

双碳背景下考虑市场份额偏好的发电侧市场均衡分析

刘 鹏, 崔 雪

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:随着双碳目标的推进和电力市场化改革的深入,研究电力批发市场发电侧多主体博弈对提高清洁能源利用率具有现实意义。针对发电商市场地位不对称,提出了计及碳交易成本下考虑市场份额偏好的电力批发市场寡头古诺-伯川德混合博弈模型。对所建博弈模型进行数学推理和数值分析,给出了电力批发市场动态博弈的均衡特征数值和局部稳定域。最后,研究了碳排放系数、发电商水平差异性参数、市场份额偏好参数对市场均衡的影响。算例结果表明:随着发电商水平差异性减小,发电商市场利润大幅缩减,化石燃料发电商电能产量呈 U 型趋势;考虑市场份额偏好下,偏好利润的发电商将采取控制电能供应量、抬高批发市场电价的竞争策略,以最大限度追求利润最大化。

关 键 词:电力批发市场;双碳目标;古诺-伯川德混合博弈;市场份额偏好;均衡分析

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.002 中图分类号: TN919 文章编号: 1673-9140(2023)02-0009-09

Equilibrium analysis of power generation market considering market share preference un-der carbon-neutral goal

LIU Peng, CUI Xue

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the advancement of carbon-neutral goal and the deepening of electricity market reform, it is of practical significance to study multi-agent game on power generation side of electricity wholesale market to improve renewable energy permeability. Aiming at asymmetric market position, a Cournot-Bertrand hybrid game model considering market share preference with carbon transaction cost is established. Performing mathematical reasoning and numerical analysis, equilibrium characteristic value and local stability region are given. Finally, the influence of carbon emission coefficient, horizontal difference parameter and market share preference parameter on equilibrium is studied. Simulation examples show that with the decrease of horizontal difference parameter, market profits are significantly reduced, and electricity output of thermal power generation suppliers shows a U-shaped trend. Considering market share preference, profit-seeking power generation suppliers will take the competitive strategy of controlling power supply and raising electricity price to maximize profits.

Key words: electricity wholesale market; carbon-neutral goal; Cournot-Bertrand hybrid game; market share preference; equilibrium analysis

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61873194)

通信作者: 崔雪(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力市场研究; E-mail: xue_cui_whu@163.com

为达到“2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的双碳目标,绿色发展与高效发展将成为我国能源体系建设的未来方向^[1-2]。随着双碳目标的促进和新能源技术的发展,风电、光伏等新能源电站将会更多地接入电网^[3-4],对电力市场的运营和博弈产生显著影响。新一轮的电力体制改革正在加大力度推进,电力批发市场的竞争愈发激烈^[5-6],发电侧各厂商为最大化自身利润而形成相互竞争关系,从而引发发电侧多主体博弈问题。

文献[7]建立了传统火电企业和新能源发电企业的寡头古诺动态博弈模型,并分析了博弈模型的稳定性及其内在复杂性,但未考虑新能源企业和传统火电企业的不同市场地位。文献[8]建立了信息不对称下天真理性和有限理性电厂的双寡头动态博弈模型,考虑了传统能源发电厂和可再生能源电厂的信息不对称状态,但也未考虑寡头发电主体的市场地位问题。文献[9]考虑传统发电集团和微电网的市场地位不对称性,构建了寡头古诺—伯川德模型并给出了纳什均衡点和局部稳定域,但没有考虑寡头发电企业的市场份额偏好。

电力是中国碳排放最大的行业,占全国碳排放总量40%左右^[10],因此电力行业是实现双碳目标路径上的重点行业。2017年国家发展和改革委员会就发电行业的碳排放权市场建设工作发布通知,以稳步推进全国碳排放权交易市场建设,鼓励发电企业积极参与碳市场交易。现如今,碳交易市场已正式启动,重点碳排放企业必须考虑自身的碳排放成本问题。文献[11]分析了碳交易市场对电力行业的影响,并研究了可再生能源发电行业参与碳市场的制约和挑战。文献[12]分析了碳电一体化市场的特征,并构建了虚拟电厂同时参与碳交易和电力交易的碳电一体化交易策略模型。文献[13]在建立的综合能源系统日前市场中风电申报与市场出清双层规划模型中引入了碳交易以促进减排。

电力市场进一步深化改革正在加速进行,但由于电力行业的特殊性,垄断和竞争因素并存,电力市场仍属于寡头垄断市场范畴^[14-15]。目前电力批发市场有很多化石燃料发电商和清洁能源发电商共存,化石燃料发电商占据主要市场份额,清洁能源发电商受稳定性影响,市场份额相对化石燃料发电

商较小,但随着双碳目标的推进和能源转型的建设,清洁能源发电商的市场份额将逐步提升。

基于此,本文提出计及碳交易成本下考虑市场份额偏好的寡头电力批发市场古诺—伯川德动态博弈模型。其中,考虑到化石燃料发电商相对清洁能源发电商占据市场优势地位,化石燃料发电商以市场交易电量作为决策变量,清洁能源发电商以市场交易电价作为决策变量,依据有限理性准则构成发电侧批发市场古诺—伯川德动态博弈模型。对所建模型进行数学推理和数值分析,给出批发市场动态博弈的市场交易电量、市场交易电价等均衡特征数值以及局部稳定域,并研究碳排放系数、水平差异性参数以及市场份额偏好参数等关键参数对批发市场均衡的影响。

