences*, 1978, 40(1/2): 145-156.
- [6] MARTINEZ-PIAZUELO J, ANANDUTA W, OCAMPO-MARTINEZ C, et al. Population games with replicator dynamics under event-triggered payoff provider and a demand response application[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2023, 7: 3417-3422.
- [7] FREY E. Evolutionary game theory: theoretical concepts and applications to microbial communities[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2010, 389(20): 4265-4298.
- [8] TAYLOR C, FUDENBERG D, SASAKI A, et al. Evolutionary game dynamics in finite populations[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2004, 66(6): 1621-1644.
- [9] MURALI D, SHAIJU A J. Best-response dynamics for evolutionary stochastic games[J]. *International Game Theory Review*, 2023, 25(4): 2350010.
- [10] CHENG L F, HUANG P R, ZOU T, et al. Evolutionary game-theoretical approaches for long-term strategic bidding among diverse stakeholders in large-scale and local power markets: basic concept, modelling review, and future vision[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 166: 110589.
- [11] CHENG L F, PENG P, LU W T, et al. The evolutionary game equilibrium theory on power market bidding involving renewable energy companies[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 167: 110588.
- [12] WANG J H, ZHOU Z, BOTTERUD A. An evolutionary game approach to analyzing bidding strategies in electricity markets with elastic demand[J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3459-3467.
- [13] SHEN X, TANG J L, ZHANG Y J, et al. Dynamic evolution game strategy of government, power grid, and users in electricity market demand-side management[J]. *Mathematics*, 2024, 12(20): 3249.
- [14] KARAKI A, AL-FAGIH L. Evolutionary game theory as a catalyst in smart grids: from theoretical insights to practical strategies[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 186926-186940.
- [15] WANG J H, LIU M, WU H. The demand-side management and control of smart grids based on weighted network congestion games[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 43-52.
- [16] HEIDARYKIANY R, ABABEI C. HVAC energy cost minimization in smart grids: a cloud-based demand side management approach with game theory optimization and deep learning[J]. *Energy and AI*, 2024, 16: 100362.
- [17] KAKKAR R, AGRAWAL S, TANWAR S. A systematic survey on demand response management schemes for electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 203: 114748.
- [18] TSAOUSOGLU G, STERGIOTIS K, EFTHYMIPOULOS N, et al. Near-optimal demand side management for retail electricity markets with strategic users and coupling constraints[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2019, 19: 100236.
- [19] YAN X W, CAO H Y, SHAO C, et al. Optimised scheduling for distribution networks, microgrids and demand-side using multi-level game theory[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2025, 19(1): e70058.
- [20] HU R, ZHOU K L, YIN H. Reinforcement learning model for incentive-based integrated demand response considering demand-side coupling[J]. *Energy*, 2024, 308: 132997.
- [21] 赵晓东, 王娟, 邓良辰, 等. 电力市场化改革下我国需求响应价格形成机制研究[J]. *价格理论与实践*, 2024(2): 142-147, 222.
ZHAO Xiaodong, WANG Juan, DENG Liangchen, et al. Study on the price formation mechanism of demand response under the electricity market reform in China[J]. *Price (Theory & Practice)*, 2024(2): 142-147, 222.
- [22] ZHOU S F, SHU Z, GAO Y, et al. Demand response program in Singapore's wholesale electricity market[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 142: 279-289.
- [23] RASHEED S, ABHYANKAR A R. A game theory based retail market framework with DSO's operational considerations[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 4180-4193.
- [24] FURIÓ D, MORENO-DEL-CASTILLO J. Dynamic demand response to electricity prices: Evidence from the Spanish retail market[J]. *Utilities Policy*, 2024, 88: 101763.
- [25] YANG Y Y, PAN L Y. An evolutionary game model of market participants and government in carbon trading markets with virtual power plant strategies[J]. *Energies*, 2024, 17(17): 4464.
- [26] PAN M M, TIAN S M, WANG L F, et al. Evolutionary game analysis of demand response of power users' participation[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 394: 042078.
- [27] 张哲, 齐冬莲, 张建良. 演化博弈下智能电网需求侧响应用户参与度算法研究[C]. 中国武汉: 第 37 届中国控制会议. 2018: 8815-8820.

