

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190763

基于多群体协同进化的电力市场均衡模型

刘雨梦, 陈皓勇, 黄龙, 林镇佳, 陈思敏

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 可再生能源配额制及绿证制度作为一种新型的市场交易政策, 能够极大地促进新能源的消纳。考虑配额制及绿证制度引入后, 电力批发市场和绿证交易市场存在耦合的影响关系, 市场中发电商存在相互博弈行为。基于电力市场均衡策略, 建立了两个市场协同下的多寡头非合作博弈模型。在电力批发市场中, 发电商以古诺形式参与市场竞争。在绿证市场中, 绿电商以供给函数形式进行绿证竞争。针对博弈模型, 采用多群体协同进化算法对纳什均衡点进行求解, 重点对两种市场交互下的发电商策略性行为进行分析。仿真结果表明了模型的有效性 & 算法的可行性。

关键词: 可再生能源配额制; 绿证制度; 古诺形式; 多群体协同进化; 纳什均衡

Equilibrium model of electricity market based on multi-swarm co-evolution

LIU Yumeng, CHEN Haoyong, HUANG Long, LIN Zhenjia, CHEN Simin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: As a kind of new market trading policy, Renewable Portfolio Standard (RPS) and Tradable Green Certification (TGC) can greatly promote the consumption of renewable energy. Considering the introduction of RPS and TGC, there is a coupling relationship between the wholesale electricity market and the green certificate market, and there are game behaviors among the power producers in the market. Based on the equilibrium strategy of the electricity market, a multi-oligarch non-cooperative game model under the coordination of two markets is established. In the wholesale electricity market, power suppliers participate in market competition in the form of the Cournot model. In the green certificate market, renewable firms compete in the form of a supply function model. For the game model, the Nash equilibrium is solved by a multi-swarm co-evolutionary algorithm, and the strategic behavior of power suppliers under the interaction of two markets is analyzed. The results of simulation show the validity of the model and the feasibility of the algorithm.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018py11).

Key words: renewable portfolio standard; tradable green certification; Cournot model; multi-swarm co-evolution; Nash equilibrium

0 引言

近年来, 能源问题日益受到世界各国的关注, 发展清洁能源、促进可再生能源的消纳对于建设环境友好型社会有着重要的意义^[1-3]。早在 2005 年, 中国就颁布了“可再生能源法”, 随后制定了一系列有关可再生能源的规范性文件。自“十三五规划”以来, 中国大力推动可再生能源发展, 着力聚焦于市场机制设计及政策对市场主体的实施效果^[4-5]。此外, 还有不少学者在可再生能源发电与并网方面做

出了研究, 文献[6]研究了微电网提升可再生能源利用率的建设模式, 文献[7]研究了不同情境下提升水电消纳能力的外送方法, 文献[8]研究了可再生能源发电的定容选址问题。

为支持可再生能源的发展, 中国最早实行的是可再生能源强制上网和固定电价制度^[9]。固定电价制度在市场早期对可再生能源起到了一定程度的扶持作用, 但随着市场的进一步成熟, 其无法在根源上解决可再生能源的消纳问题。随着近几年可再生能源成本的逐步下降, 政府及社会积极鼓励可再生能源商参与电力市场竞争, 采用更为适应当前市场环境的可再生能源配额制(Renewable Portfolio

Standard, RPS)成为了一致共识^[10-11]。

可再生能源配额制要求市场参与者必须具备相应的可再生能源发电份额, 通常与绿色证书交易(Tradable Green Certification, TGC)机制相配套^[12]。可再生能源配额制作为一种激励政策, 从承担配额义务的对象来看, 可以在发电侧进行, 也可以在用户侧进行。可以看出, 在市场机制中引入可再生能源配额制, 势必会对市场各主体的决策产生影响。

电力市场具有寡头竞争的特点, 引入 RPS 和 TGC 机制后, 电力批发市场和绿证交易市场将会产生复杂的耦合关系。其中, 绿电商在绿证交易市场的决策行为会对批发市场的竞争行为产生影响, 发电商在批发市场的博弈行为又会进一步影响绿证市场的交易^[13]。因此, 研究两种市场协同模式下的发电商决策行为, 对于分析市场竞争环境和改进市场机制有着重要的作用。