1 电力批发市场寡头博弈模型

市场交易架构如图1所示。化石燃料发电商和清洁能源发电商在电力批发市场供给侧提供电能,以满足电力批发市场需求侧的售电公司和大用户的负荷需求。此外,碳交易市场正式启动的背景下,化石燃料发电商受到碳配额的考核约束,需要承担一定的碳交易成本。

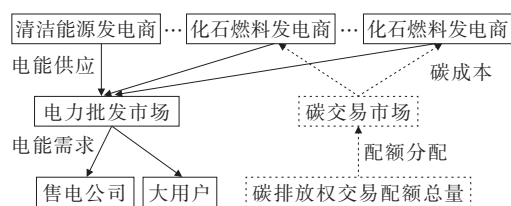


图1 市场交易架构

Figure 1 Schematic diagram of market transaction structure

寡头电力批发市场发电侧的博弈结果取决于化石燃料发电商和清洁能源发电商的市场策略、市场需求和企业成本,一般以单一的古诺模型或伯川德模型分析寡头发电商的动态博弈过程,但在两种经典模型中,发电商的市场地位是对等的,且在同一决策变量中竞争。但从理论上或真实情况而言,都不必如此要求。如果允许双寡头博弈中的发电商选择市场发电量或市场电价作为决策变量,则可能出现4种博弈模式,如图2所示。考虑到化石燃

料发电商与清洁能源发电商竞争地位不对等的情况,构建了发电商的寡头古诺—伯川德混合博弈模型,化石燃料发电商为古诺型发电商,处于优势地位,以市场发电量作为决策变量,清洁能源发电商为伯川德型发电商,处于劣势地位,以市场电价作为决策变量,为化石燃料发电商和清洁能源发电商的管理者在电力批发市场竞争中的决策提供参考。

		发电商 2	
		q	p
发电商 1	q	q_1, q_2 古诺	q_1, p_2 古诺—伯川德
	p	p_1, q_2 伯川德—古诺	p_1, p_2 伯川德

图 2 电力批发市场双寡头博弈模式
Figure 2 Duopoly game mode in electricity wholesale market

1.1 发电商的需求和成本模型

为简便起见,考虑两个发电商的博弈,假设某一发电区域有化石燃料发电商 T 和清洁能源发电商 R,化石燃料发电商 T 为古诺类型发电商,占据市场份额高,选择以市场发电量作为决策变量,发挥稳定批发市场职能,清洁能源发电商 R 为伯川德类型发电商,市场份额低,相对于化石燃料发电商 T 处于市场弱势地位,选择以市场电价作为决策变量,以求增强自身竞争力、提高市场份额,二者构成古诺—伯川德混合模型。电力批发市场中,用户效用函数的最大化决定发电商 T 和 R 的逆需求函数,设用户效用函数^[16-17]为

$$U(q_T, q_R) = a q_T + a q_R - \frac{1}{2} b (q_T^2 + 2z q_T q_R + q_R^2) \quad (1)$$

根据电力用户的电费预算约束 $p_T q_T + p_R q_R = L$, 可以求得发电商 T 和 R 的逆需求函数^[16-17]为

$$\begin{cases} p_T(t) = a - b q_T(t) - z b q_R(t) \\ p_R(t) = a - b q_R(t) - z b q_T(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 为电力用户的电费预算, q_T 和 q_R 分别为发电商 T 和 R 的市场发电量, p_T 和 p_R 分别为发电商 T 和 R 的市场电价, $z \in (0, 1)$ 表示化石燃料发电商 T 和清洁能源发电商 R 的发电差异性水平或发电可替代程度, z 越大, 发电商 T 和 R 的发电差异性水平

越小, 发电可替代程度越高, 当 $z=1$, 化石燃料发电商 T 和清洁能源发电商 R 所提供的发电服务是同质的。文中主要研究寡头竞争策略, 故假设发电商 T 和 R 具有如下形式的成本函数^[18]:

$$\begin{cases} C(q_T(t)) = \frac{1}{2} a_T q_T^2(t) + b_T q_T(t) + c_T \\ C(q_R(t)) = \frac{1}{2} a_R q_R^2(t) + b_R q_R(t) + c_R \end{cases} \quad (3)$$

同时, 可以将逆需求函数改写成关于决策变量 $q_T(t)$ 、 $p_R(t)$ 的形式:

$$\begin{cases} p_T(t) = (1-z)a + z p_R(t) - b(1-z^2)q_T(t) \\ q_R(t) = \frac{a}{b} - \frac{1}{b} p_R(t) - z q_T(t) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 计及碳交易成本的利润模型

双碳目标下, 化石燃料发电商的碳排放成本值得关注, 假设文中电力批发市场内政府分配给化石燃料发电商的碳排放权初始配额为 η , 单位碳排放权市场交易价格为 p_{ET} , 化石燃料发电商 T 在电能生产过程中会排放大量的二氧化碳, 设化石燃料发电商 T 的二氧化碳排放量和发电量呈线性关系:

$$E_T = \lambda q_T \quad (5)$$

式中, E_T 为化石燃料发电商 T 的碳排放量, λ 为化石燃料发电商 T 的碳排放系数, 由其发电技术特性所决定。则在考虑碳排放交易成本的情况下, 化石燃料发电商 T 的成本应该还包含碳排放成本:

$$C_{E,T} = \begin{cases} (E_T - \eta) p_{ET}, & E_T > \eta \\ -(\eta - E_T) p_{ET}, & E_T \leq \eta \end{cases} \quad (6)$$

