

考虑储能投资的可再生能源电力供应链动态协调研究

吕裕泉

河南理工大学工商管理学院, 中国·河南 焦作 454003

摘要: 储能作为提升电力系统稳定性和灵活性的重要手段, 对促进可再生能源的高效消纳具有关键作用。本文构建了一个由发电商与售电商组成的二级电力供应链模型, 比较了分散式决策与集中式决策两种情境下最优储能投资努力、电力质量稳态水平与长期利润表现, 并在此基础上设计了“双向成本分担—转移支付”混合激励契约。研究发现: 电力质量的最优动态轨迹随着储能投资增加呈现先上升后收敛的演化特征, 且存在递减的边际改善效应。此外, 在满足一定契约参数条件时, 混合契约能够有效内部化储能投资的正外部性, 使发电商与售电商的储能努力水平、电力质量稳态值以及供应链整体长期均衡利润均达到集中式决策下的最优水平。

关键词: 储能投资; 电力质量; 电力供应链; 契约协调

Dynamic Coordination Study of Renewable Energy Power Supply Chain with Energy Storage Investment Consideration

Lv Yuquan

School of Business Administration, Henan Polytechnic University, China Henan Jiaozuo 454003

Abstract: Energy storage plays a vital role in enhancing power system stability and flexibility, thereby supporting the efficient integration of renewable energy. This study develops a two-tier electricity supply chain model comprising a power generator and a retailer, and compares optimal storage investment, steady-state power quality, and long-term profit performance under decentralized and centralized decision-making. A hybrid incentive contract that integrates bilateral cost sharing with transfer payments is further proposed to coordinate the supply chain. The results show that power quality follows a dynamic trajectory that rises and then converges as storage investment increases, reflecting diminishing marginal improvement effects. Moreover, when specific contract parameters are satisfied, the hybrid contract effectively internalizes the positive externalities of storage investment, aligning investment efforts, steady-state power quality, and long-term supply chain profits with the centralized optimum. These findings provide theoretical guidance for designing incentive mechanisms that enhance storage investment efficiency and promote higher-quality renewable energy delivery.

Keywords: Energy storage investment; Power quality; Electricity supply chain; Contract coordination

0 引言

自“双碳”目标提出以来, 我国积极推进新旧动能转换, 要求高污染、高能耗行业加快转型升级, 实现绿色、低碳发展。作为碳排放量较高的关键行业, 电力行业面临着减排与转型的双重压力^[1]。为推动电力行业绿色转型, 2023 年 6 月, 国家能源局发布了《新型电力系统发展蓝皮书》, 明确提出构建以新能源为主体的新型电力系统^[2-3]。截至 2024 年底, 全国新能源装机容量已达 14.5 亿千瓦, 占总装机容量的 43%, 高比例可再生能源接入成为新型电力系统的核心特征与发展方向^[4]。

随着新型电力系统建设的持续推进, 电力系统呈现出的“双高”特性也日益凸显。一方面, 经济发展带动用户侧用电需求增长, 负荷峰谷差不断扩大; 另一方面, 风电、光伏等可再生能源具有随机性和不可控性, 其输出受天气、季节等自然条件影响显著, 导致其功率波动性强、预测误

差大, 难以实现精确调度。这种源荷双侧不确定性的叠加, 对电网的稳定性、调度灵活性提出了更高要求^[5]。

储能系统作为新型电力系统的重要组成部分, 能够有效应对可再生能源发电的不稳定性与波动性。通过在电力富余时段存储多余电能, 并在发电受限或负荷高峰时段释放电能, 储能系统可实现输出平滑、提高电力供应的可靠性与质量。同时, 储能还能够实现“削峰填谷”, 降低电网供电负担, 通过合理调控峰谷差, 优化电网的运行效率。是提升新能源消纳能力、保障电网安全运行的关键技术手段之一^[6-8]。

为加快推进新型电力系统背景下的储能发展。国家和地方政府陆续出台相关支持政策, 如 2023 年 10 月, 国家发展改革委颁布《关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见》, 指出“积极推进新型储能建设”是“构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新