- ZHANG Z, QI D L, ZHANG J L. Research on demand response in smart grid based on evolutionary game theory: User engagement analysis[C]. Proceedings of the 37th Chinese Control Conference. Wuhan, China, 2018: 8815-8820.
- [28] 刘晓峰, 高丙团, 李扬. 博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2704-2711.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2704-2711.
- [29] 郭志龙. 分布式能源的需求响应机制及交易机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
GUO Zhilong. Research on demand response mechanism and transaction mechanism of distributed energy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [30] JI Z Y, LIU X F, TANG D F. Game-theoretic applications for decision-making behavior on the energy demand side: a systematic review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(2): 1-20.
- [31] LU Z J, ZHU G Q, WANG J, et al. Research on multi-agent game interaction of regional integrated energy system considering complex network of demand side[C]//2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC). Shanghai, China. IEEE, 2022: 106-112.
- [32] HOSSEINI DOLATABADI S H, BHUIYAN T H, CHEN Y, et al. A stochastic game-theoretic optimization approach for managing local electricity markets with electric vehicles and renewable sources[J]. *Applied Energy*, 2024, 368: 123518.
- [33] LIU Z Q, LI C H, SONG X H, et al. A study of EV charging strategies based on game theory[C]//2022 International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE). Xi'an, China. IEEE, 2022: 193-197.
- [34] YAN D X, YIN H, LI T, et al. A two-stage scheme for both power allocation and EV charging coordination in a grid-tied PV-battery charging station[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(10): 6994-7004.
- [35] 刘晓峰. 基于居民用电行为特征的需求侧博弈优化技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LIU Xiaofeng. Game-theoretic optimization of demand side based on residential energy consumption behavior[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [36] MORADI M B, GHAZIZADEH M S. Neighbors' personality traits impact in residential microgrid units' cooperation for energy sharing based on a complete game theoretic approach[C]//2022 12th Smart Grid Conference (SGC). Kerman, Iran, Islamic Republic of. IEEE, 2022: 1-7.
- [37] 代业明, 高岩, 高红伟, 等. 智能住宅小区的需求响应主从博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 88-94.
DAI Yeming, GAO Yan, GAO Hongwei, et al. Leader-follower game model for demand response in smart residential grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 88-94.
- [38] GAO B T, CHEN C, QIN Y H, et al. Evolutionary game-theoretic analysis for residential users considering integrated demand response[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1500-1509.
- [39] DONG M, SU J, ZHAO J, et al. Fraudulent balancing operation strategy for multi-agent P2P electricity trading considering neighborhood scene public energy storage[J]. *Applied Energy*, 2024, 375: 123909.
- [40] 夏炜, 吕林, 刘沛清. 直购电交易中等效电能双边定价博弈研究[J]. 现代电力, 2015, 32(3): 71-75.
XIA Wei, LYU Lin, LIU Peiqing. Economic game theory research on bilateral electricity pricing in direct power purchase[J]. *Modern Electric Power*, 2015, 32(3): 71-75.
- [41] 石长华. 基于演化博弈论的大用户直接购电研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
SHI Changhua. The research on large consumer's direct buying based on evolutionary game theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [42] 陈刚, 王超, 谢松, 等. 基于博弈论的电力大用户直接购电交易研究[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 75-79.
CHEN Gang, WANG Chao, XIE Song, et al. Study on bargaining of large power consumer's direct buying based on game theory[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 75-79.
- [43] FANG D B, WU J F, TANG D W. A double auction model for competitive generators and large consumers considering power transmission cost[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 43(1): 880-888.
- [44] 于亚男. 大用户直购电的交易模拟及风险分析方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
YU Yanan. Transaction simulation and risk analysis methods for direct power purchase by large consumers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [45] HUANG S, LIU W X, LI S Q, et al. The bilateral game of the wind farm-thermal power plant alliance and the large consumer based on the direct power purchase[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC). Beijing, China. IEEE, 2019: 408-413.
- [46] CHENG L F, YIN L F, WANG J H, et al. Behavioral decision-making in power demand-side response management: a multi-population evolutionary game dynamics perspective[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106743.
- [47] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 3.
- [48] MEDINA C, ANA C R M, GONZÁLEZ G. Transmission grids to foster high penetration of large-scale variable renewable energy sources-a review of challenges, problems, and solutions[J]. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2022, 12(1): 146-169.
- [49] ZUGNO M, MORALES J M, PINSON P, et al. A bilevel model for electricity retailers' participation in a demand