当 $E_T \leq \eta$, 即化石燃料发电商 T 的碳配额还未完全用完, 则 T 可以通过出售多余碳排放配额获得利润; 当 $E_T > \eta$, 即发电商过量碳排放导致碳配额不足, 则 T 需要付出购买相应的超量碳排放配额的成本。而清洁能源发电商 R 通过光伏发电、风力发电等清洁能源生产电能, 几乎不产生碳排放, 同时在现阶段碳配额交易市场中, 清洁能源企业也未纳入配额管理体系中, 因此 R 不考虑碳交易成本。

计及碳交易成本情况下, 化石燃料发电商 T 和清洁能源发电商 R 的利润可以表示为

$$\begin{cases} \pi_T(t) = q_T(t) p_T(t) - C(q_T(t)) - C_{E,T} \\ \pi_R(t) = q_R(t) p_R(t) - C(q_R(t)) \end{cases} \quad (7)$$

将式(3)–(6)代入即可得到:

$$\begin{cases} \pi_T(t) = q_T(t) \left((1-z)a + zp_R(t) - b(1-z^2) \cdot \right. \\ \quad \left. q_T(t) \right) - C(q_T(t)) - (\lambda q_T - \eta) p_{ET} \\ \pi_R(t) = p_R(t) \left(\frac{a}{b} - \frac{1}{b} p_R(t) - zq_T(t) \right) - C(q_R(t)) \end{cases} \quad (8)$$

2 考虑市场份额偏好的电力批发市场动态博弈

2.1 考虑市场份额偏好的动态博弈模型

多数电力市场寡头博弈以利润最大化为目标,但市场份额是发电商追求长期利润目标时需要考虑的因素,因此部分发电商在做出最优决策时会兼顾考虑利润目标和市场份额,例如清洁能源发电商,在前期市场份额较低时,需要在考虑利润的同时最大化压低市场电价以获得市场份额。

寡头电力批发市场中,作为市场地位处于弱势的清洁能源发电商R会更加关注市场份额,而本就处于市场领先地位的化石燃料发电商T会更加注重发电利润。为了描述发电商对市场份额的偏好现象,采用下列效用函数:

$$u_i(t) = w_i \pi_i(t) + (1 - w_i) y_i(t), i = T, R \quad (9)$$

式中, $u_i(t)$ 表示考虑市场份额偏好下的发电商效用,参数 $w_i \in (0, 1)$ 表示发电商对市场份额和利润的偏好程度, $y_i(t)$ 为发电商的市场份额,可表示为

$$y_i(t) = \frac{x_i(t)}{x_T(t) + x_R(t)}, i = T, R \quad (10)$$

其中,

$$x_i(t) = p_i(t) q_i(t), i = T, R \quad (11)$$

$x_i(t)$ 为发电商的售电收入,可以发现:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_i} = \frac{\sum_{j \in T, R} x_j - x_i}{(x_T + x_R)^2} > 0, i = T, R \quad (12)$$

即发电商的发电收入和市场份额的变化趋势一致,为了简化计算,用发电收入替代市场份额进行计算。假定化石燃料发电商T和清洁能源发电商R都是有限理性博弈参与者,即当其边际效用为正时,发电商T会增加下一时段的市场发电量,而发电商R会提高下一时段的市场电价,当边际效用为负时则反之。因此,发电商T和R的古诺—伯川

德动态博弈模型可表示为

$$\begin{cases} q_T(t+1) = q_T(t) + \alpha q_T(t) \frac{\partial u_T(t)}{\partial q_T(t)} \\ p_R(t+1) = p_R(t) + \beta p_R(t) \frac{\partial u_R(t)}{\partial p_R(t)} \end{cases} \quad (13)$$

将式(8)和式(9)代入式(13)中得到化简后的批发市场博弈模型:

$$\begin{cases} q_T(t+1) = q_T(t) + \alpha q_T(t) \cdot (a - az - w_T b_T - \\ \quad w_T \lambda p_{ET} + zp_R(t) - (2b - 2bz^2 + \\ \quad w_T a_T) q_T(t)) \\ p_R(t+1) = p_R(t) + \beta p_R(t) \cdot \left(\frac{a + w_R b_R}{b} + \right. \\ \quad \left. \frac{w_R a_R a}{b^2} - \left(\frac{2}{b} + \frac{w_R a_R}{b^2} \right) p_R(t) - \right. \\ \quad \left. z \left(1 + \frac{w_R a_R}{b} \right) q_T(t) \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中, α 为化石燃料发电商T市场发电量的产量调整参数, β 为清洁能源发电商R市场电价的价格调整参数,式(14)表示发电商T和R的非线性动态博弈模型,寡头发电商将根据考虑市场份额偏好的前一时期边际效用来调整当前的决策。

2.2 博弈模型局部稳定性分析

令 $q_T(t+1) = q_T(t)$ 和 $p_R(t+1) = p_R(t)$, 可以求得动态博弈系统的4个不动点:

$$E_0 = (0, 0) \quad (15)$$

$$E_1 = \left(0, \frac{A_1}{2b + w_R a_R} \right) \quad (16)$$

$$E_2 = \left(\frac{A_2}{B_2}, 0 \right) \quad (17)$$

$$E^* =$$

$$\left(\frac{zA_1 + (2b + w_R a_R) A_2}{z^2 b (b + w_R a_R) + (2b + w_R a_R) B_2}, \frac{B_2 q_T^* - A_2}{z} \right) \quad (18)$$