型电力系统”的坚实战略支撑^[9]。在政策推动下,企业加快储能项目的布局,以增强可再生能源电力的调节灵活性,电能质量和消纳能力。发电企业方面,国家能源集团国华能源投资有限公司在如东“光氢储一体化”项目中配套建设了 60 兆瓦 /120 兆瓦时储能电站,三峡新能源在乌兰察布绿色电站示范项目中部署的 55 万千瓦 $\times$ 2 小时储能系统。售电企业方面,九川玄武售电公司参与的四川首个用户侧新型储能战略试点合作项目,以及闽投配售电公司投资建设福清水务公司观音埔水厂的储能综合利用项目。均旨在提升可再生能源的利用效率。通过提供储能电站的建设与运维服务,有效保障电力质量的同时,还进一步降低了用户侧的综合能耗与运行成本。

此外,电力作为特殊商品,其供应稳定性、可靠性及故障响应能力是企业用户关注的核心。Hensher 等^[10]研究发现,电力质量显著影响用户的支付意愿,居民用户倾向于为高质量电力支付溢价,电力消费需求正从“有电可用”向“用好电”“用绿电”“用智慧电”转变。这一趋势不仅推动了电力系统运行机制的优化,也进一步激励发电企业增加在电力质量保障方面的投入。然而,在实际运营中,储能投资往往由两个独立主体独立承担,双方可能面临“搭便车”行为,两者均以自身利益最大化为目标,依赖对方的努力而减少自身投入。即在缺乏协同机制的情况下,其最优策略可能偏离整体最优,从而降低电力供应链的整体绩效。

目前,关于储能在电力供应链中应用的研究已取得诸多成果,考虑将储能技术融入电力系统、提升可再生能源渗透率以及优化市场运行效率等方面。马恒瑞等^[11]基于区域综合能源系统,研究了储能设备参与辅助服务的运行优化问题。研究表明,储能设备通过合理参与辅助服务,不仅能够有效降低系统运行成本,还能显著提升可再生能源的渗透水平,从而增强系统的灵活性与可持续性。Conlon 等^[12]通过构建区域电网优化模型,深入分析了可再生能源渗透率与储能配置的内在关联。其研究表明,随着可再生能源渗透率由 50% 提升至 65%,储能系统的价值提升了 1.5 至 2 倍,进一步凸显储能在实现高比例可再生能源并网中的关键支撑作用。从储能投资与收益分配的视角出发。Liu 等^[13]从风电厂与储能运营商联合调度的角度出发,构建了多种合作定价机制与利润分配策略,系统分析了储能参与对电力供应链中各方利益协调与整体收益提升的影响。研究表明,合理的合作机制不仅有助于激励储能投资,还可实现参与方间的互利共赢。陈威等^[14]从不同市场主体角度对储能投资模式进行了对比,研究发现,当可再生能源企业主导投资储能设备时,既能实现更高比例的可再生能源上网,又可降低消费者电价,提升整体系统运行效率与可持续性。

综上,基于供应链视角研究储能的相关文献更多地聚

焦于储能在优化系统经济性、稳定市场电价以及协调上下游主体利益方面的作用,而对储能投资如何提升电力质量及其对消费者电力质量感知价值等长期影响的探讨仍显不足。因此,本文以电力供应链为研究对象,借助微分博弈和最优控制理论,探讨不同决策模式下储能投资行为,电力质量演化路径以及供应链成员的利润分配机制。在此基础上,设计契约协调,以实现供应链整体绩效最优化。

1 模型描述与基本假设

本文构建了由发电商和售电商组成的可再生能源电力供应链。发电商利用风电、光伏等可再生能源发电并向售电商批发电力,售电商再面向终端用户供电。由于可再生能源具有间歇性和波动性,供电稳定性较弱。为保障用户对高质量、稳定电力的需求,电力交易过程中需配套储能设施,实现电力的时移调节与供需平衡,从而提升电力质量与供电可靠性。

假设 1:发电商通过投资电站级储能系统以优化可再生能源出力、提升电力质量与并网友好性;售电商则通过投资用户侧储能设备与能效优化设施、增强需求响应能力。参考文献^[14],假设投资成本分别为储能努力的凸函数,因此假设发电商和售电商的储能投资成本分别为:

$C(Z_N(t)) = \frac{1}{2}k_N Z_N^2(t)$ $C(Z_M(t)) = \frac{1}{2}k_M Z_M^2(t)$ 其中 k_N k_M 分别表示发电商和售电商储能投资努力转化为成本的系数。