- response market environment[J]. *Energy Economics*, 2013, 36: 182-197.
- [50] HAN O Z, DING T, BAI L Q, et al. Evolutionary game based demand response bidding strategy for end-users using Q-learning and compound differential evolution[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2022, 10(1): 97-110.
- [51] ZAHRAOUI Y, KORÖTKO T, ROSIN A, et al. Market mechanisms and trading in microgrid local electricity markets: a comprehensive review[J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2145.
- [52] OLSINA F, GARCÉS F, HAUBRICH H J. Modeling long-term dynamics of electricity markets[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(12): 1411-1433.
- [53] YOLUSEVER A, ÜNVEREN B, EREN E. Examining investment strategies with evolutionary game theory[J]. *Journal of Research in Economics*, 2024, 8(1): 87-115.
- [54] SRIKANTHA P, KUNDUR D. A novel evolutionary game theoretic approach to real-time distributed demand response[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA. IEEE, 2015: 1-5.
- [55] CHENG L F, HUANG P R, ZHANG M Y, et al. Optimizing electricity markets through game-theoretical methods: strategic and policy implications for power purchasing and generation enterprises[J]. *Mathematics*, 2025, 13(3): 373.
- [56] KHAN A A, RAZZAQ S, KHAN A, et al. HEMSs and enabled demand response in electricity market: an overview[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 773-785.
- [57] JIA Y Z, LI Y L, FENG J E. Networked evolutionary game-based demand response via feedback controls[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(2): 1638-1646.
- [58] CHAI B, CHEN J M, YANG Z Y, et al. Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(2): 722-731.
- [59] CHENG L F, ZHANG M Y, HUANG P R, et al. Game-theoretic approaches for power-generation companies' decision-making in the emerging green certificate market[J]. *Sustainability*, 2025, 17(1): 71.
- [60] CHENG L F, WEI X, LI M L, et al. Integrating evolutionary game-theoretical methods and deep reinforcement learning for adaptive strategy optimization in user-side electricity markets: a comprehensive review[J]. *Mathematics*, 2024, 12(20): 3241.
- [61] WANG D M, ZHANG R X, ZHAO L. Stochastic evolutionary game model of bidding behavior for electricity purchase and sale in power market[C]//2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES). Lanzhou, China. IEEE, 2022: 538-543.
- [62] XIE J D, GUAN B W, YAO Y, 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: 1270681.
- [63] PERERA R S. An evolutionary game theory strategy for carbon emission reduction in the electricity market[J]. *International Game Theory Review*, 2018, 20(4): 1850008.
- [64] STANELYTE D, RADZIUKYNIENE N, RADZIUKYNAS V. Overview of demand-response services: a review[J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1659.
- [65] HUANG W J, ZHANG N, KANG C Q, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 1-13.
- [66] CHENG L F, YU T. A new generation of AI: a review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(6): 1928-1973.
- [67] ESNAOLA-GONZALEZ I, JELIĆ M, PUJIĆ D A, et al. An AI-powered system for residential demand response[J]. *Electronics*, 2021, 10(6): 693.
- [68] ALI A N F, SULAIMA M F, RAZAK A W A, et al. Artificial intelligence application in demand response: advantages, issues, status, and challenges[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 16907-16922.
- [69] KHAN M A, SALEH A M, WASEEM M, et al. Artificial intelligence enabled demand response: prospects and challenges in smart grid environment[J]. *IEEE Access*, 2022, 11: 1477-1505.
- [70] SHEKARI M, ARASTEH H, SHEIKHI FINI A, et al. Demand response requirements from the cultural, social, and behavioral perspectives[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23): 11456.
- [71] WANG L Y, LIN J L, DONG H Q, et al. Demand response comprehensive incentive mechanism-based multi-time scale optimization scheduling for park integrated energy system[J]. *Energy*, 2023, 270: 126893.
- [72] XU B, WANG J X, GUO M Y, et al. A hybrid demand response mechanism based on real-time incentive and real-time pricing[J]. *Energy*, 2021, 231: 120940.

作者简介:



程乐峰

程乐峰(1990),男,博士,副教授,研究方向为电力系统优化运行与控制、电力市场博弈论等(E-mail: chengleifeng@gzhu.edu.cn);

邹涛(1975),男,博士,教授,研究方向为电力系统优化运行与控制、工业实时优化与先进过程控制、智能无人系统等;

朱继忠(1966),男,博士,教授,通信作者,IEEE Fellow,中国电机工程学会外籍会士,IET Fellow,研究方向为综合智慧能源系统优化运行与控制、电网安全经济运行、新能源及其应用、智能电网及需求侧响应、智慧楼宇负荷及用户系统等(E-mail: zhujz@scut.edu.cn)。

(下转第 96 页)