式中, $A_1 = ab + w_R b_R b + w_R a_R a$, $A_2 = a - az - w_T b_T - w_T \lambda p_{ET}$, $B_2 = 2b - 2bz^2 + w_T a_T$, 为了研究均衡点的稳定性,需要列出式(14)所表示博弈系统对应的雅可比矩阵,用 j_{mn} 表示雅可比矩阵的第 m 行第 n 列的元素,则式(14)系统雅可比矩阵的计算方法为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_T(t+1)}{\partial q_T(t)} & \frac{\partial q_T(t+1)}{\partial p_R(t)} \\ \frac{\partial p_R(t+1)}{\partial q_T(t)} & \frac{\partial p_R(t+1)}{\partial p_R(t)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中,

$$j_{11} = 1 + \alpha \left(\frac{a - az - w_T b_T - w_T \lambda p_{ET} + z p_R(t) -}{2(2b - 2bz^2 + w_T a_T) q_T(t)} \right) \quad (20)$$

$$j_{12} = \alpha z q_T(t) \quad (21)$$

$$j_{21} = - \left(1 + \frac{w_R a_R}{b} \right) \beta z p_R(t) \quad (22)$$

$$j_{22} = 1 + \beta \left(\frac{a + w_R b_R + \frac{w_R a_R a}{b^2} - 2 \left(\frac{2}{b} + \frac{w_R a_R}{b^2} \right) \cdot}{p_R(t) - z \left(1 + \frac{w_R a_R}{b} \right) q_T(t)} \right) \quad (23)$$

平衡点的稳定性将由在相应的平衡点处对应的雅可比矩阵的特征值决定,易判断包含 0 元素的边界不动点 E_0, E_1, E_2 是不稳定的平衡点。但从市场博弈角度,保证平衡点的数值非负才有实际意义,即只有 $E^* = (q_T^*, p_R^*)$ 为该动态博弈模型的纳什均衡点,文中也更加关注其性质。通过计算式(14)所示博弈系统的雅可比矩阵的特征值,可以判断其平衡点的稳定性,但相对于 E_0, E_1, E_2 而言, E^* 的表达式更为复杂,很难通过直接求取特征值的方法判断稳定性,此时可以通过 Jury 条件来判断雅可比矩阵特征值是否落在单位圆内,进而确定平衡点的稳定性,故采用 Jury 条件判断 E^* 的稳定性:

$$\begin{cases} 1 + \det(J) - \text{tr}(J) > 0 \\ 1 + \det(J) + \text{tr}(J) > 0 \\ \det(J) - 1 < 0 \end{cases} \quad (24)$$

将 q_T^* 和 p_R^* 代入系统雅可比矩阵可求得 $J(E^*)$ 的迹 $\text{tr}(E^*)$ 和行列式 $\det(E^*)$ 分别为

$$\begin{aligned} \text{tr}(E^*) = & \\ & \left[2 + \alpha \left(\frac{a - az - w_T b_T - w_T \lambda p_{ET} +}{z p_R^* + 2(2b - 2bz^2 + w_T a_T) q_T^*} \right) + \right. \\ & \left. \beta \left(\frac{a + w_R b_R + \frac{w_R a_R a}{b^2} - 2 \left(\frac{2}{b} + \frac{w_R a_R}{b^2} \right) \cdot}{p_R^* - z \left(1 + \frac{w_R a_R}{b} \right) q_T^*} \right) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \det(E^*) = & \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{a - az - w_T b_T - w_T \lambda p_{ET} +}{z p_R^* + 2(2b - 2bz^2 + w_T a_T) q_T^*} \right) \right\} \cdot \\ & \left\{ 1 + \beta \left(\frac{a + w_R b_R + \frac{w_R a_R a}{b^2} - 2 \left(\frac{2}{b} + \frac{w_R a_R}{b^2} \right) \cdot}{p_R^* - z \left(1 + \frac{w_R a_R}{b} \right) q_T^*} \right) \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

将迹 $\text{tr}(E^*)$ 和行列式 $\det(E^*)$ 代入 Jury 条件,即可求得批发市场动态博弈模型在纳什均衡点的局部稳定域。需要说明的是,根据式(24)、式(25)和式(26)可知,模型中的成本函数系数、市场份额偏好参数等系数的设置不同,博弈模型的局部稳定域求解结果也将发生变化,即动态博弈模型的局部稳定域与博弈模型所设置的条件相关。

3 算例分析

3.1 批发市场寡头博弈的局部稳定域分析

假设 $a=100$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h})$, $b=0.5$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h}^2)$, $a_T=0.015$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h}^2)$, $b_T=22$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h})$, $c_T=0$, $a_R=0.025$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h}^2)$, $b_R=35$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h})$, $c_R=0$, $\eta=35$ t, $p_{ET}=5$ $\$/\text{t}$ 。当 $\lambda=0.65$, 取 $z=0.5$, $w_T=0.7$, $w_R=0.3$, 将数值代入式(24)–(26)中求得关于市场发电量调整参数 α 和市场电价调整参数 β 的电力批发市场动态博弈模型的局部稳定域,如图 3 所示。

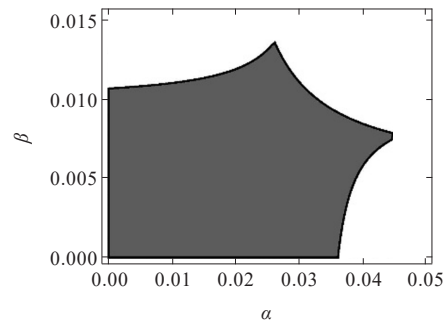


图 3 $z=0.5$ 时的局部稳定域

Figure 3 Local stability region when $z=0.5$

如果一组调整参数 (α, β) 的数值落入稳定域中,即图 3 中阴影部分,发电商 R 和 T 在经过一系列批发市场博弈后,电力批发市场会趋于局部稳定,反之,则批发市场动态博弈会发生分岔,并最终陷入混沌状态。从图 3 可以看出,当 β 接近于 0,即使 α