假设 2:储能设备投资的增加,可以正向作用于电力质量。然而,随着时间的推移,已有投资设备老化、技术的更新淘汰,电力质量存在一个自然衰减状况。基于 Nerlove 和 Arrow^[15]经典动力学方程,本文将电力质量随时间的变化过程表示为: $\dot{G}(t) = \theta_N Z_N(t) + \theta_M Z_M(t) - \sigma G(t)$, 其中, $G(t)$ 表示 t 时刻的电力质量。初始电力质量 $G(0) > 0$; $\theta_N > 0$ $\theta_M > 0$ 表示储能投资水平对电力质量水平的影响系数。 $\sigma > 0$ 表示由于设备老化,技术更新迭代等原因造成的电力质量随时间的衰减系数。

假设 3:发电商和售电商的边际收益分别为 w_f, w_s , 发电商和售电商的贴现率 $\rho(\rho > 0)$ 相同。

假设 4:在电力市场价格相对稳定的情况下,具备储能设备的售电商能够向消费者提供更高质量的电力。此时,消费者的电力需求主要取决于电力质量。假设电力需求量与电力质量呈线性关系,表示为: $D(t) = D_0 + \varepsilon G(t)$ 其中, D_0 表示潜在电力市场需求, ε 为表示消费者的电力质量偏好系数。

2 模型构建与求解

2.1 集中决策模式(C 模式)

在集中决策情形下,发电商与售电商被视为一个统一的整体,协同优化其储能投入努力的水平,以实现整个供应链的整体效益最大化,因此,电力供应链系统的目标函数可表示为:

$$\max J^C = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [(w_s + w_f)(D_0 + \varepsilon G(t)) - \frac{1}{2}k_N Z_N^2 - \frac{1}{2}k_M Z_M^2(t)] dt \quad (1)$$

命题 1: (1) 最优均衡策略为: $Z_N^C = \frac{\varepsilon \theta_N (w_f + w_i)}{k_N (\rho + \sigma)}$, $Z_M^C = \frac{\varepsilon \theta_M (w_f + w_i)}{k_M (\rho + \sigma)}$
 (2) 电力质量的动态轨迹为: $G^C = G_\infty^C + (G_0 - G_\infty^C)e^{-\delta t}$ 其中 $G_\infty^C = \frac{\varepsilon (w_f + w_i) (k_N \theta_M^2 + k_M \theta_N^2)}{k_M k_N \sigma (\rho + \sigma)}$
 (3) 电力供应链各成员最优利润函数为: $V^C = a_1^C G^C + a_2^C$
 其中: $a_1^C = \frac{\varepsilon (w_f + w_i)}{\rho + \sigma}$, $a_2^C = \frac{(w_f + w_i) (2D_0 k_M k_N \rho^2 + 2D_0 k_M k_N \sigma^2 + \varepsilon^2 k_M \theta_N^2 w_f + \varepsilon^2 k_M \theta_N^2 w_i + \varepsilon^2 k_M \theta_N^2 w_i + \varepsilon^2 k_M \theta_N^2 w_i + 4D_0 k_M k_N \rho \sigma)}{2k_M k_N \rho (\rho + \sigma)^2}$

2.2 分散决策模式 (D 模式)

在分散式决策模型中, 发电商与售电商之间不存在合作关系, 而是构成一种 Nash 非合作博弈。在该博弈框架下, 发电商和售电商均以自身利润最大化为目标, 独立决策以实现各自的最优策略。因此, 分散式决策下的目标函数主要关注各主体的个体最优性, 而非整个供应链系统的整体最优性。目标函数表示为:

$$\max J_N^D = \int_0^\infty e^{-\rho t} [w_f (D_0 + \varepsilon G(t)) - \frac{1}{2} k_N Z_N^2(t)] dt \quad (2)$$

$$\max J_M^D = \int_0^\infty e^{-\rho t} [w_s (D_0 + \varepsilon G(t)) - \frac{1}{2} k_M Z_M^2(t)] dt \quad (3)$$