数值超过0.03,博弈均衡依然能保持稳定,说明市场动态博弈的局部稳定性对清洁能源发电商R的价格调整更为敏感,即批发市场在古诺—伯川德混合博弈模型下对市场价格变动更为敏感。

保持其他系统参数不变,得到发电商发电差异性水平 z 变化时市场动态博弈局部稳定域变化的三维展示图,如图4所示。 z 越接近1,表明发电商T和R之间的发电差异性越小或发电可替代性越高,可以看出,随着 z 从0到1的增大,即发电商T和R水平差异性的减小,此时发电商T和R在批发市场上动态博弈的关于市场发电量调整参数 α 和市场电价调整参数 β 的局部稳定域也显著增大,这意味着寡头发电商将有更大的决策空间。但对于在市场竞争中处于弱势方的伯川德型清洁能源发电商R来说,具有传统优势的化石燃料发电商T拥有更大的决策空间不利于其与T的市场竞争,因此发电商R在与T的市场博弈中应追求增大与发电商T的水平差异性,提升自身市场竞争力。

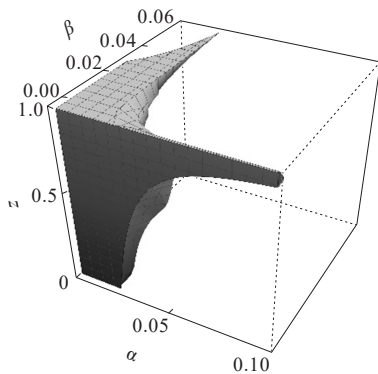


图4 z 变化时的局部稳定域

Figure 4 Local stable region with different levels of z

保持其他参数不变,图5给出了当化石燃料发电商T的市场份额偏好参数 w_T 从0到1变化时,批发市场上动态博弈的局部稳定域变化的三维图。 w_T 越大,代表T越偏好于利润,而不是市场份额。从图5可以看出,随着 w_T 的增大,批发市场动态博弈的局部稳定域也增大,化石燃料发电商T所能获得的决策空间也随着 w_T 的增大而增大。作为古诺型的化石燃料发电商T,在其处于市场竞争的优势方时追求利润最大化有利于稳定市场。

类似地,图6给出了当清洁能源发电商R的市场份额偏好参数 w_R 从0到1变化时,批发市场上动

态博弈的局部稳定域变化的三维图。随着 w_R 的增大,出现了与图5中相反的结果,批发市场动态博弈的局部稳定域在减小。这意味着如果伯川德型发电商R和古诺型发电商T一样在市场决策时偏好于利润,那么R所能获得的决策空间将随着 w_R 的增大而减小,从而不利于其在电力批发市场中与发电商T的竞争。作为伯川德型的发电商R,在其处于市场竞争的弱势方时过度追求利润最大化将不利于市场稳定。

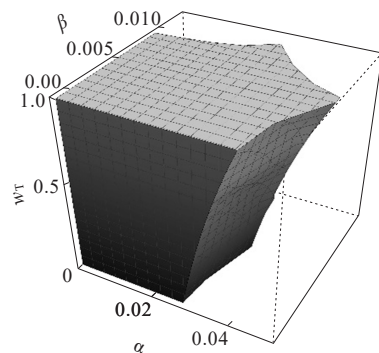


图5 w_T 变化时的局部稳定域

Figure 5 Local stable region with different levels of w_T

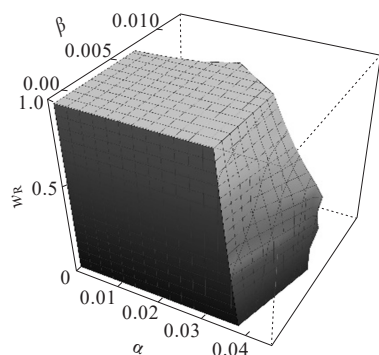


图6 w_R 变化时的局部稳定域

Figure 6 Local stable region with different levels of w_R

3.2 寡头批发市场均衡分析

图7展示了化石燃料发电商T的碳排放系数 λ 和发电商的水平差异性参数 z 变化时,批发市场均衡点发电商的交易电量情况。图8展示了 λ 和 z 变化时,批发市场均衡点发电商的交易电价情况,而图9展示了发电商的利润变化情况。

当发电商T的碳排放系数 λ 由0.05升至0.95时,均衡状态时化石燃料发电商T的交易电量从75.6 MW·h降至71.7 MW·h,这说明碳排放强度

的提高不利于化石燃料发电商 T 的市场竞争,同时,清洁能源发电商 R 的均衡状态交易电量从 70.1 MW·h 提至 71.1 MW·h,这得益于高碳排放水平对化石燃料发电商 T 的竞争力削弱。此时化石燃料发电商 T 的交易电价从 44.7 \$(/MW·h) 提至 46.4 \$(/MW·h),清洁能源发电商 R 的交易电价从 46.1 \$(/MW·h) 提至 46.6 \$(/MW·h),可见在化石燃料发电商 T 的碳排放水平提高的背景下,发电商 T 和 R 都有为了利润最大化而提高电价的动机。化石燃料发电商 T 提高电价后以售电收入增量覆盖部分碳交易成本,但是其利润仍从 1 828.5 \$ 降至 1 544.2 \$;随着化石燃料发电商 T 竞争力的减弱,清洁能源发电商 R 趁机提高电价后其利润也从 714.3\$ 提高至 757.4 \$,实现了自身的利润最大化。可见,碳交易市场背景下,化石燃料发电商 T 的碳交易成本会影响其在电能量市场的竞争力,高碳排放强度发电商将承担更高的碳交易成本。