命题 2: (1) 最优均衡策略为: $Z_N^D = \frac{\varepsilon \theta_N w_f}{k_N (\rho + \sigma)}$, $Z_M^D = \frac{\varepsilon \theta_M w_i}{k_M (\rho + \sigma)}$
 (2) 电力质量的动态轨迹为: $G^D = G_\infty^D + (G_0 - G_\infty^D)e^{-\delta t}$ 其中 $G_\infty^D = \frac{\varepsilon (k_N w_s \theta_M^2 + k_M w_f \theta_N^2)}{k_M k_N \sigma (\rho + \sigma)}$
 (3) 电力供应链各成员最优利润函数为:
 $V_N^D = a_1^D G^D + a_2^D$, $V_M^D = b_1^D G^D + b_2^D$, $V^D = V_N^D + V_M^D$
 其中:

$$\begin{cases} a_1^D = \frac{\varepsilon w_f}{\rho + \sigma} & a_2^D = \frac{w_f (2k_N w_i \varepsilon^2 \theta_M^2 + k_M w_f \varepsilon^2 \theta_N^2 + 2D_0 k_M k_N \rho^2 + 4D_0 k_M k_N \rho \sigma + 2D_0 k_M k_N \sigma^2)}{2k_M k_N \rho (\rho + \sigma)^2} \\ b_1^D = \frac{\varepsilon w_i}{\rho + \sigma} & b_2^D = \frac{w_i (k_N w_s \varepsilon^2 \theta_M^2 + 2k_M w_f \varepsilon^2 \theta_N^2 + 2D_0 k_M k_N \rho^2 + 4D_0 k_M k_N \rho \sigma + 2D_0 k_M k_N \sigma^2)}{2k_M k_N \rho (\rho + \sigma)^2} \end{cases}$$

3 对比分析

推论 1: 两种决策模式均有: $\frac{\partial Z_N}{\partial k_N} < 0$, $\frac{\partial Z_N}{\partial \rho} < 0$, $\frac{\partial Z_N}{\partial \sigma} < 0$
 $\frac{\partial Z_N}{\partial \varepsilon} > 0$, $\frac{\partial Z_N}{\partial \theta_N} > 0$, $\frac{\partial Z_N}{\partial w_f} > 0$, $\frac{\partial Z_M}{\partial k_M} < 0$, $\frac{\partial Z_M}{\partial \rho} < 0$, $\frac{\partial Z_M}{\partial \sigma} < 0$, $\frac{\partial Z_M}{\partial \varepsilon} > 0$, $\frac{\partial Z_M}{\partial \theta_M} > 0$, $\frac{\partial Z_M}{\partial w_i} > 0$

发电商及售电商的储能投资水平, 供应链利润, 对电力质量的影响系数 θ_N 、 θ_M 和消费者的电力质量偏好 ε 以及各自边际利润 w_s, w_f 成正相关; 与成本系数 k_N 、 k_M , 衰减系数 σ 以及贴现因子 ρ 成负相关。

推论 2: 对比两种模式下的均衡结果如下:

(1) $Z_N^C > Z_N^D$, (2) $Z_M^C > Z_M^D$, (3) $G_\infty^C > G_\infty^D$, (4) $V^C > V^D$ 。

与分散决策模式相比, 集中决策模式下, 发电商和售电商的储能投资水平更高。电力质量稳定值以及供应链系统长期利润也均有所提高。这是因为集中决策模式能够内部化供应链各方的协同效应, 使发电商与售电商在投资决策中充分考虑彼此的利益, 通过统一规划储能投资, 降低

电力供应的波动性和不稳定性, 增强系统的调节能力, 提升电力质量。最大化整个电力供应链的综合收益。促进可再生能源的高效消纳。

4 契约协调 (S 模式)

尽管集中决策可实现更高的电力质量以及供应链整体利润, 但由于各方独立性强、信息不对称且企业往往以自身利润最大化为目标, 往往难以实现集中决策。而分散决策模式下存在“双重边际效应”, 难以实现帕累托最优。基于此, 本文在分散决策模式的基础上设计“双向成本分担 - 转移支付”契约, 通过成本互担与利润补偿, 来协调供应链。即发电商为售电分担储能成本比例 $\eta (0 < \eta < 1)$, 售电商为发电商分担储能成本比例 $\mu (0 < \mu < 1)$, 以及双方之间的转移支付 F 。其次, 发电商与售电商的利润函数分别表示为:

$$\max J_N^S = \int_0^\infty e^{-\rho t} [w_f (D_0 + \varepsilon G(t)) - \frac{1-\mu}{2} k_N Z_N^2(t) - \frac{\eta}{2} k_M Z_M^2(t) - F] dt \quad (4)$$

$$\max J_M^S = \int_0^\infty e^{-\rho t} [(w_s (D_0 + \varepsilon G(t)) - \frac{1-\eta}{2} k_M Z_M^2(t) - \frac{\mu}{2} k_N Z_N^2(t) + F)] dt \quad (5)$$

命题 3: (1) 最优均衡策略为:

$$Z_N^S = -\frac{\varepsilon \theta_N w_f}{k_N (\rho + \sigma) (\eta - 1)}, \quad Z_M^S = -\frac{\varepsilon \theta_M w_i}{k_M (\rho + \sigma) (\mu - 1)}$$

(2) 电力质量的动态轨迹为: $G^S = G_\infty^S + (G_0 - G_\infty^S)e^{-\delta t}$ 其中 $G_\infty^S = \frac{\varepsilon}{\sigma (\rho + \sigma)} \left(\frac{\theta_N^2 w_f}{k_N (1-\eta)} + \frac{\theta_M^2 w_i}{k_M (1-\mu)} \right)$

(3) 电力供应链各成员最优利润函数为:

$$V_N^S = a_1^S G^S + a_2^S, \quad V_M^S = b_1^S G^S + b_2^S, \quad V^S = V_N^S + V_M^S$$

其中:

$$\begin{aligned} a_1^S &= \frac{\varepsilon w_f}{\rho + \sigma} & a_2^S &= \frac{F}{\rho} + \frac{D_0 w_f}{\rho} + \frac{\varepsilon^2 \theta_N^2 w_f^2}{2k_N \rho (\rho + \sigma)^2 (\eta - 1)} - \frac{\varepsilon^2 \theta_M^2 (2w_s w_i (\mu - 1) - \mu w_i^2)}{2k_M \rho (\rho + \sigma)^2 (\mu - 1)^2} \\ b_1^S &= \frac{\varepsilon w_i}{\rho + \sigma} & b_2^S &= \frac{D_0 w_i}{\rho} - \frac{F}{\rho} - \frac{\varepsilon^2 \theta_M^2 w_i^2}{2k_M \rho (\rho + \sigma)^2 (\mu - 1)} - \frac{\varepsilon^2 \eta \theta_N^2 w_f^2}{2k_N \rho (\rho + \sigma)^2 (\eta - 1)^2} - \frac{\varepsilon^2 w_i \theta_N^2 w_f}{k_N \rho (\rho + \sigma)^2 (\eta - 1)} \end{aligned}$$

推论 3:

在“双向成本分担 - 转移支付”契约下, 当 μ 和 η 使 $Z_N^S = Z_N^C$, $Z_M^S = Z_M^C$ 时, 契约能使电力供应链系统实现协调, 此时, 发电商和售电商的各自承担的投入比例分别满足以下条件时: $\eta = \frac{w_f}{w_f + w_s}$, $\mu = \frac{w_s}{w_f + w_s}$

即供应链参与主体自身边际利润在系统整体利润的份额越大, 其愿意为对方成本分摊的比例越高, 这一关系反之亦成立。与分散决策模式相比, 组合契约激励下, 为了促使供应链实现协调, 发电商加大对售电商的储能成本的分担力度, 同时售电商也需要适当承担一部分发电商对储能的投入成本。此时, 供应链电力质量将达到集中决策模式时的最优状态。

推论 4:

若要每个成员都能够接受该契约, 需要满足发电商和售电商长期均衡利润不低于分散决策模式中各自的利润值,

即 $V_N^S - V_N^D > 0$, $V_M^S - V_M^D > 0$, $V_S^S - V_S^D > 0$, 此时 $F \in [F_{\min}, F_{\max}]$

$$F_{\min} = -\frac{\varepsilon^2 [k_N \theta_M^2 ((2\rho + \sigma)w_f^2 - \sigma w_z w_f) + k_M \theta_N^2 (2\rho + \sigma)w_z w_f]}{2k_M k_N \sigma (\rho + \sigma)^2},$$

$$F_{\max} = \frac{k_N \varepsilon^2 \theta_M^2 w_z w_f (2\rho + \sigma) + k_M \varepsilon^2 \theta_N^2 [w_z^2 (2\rho + \sigma) - w_z w_f \sigma]}{2k_M k_N \sigma (\rho + \sigma)^2}$$