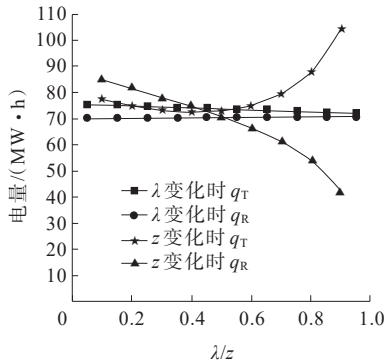


图 7 关键参数 λ、z 变化对发电商交易电量的影响

Figure 7 Influence of key parameters λ and z on transacted electricity quantity of power generation suppliers

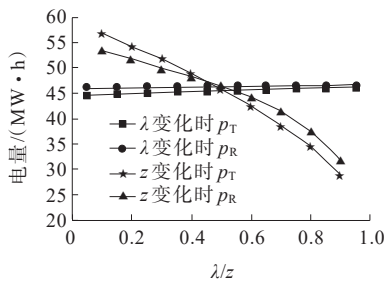


图 8 关键参数 λ、z 变化对发电商交易电价的影响

Figure 8 Influence of key parameters λ and z on transacted electricity price of power generation suppliers

当化石燃料发电商与清洁能源发电商之间的水平差异性参数 z 从 0 升至 1 时,均衡状态时化石燃

料发电商 T 的交易电量先减少后增加。当 z=0 时,化石燃料发电商 T 的交易电量为 77.6 MW·h,当 z 增大到 0.4 时,交易电量减少到 72.4 MW·h,而当 z 继续增大到 1 时,交易电量则增加到 104.7 MW·h;与此同时,当 z 从 0 增大到 1 时,清洁能源发电商 R 的交易电量从 85 MW·h 减少到 42.1 MW·h。

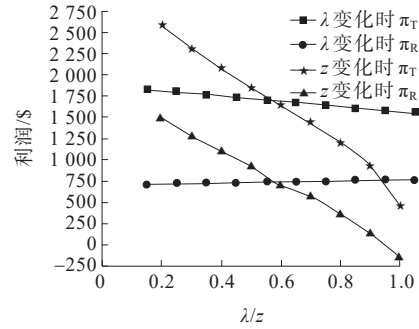


图 9 关键参数 λ、z 变化对发电商利润的影响

Figure 9 Influence of key parameters λ and z on profit of power generation suppliers

与此同时,当 z 从 0 增大到 0.4 时,化石燃料发电商 T 的交易电价从 56.9 \$(/MW·h) 降至 48.9 \$(/MW·h),清洁能源发电商 R 的交易电价从 53.6 \$(/MW·h) 降至 48.3 \$(/MW·h),化石燃料发电商 T 的交易电价要比清洁能源发电商 R 的交易电价高,这说明在 z 小于 0.5 时,仍有一定的水平差异性,占据市场优势地位的化石燃料发电商 T 的电价水平整体仍要高于清洁能源发电商 R,因此为了保持利润最大化,化石燃料发电商 T 会减少电能产量。

当 z 从 0.5 增大到 1 时,化石燃料发电商 T 的交易电价从 45.8 \$(/MW·h) 降至 28.7 \$(/MW·h),清洁能源发电商 R 的交易电价从 46.4 \$(/MW·h) 降至 31.9 \$(/MW·h),化石燃料发电商 T 的交易电价要比清洁能源发电商 R 高,这说明随着 z 大于 0.5,发电商 T 和 R 的发电可替代程度越来越高,在清洁能源发电商 R 的降价策略下,T 不得不降低其交易价格并大幅提高电能产量以维持自身利润最大,所以化石燃料发电商 T 的电能产量呈 U 型趋势。

随着 z 的逐渐增大,发电商 T 和 R 的利润都逐渐减少,T 的利润由 2 589.4 \$ 降至 456.1 \$,R 的利润由 1 492.7 \$ 降至 -154.6 \$,可见,随着 z 的逐渐增大,发电商 T 和 R 的发电服务水平差异性减少,趋于同质化,二者的可替代程度高,发电商的利润空间也在不断减小。整体来看,随着可替代程度的

增强,发电商的利润水平都是在大幅下降的,因此批发市场中发电商应致力于增大与竞争对手的水平差异性,以增强竞争力,提高市场利润。

图10展示了化石燃料发电商T的市场份额偏好参数 w_T 和清洁能源发电商R的市场份额偏好参数 w_R 变化时,批发市场均衡点发电商的交易电量情况。图11展示了 w_T 和 w_R 变化时,批发市场均衡点发电商的交易电价情况,而图12展示了发电商的利润变化情况。

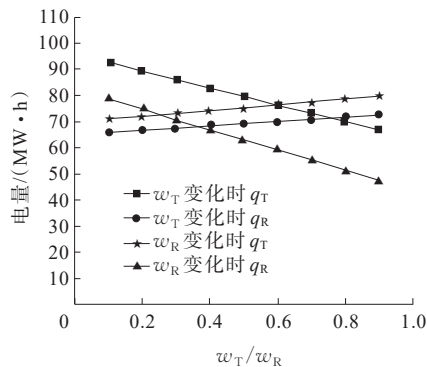


图10 关键参数 w_T 、 w_R 变化对发电商交易电量的影响
Figure 10 Influence of key parameters w_T and w_R on transacted electricity quantity of power generation suppliers

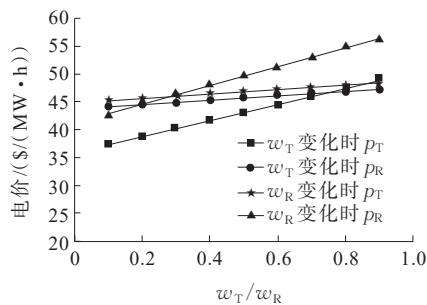


图11 关键参数 w_T 、 w_R 变化对发电商交易电价的影响
Figure 11 Influence of key parameters w_T and w_R on transacted electricity price of power generation suppliers

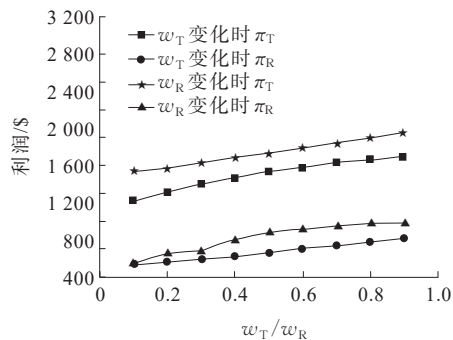


图12 关键参数 w_T 、 w_R 变化对发电商利润的影响
Figure 12 Influence of key parameters w_T and w_R on profit of power generation suppliers

当化石燃料发电商T的市场份额偏好参数 w_T 由0.1升至0.9时,发电商T的交易电量由92.4 MW·h降至66.6 MW·h,交易电价也从37.3 \$/(MW·h)升至48.6 \$/(MW·h),发电商为了提高利润,开始降低电能产量,抬高成交电价,其利润也从1 226.2 \$提升至1 698.2 \$。与此同时,清洁能源发电商R的交易电价和交易电量都有所增加,交易电价从43.9 \$/(MW·h)提高至47.2 \$/(MW·h),交易电量从65.9 MW·h提高至72.3 MW·h,其利润从535.3 \$提升至816.2 \$,清洁能源发电商R的交易电价提升源于化石燃料发电商T的降低电能供应量策略。在对利润的偏好下,发电商T通过控制自身电能产量,最大限度提升了利润水平,但同时也抬高了批发市场的整体成交价格水平。

当清洁能源发电商R的市场份额偏好参数 w_R 由0.1升至0.9时,发电商R的交易电量由78.6 MW·h降至47.5 MW·h,交易电价从43 \$/(MW·h)升至56.3 \$/(MW·h),其利润也从551.7 \$提升至986.4 \$。与此同时,化石燃料发电商T的交易电价和交易电量也都有所增加。可见,当清洁能源发电商R偏好于利润时,也会采取和化石燃料发电商T类似的抬高市场价、降低供应链的利润追求策略,最终发电商的利润水平变化也符合其对利润的偏好。

4 结语

基于化石燃料发电商和清洁能源发电商的市场地位差异,考虑发电商的市场份额偏好,建立了计及碳交易成本下电力批发市场的有限理性双寡头古诺—伯川德混合动态博弈模型,研究了寡头批发市场均衡时不同关键参数对交易电量、交易电价、利润以及博弈稳定性的影响,通过数学论证和算例分析得出以下结论:①本文建立了一个计及碳交易成本下考虑市场份额偏好的电力批发市场寡头古诺—伯川德混合博弈模型,可用于研究电力批发市场中发电商的策略性行为及相互影响关系;②电力批发市场在古诺—伯川德混合博弈模型下对市场价格变动更为敏感,伯川德型发电商过度追求利润最大化可能会引起价格战,不利于市场稳定;③随着发电商水平差异性的减小,发电商之间的可替代