5 算例分析

本节通过数值算例对比分析不同决策模型的均衡结果,分析电力质量的最优轨迹以及随时间变化的情况,对发电商和售电商储能投资水平的影响因素进行分析,并检验、契约协调对电力供应链主体及系统的优化效果。设定 $D_0 = 20$, $\varepsilon = 0.4$, $\theta_N = 0.6$, $\theta_M = 0.4$, $\sigma = 0.2$, $k_N = 0.3$, $k_M = 0.2$, $\rho = 0.1$, $w_f = 0.5$, $w_s = 0.5$ 。

5.1 电力质量最优轨迹分析

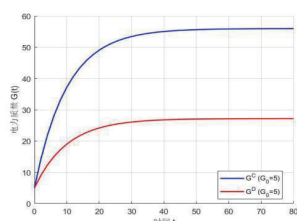


图1 电力质量随时间变化的动态轨迹曲线

从图 1 可以观察到,电力质量作为一个随时间演化的累积状态变量,其动态路径呈现出“持续上升—增速放缓—最终收敛”。这是因为电力质量的改善依赖于持续的储能投入,前期储能投资的边际效应较为显著,使电力质量在短期内快速提高;而随着电力质量逐渐接近稳态水平,储能投资的边际改善作用递减,导致其增长速度逐步放缓并最终趋于稳定。此外,集中决策下的电力质量提升速度明显快于分散决策,其稳态水平也始终高于后者。

5.2 储能投资水平与利润的影响因素分析

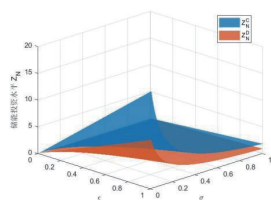


图2 ε 与 σ 对发电商储能投资水平的影响

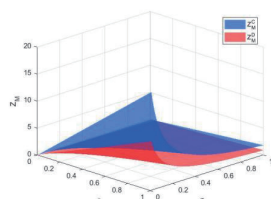


图3 ε 与 σ 对售电商储能投资水平的影响

图 2 图 3 中无论参数如何变化,集中决策下发电商与售电商的储能投资水平平均显著高于分散决策,系统整体利润最大化。随着电力质量敏感系数 ε 增大,两种模式的储能投资水平均上升,说明用户越重视电力质量,储能投资带来的需求提升和可再生能源消纳效益越明显。然而,集中与分散模式的投资差距会随 ε 增大而扩大,表明在高质量敏感情境下,分散模式难以充分内部化储能带来的互惠收益,导致投资激励不足。另一方面,储能投资随电力衰减系数 σ 增大而下降,因为更高的衰减意味着储能效率降低,使投资边际收益减弱。在此情况下,两种模式间的投资差距也逐渐缩小:当储能效率低时,各方的最优投资水平平均趋于较低值,集中与分散的边际激励差异不再显著。

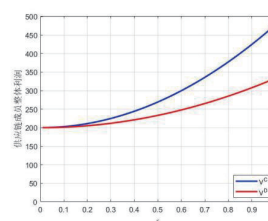


图4 电力质量偏好对利润的影响

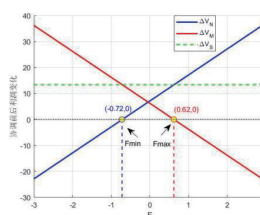


图5 契约协调前后均衡利润变化与转移支付 F 之间的关系

图 4 中随着用户电力质量敏感度的提高,终端用户对高质量电力的支付意愿增大,储能投资带来的边际收益显著增强,同时供应链上下游之间的协同效应进一步加强,从而使得发电商与售电商的利润皆呈现稳步上升的趋势。这一结果不仅说明了电力质量在可再生能源消纳中的重要性,也强调了在市场化机制下提升电力质量具有显著的经济激励效应。

5.3 “双向成本分担—转移支付”协调效果分析

从图 5 可以看出,当转移支付 $F = F_{\min} = -0.72$ 时,契约协调后发电商的长期均衡利润增量为零,即协调机制带来的全部利润提升均被售电商获得;而当 $F = F_{\max} = 0.62$ 时,售电商的长期均衡利润增量为零,供应链整体新增的利润全部由发电商获得。当 $F < -0.72$ 时,混合契约将导致发电商的长期均衡利润不增反降。出于自身收益最大化的考虑,发电商会拒绝接受此类契约;同理,当 $F > 0.62$ 时,售电商的利润将下降,因而也会拒绝参与协调。因此,只有当转移支付满足 $F \in [-0.72, 0.62]$ 时,发电商与售电商的长期均衡利润才能在分散式决策的基础上实现同步提升,契约才能顺利达成,从而实现供应链的完全协调。在实际运营中,转移支付 的具体取值通常需由发电商与售电商在谈判

中共同决定，其最终结果取决于双方的议价能力、市场地位以及对未来收益的预期。

6 结语

本文基于微分博弈构建了集中与分散决策模型，并设计了成本分担—转移支付契约，系统分析了不同模式下的储能投资、电力质量动态、成员策略及利润表现。数值算例验证了模型均衡的动态特征及关键参数影响。主要结论如下：

(1) 在储能投资的驱动下，电力质量能够持续改善初始阶段的供电不稳定问题，其动态轨迹呈现“快速上升—增速放缓—趋于稳态”的典型特征。初期储能的边际效应显著，系统的稳定能力迅速提升；随着时间推移，储能边际改善作用逐渐减弱，电力质量变化趋于平稳并最终达到动态均衡。这一演化规律表明，储能在平抑可再生能源出力波动、提升供电可靠性以及促进清洁能源高效消纳方面发挥着关键作用，是提升电力系统稳定性的核心技术手段。

(2) 集中决策模式由于以供应链整体利润最大化为目标，能够有效协调发电商与售电商之间的激励不一致问题，使储能投资水平更高、电力质量更优，从而实现供应链整体收益的最优。相比之下，分散决策模式下储能投资的正外部性无法被完全内部化，导致电力质量提升受限，供应链整体利润也明显低于集中决策情形。通过引入成本分担—转移支付协调契约，可以在一定条件下实现供应链协调。该契约机制能够有效内部化储能投资的正外部性，提升了供应链协同效率，实现发电商与售电商利润的帕累托改进。

(3) 企业在合作中应重视契约协调在提升储能投资效率和保障供电稳定性方面的核心作用，将储能定位为改善电力质量与增强绿色品牌价值的长期战略投入。此外，应进一步完善储能补偿机制、辅助服务收益体系以及可再生能源消纳激励政策，以强化储能投资的市场回报，促进电力供应链的协同发展与绿色转型。

参考文献：

- [1] 张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]．中国电机工程学报，2022,42(08):2806-2819.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
- [2] 何乐平．“双碳”目标背景下新能源在新型电力系统中的运用[J]．光源与照明，2024,(09):240-242.
- [3] 国家能源局．国家能源局组织发布《新型电力系统

发展蓝皮书》[EB/OL].(2023-06-02)[2024-03-04]. https://www.nea.gov.cn/2023-06/02/c_1310724249.htm.

[4] 徐进．电力行业 2024 年综述及 2025 年展望[J]．能源，2025,(03):48-54.

[5] 刘纯，李湃，张金平等．储能在新型电力系统电力电量平衡中的作用研究[J/OL]．电网技术，1-18[2025-04-07].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2070>.

[6] Sun Yushu, Zhao Zhenxing, Yang Min, et al. Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 160-173 (in Chinese).

[7] 王蓓蓓，胡维涵，牟玉亭等．储能对高比例新能源电力系统的容量价值贡献及机制思考[J]．电网技术，2024,48(6):2520-2531.

[8] 李建林，袁晓冬，郁正纲等．利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]．电力系统自动化，2019,43(8):15-24.

[9] 国家发展改革委，国家能源局．关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见 [EB/OL].(2024-08-27). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6912028.htm.

[10] Hensher D A, Shore N, Train K. Willingness to pay for residential electricity supply quality and reliability[J]. Applied energy, 2014, 115: 280-292.

[11] 马恒瑞，王波，高文忠等．区域综合能源系统中储能设备参与辅助服务的运行优化[J]．电力系统自动化，2019,43(8):34-40,68. DOI:10.7500/AEPS20180813007.

[12] CONLON T, WAITE M, MODI V. Assessing new transmission and energy storage in achieving increasing renewable generation targets in a regional grid[J]. Applied Energy, 2019, 250(Sep.15 Pt.1): 1085-1098. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.05.066.

[13] Liu J, Bao H. Research on interest coordination model of wind power supply chain with energy storage participation[J]. Journal of Energy Storage,2022,49:104107.

[14] 陈威，马永开，白春光．基于新型电力系统的储能设备投资决策[J]．系统管理学报，2024,33(05):1194-1203.

[15] Nerlove M, Arrow K J. Optimal advertising policy under dynamic conditions[J]. Economica, 1962: 129-142.