程度增大,其市场利润也大幅缩减,批发市场中发电商应致力于增大与竞争对手的水平差异性,以增强竞争力,提高市场利润;④碳交易背景下,化石燃料发电商的碳排放系数会影响其市场竞争力和市场利润,高碳排放强度发电商将承担更高的碳交易成本,化石燃料发电商应重视提升自身碳排放效率以降低碳交易成本;⑤考虑市场份额偏好,偏好利润的发电商将控制自身供应电量,抬高批发市场交易电价,最大限度追求利润最大化,而偏好市场份额的发电商将给出较低的市场交易电价,压缩部分利润空间以提高市场份额,从而保证长期的市场竞争力和盈利水平。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[N]. 国家电网报,2021-03-02.
State Grid Corporation of China.State Grid Corporation of China issued the action plan of “carbon peak, carbon neutrality”[N].State Grid News,2021-03-02.
- [2] 白宏坤,尹硕,李虎军,等. 计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(1):11-19.
BAI Hongkun,YIN Shuo,LI Hujun,et al.Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(1):11-19.
- [3] 陈艺华,张炜,张成刚,等. 新型电力系统中促进新能源消纳的电力现货市场交易机制研究[J]. 智慧电力,2022,50(2):97-104.
CHEN Yihua, ZHANG Wei, ZHANG Chenggang, et al. Electricity spot market trading mechanism for promoting renewable energy integration in new power system[J]. Smart Power,2022,50(2):97-104.
- [4] LISERRE M, SAUTER T, HUNG J Y. Future energy systems: integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2010,4(1):18-37.
- [5] 国雪健,李思远,朱秋萍,等. 基于均衡模型的寡头电力市场容量机制研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(24):121-131.
GUO Xuejian, LI Siyuan, ZHU Qiuping, et al. Capacity mechanisms of the oligopoly electricity market based on an equilibrium model[J]. Power System Protection and Control,2021,49(24):121-131.
- [6] 莫志宏,蔡文翔. 我国电力市场化改革理论研究进展及前景展望[J]. 价格理论与实践,2020(5):110-112+175.
MO Zhihong, CAI Wenxiang. Current status and development of research on power market reform theory in China[J]. Price: Theory & Practice,2020(5):110-112+175.
- [7] MA J, TU H. Complexity of a duopoly game in the electricity market with delayed bounded rationality[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society,2012,2012.
- [8] LIU Y, SUN M. Application of duopoly multi-periodical game with bounded rationality in power supply market based on information asymmetry[J]. Applied Mathematical Modelling,2020,87:300-316.
- [9] 段声志,陈皓勇,郑晓东,等. 碳市场背景下发电商竞价策略及电力市场均衡分析[J]. 电测与仪表,2022,59(5):33-41.
DUAN Shengzhi, CHEN Haoyong, ZHENG Xiaodong, et al. Bidding strategy of electricity generation and electricity market equilibrium analysis under the background of carbon market[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(5):33-41.
- [10] 叶春. 碳中和目标下的“十四五”煤电转型与重构[J]. 中国电力企业管理,2021(7):17-21.
YE Chun. Coal power transformation and reconstruction under of 14th Five-Year Plan under the goal of carbon neutrality [J]. China Power Enterprise Management, 2021 (7):17-21.
- [11] 武群丽,席曼. 基于电力供应链博弈的可再生能源政策效应研究[J]. 中国电力,2022,55(5):12-20,38.
WU Qunli, XI Man. Research on effects of renewable energy policy based on power supply chain game[J]. Electric Power,2022,55(5):12-20,38.
- [12] 贾德香,柳占杰,高骞,等. 计及碳—电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(2):89-97.
JIA Dexiang, LIU Zhanjie, GAO Qian, et al. Bidding strategy of the virtual power plant based on the consideration of carbon-electricity integration trading in auxiliary service market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(2):89-97.
- [13] 韩照洋,周琳,刘硕,等. 考虑不确定性的综合能源系统日前市场申报策略[J]. 电力建设,2021,42(4):121-131.
HAN Zhaoyang, ZHOU Lin, LIU Shuo, et al. Day-ahead market offering strategy in integrated energy system considering uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2021,42(4):121-131.
- [14] GUO H, CHEN Q, ZHANG Y, et al. Constraining the oligopoly manipulation in electricity market: A vertical integration perspective[J]. Energy,2020,194:116877.

- circuit breaker[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(4): 7-11.
- [7] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [8] 余占清,曾嵘,屈鲁,等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.
- [9] HAFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids[C]// CIGRE Session, Bologna, Italy, 2011.
- [10] 张悻宁,罗易萍,洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的LCC-VSC混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.
ZHANG Yining, LUO Yiping, HONG Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.
- [11] 魏晓光,周万迪,张升,等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2038-2047.
WEI Xiaoguang, ZHOU Wandi, ZHANG Sheng, et al. Research and application of modular hybrid HVDC circuit breaker[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineer, 2020, 40(6): 2038-2047.
- [12] 程显,闫冬冬,葛国伟,等. 基于耦合电抗器的阻容型混合直流断路器拓扑结构研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 818-827.
CHENG Xian, YAN Dongdong, GE Guowei, et al. Research on the topology of the resistance-capacitance hybrid DC circuit breaker with coupling reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 818-827.
- [13] 陈羽,石巍,杨兵,等. 混合式高压直流断路器控制保护系统[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 164-170+199.
CHEN Yu, SHI Wei, YANG Bing, et al. Hybrid HVDC circuit breaker control and protection system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 164-170+199.
- [14] DAVIDSON C C, WHITEHOUSE R S, BARKER C D. A new ultra-fast HVDC circuit breaker for meshed DC networks[C]// 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham: IET, 2015.
- [15] 熊迪,谭亲跃,丁月明,等. 一种高压限流混合式直流断路器拓扑及参数优化研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 37-44.
XIONG Di, TAN Qinyue, DING Yueming, et al. Study on topology and parameter optimization of high voltage current limiting hybrid DC breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 37-44.

(上接第17页 = Continued from page 17)

- [15] 张衡,张沈习,程浩忠,等. Stackelberg博弈在电力市场中的应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3250-3262.
ZHANG Heng, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. A state-of-the-art review on stackelberg game and its applications in power market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3250-3262.
- [16] FANTI L, GORI L. The dynamics of a differentiated duopoly with quantity competition[J]. Economic Modelling, 2012, 29(2): 421-427.
- [17] 丁毅宏,檀勤良,郑锦,等. 市场交易下电力联合外送多主体利益分配优化[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(11): 31-38+46.
DING Yihong, TAN Qinliang, ZHENG Jin, et al. Optimization of multi-agent benefit distribution of power combined transmission under market transaction[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(11): 31-38+46.
- [18] 安学娜,张少华,李雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 84-89.
AN Xuena, ZHANG Shaohua, LI Xue. Equilibrium analysis of oligopolistic electricity markets considering tradable green certificates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 84-89.