发电商在电力市场中的竞争行为通常是一个多寡头博弈模型, 为深入研究电力市场中的不完全竞争现象, 许多基于 Nash 均衡的电力市场均衡模型被提了出来^[14-15]。文献[16]基于竞价机制理论建立了各发电主体竞价均衡模型, 解决了发电主体的利益分配问题。文献[17]建立了考虑传输约束的风力发电商的古诺竞争模型。文献[18]考虑了双寡头竞争环境下的企业碳排放决策行为。文献[19]针对排污权市场, 利用改进的 Bertrand 模型进行了研究。当前关于可再生能源环境下的发电商策略行为研究还较为匮乏, 没有综合考虑到发电商在多个市场的博弈行为。文献[20]在火电商和可再生能源发电商竞争的寡头市场下, 分析了火电商的策略问题, 但没有考虑到配额的约束。文献[21]利用古诺模型研究了绿色证书交易机制下的市场交易价格和波动程度, 但未考虑绿证市场和批发市场的协同关系。

电力市场均衡的求解, 是一个传统的具有均衡约束的均衡问题(Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints, EPEC), 国内外学者对此类市场均衡求解做了诸多研究。文献[22-23]利用 KKT 条件将发电商的优化问题转化为一组非线性互补方程组, 但求解过程相对较复杂。文献[24]利用多智能体仿真模型建立了物流模型的协同效应问题, 但模型存在无法收敛到纳什均衡点的情况。文献[25]构建了 Berge-NS 均衡模型, 利用磷虾算法求解多主体非合作博弈的均衡解。近年来, 群体智能算法作为一类人工智能, 逐渐在电力系统领域崭露头角^[26-29], 因此本文提出了一种多群体协同进化算法来求解纳什均衡。

综合以上考虑, 本文从发电侧出发, 从市场协

同层面建立了电力批发市场和绿证市场均衡模型问题, 从发电商的角度模拟了两个市场环境下各主体的发电博弈行为。针对均衡问题的求解, 本文利用多群体协同进化算法来求解纳什均衡, 通过最优适应度函数来评判发电商的策略组合是否达到市场均衡, 重点研究了可再生能源配额制对两个市场的交互影响以及发电商的策略竞争行为, 仿真结果验证了模型及多群体协同进化算法的有效性。

1 市场模型

本文考虑可再生能源配额制下, 电力批发市场和绿证交易市场存在相互的策略影响关系, 对市场模型做出以下假设。

1) 可再生能源配额制是在政府的强制干预下实现社会绿电的固定占比, 因此本文假设配额占比为 K , 各发电商按一定绿电的占比参与市场竞争。批发市场中, 绿电商富余的配额绿电可以参与绿证交易进而获得收益, 火电商不足配额的部分需要额外购买绿证。每 1 MW·h 的绿电等同于一单位的绿证。

2) 假设火电商 i ($i=1, 2, \dots, m$) 的成本函数为式(1)所示二次形式。

$$C_{\text{Termal},i} = \frac{1}{2}a_i q_i^2 + b_i q_i \quad (1)$$

式中: $C_{\text{Termal},i}$ 为火电商 i 的发电成本; q_i 为火电商 i 的发电出力; a_i 和 b_i 为火电商的成本系数。

绿电商由于其强烈的出力不确定性, 需要更多的运维成本及备用成本, 因此假设绿电商 j ($j=1, 2, \dots, n$) 也具有如式(2)所示的二次成本函数^[13]。

$$C_{\text{Renewable},j} = \frac{1}{2}a_j q_j^2 + b_j q_j \quad (2)$$

式中: $C_{\text{Renewable},j}$ 为绿电商 j 的发电成本; q_j 为绿电商 j 的发电出力; a_j 和 b_j 为绿电商的成本系数。

3) 假设电力批发市场为寡头垄断市场且存在古诺均衡模型, 市场电价为电量的逆需求函数, 如式(3)所示。

$$P_s = X - Y \left(\sum_{i=1}^m q_i + \sum_{j=1}^n q_j \right) \quad (3)$$

式中: P_s 为批发市场价格; X 和 Y 为市场电价供应函数的系数。

4) 假设绿电商以供应函数参与绿证市场^[11]。

$$Q_j^{\text{TGC}} = \alpha_j + \beta_j p_c \quad (4)$$

式中: Q_j^{TGC} 为绿电商 j 在绿证市场出售的证书数量; p_c 为绿证市场的绿证价格; α_j 、 β_j 分别为供应函数的截距和斜率。

一般而言,发电商的供应函数模型决策变量可为截距 α_j 或斜率 β_j ,本文取绿电商的策略变量为 α_j , β_j 取为绿电商边际成本函数斜率的比例系数。

电力批发市场和绿证交易市场间存在协同的影响关系,发电商在电力批发市场中的电量申报行为将会影响到绿证交易市场的绿证交易情况,绿电商在绿证交易市场的策略行为又会影响到绿证交易价格,进而对发电商在电力批发市场的决策产生影响。在绿证交易市场中,绿电商通过决定自身的策略变量 α_j 影响绿证价格,进而寻求策略均衡下的自身效益最大化。在电力批发市场中,所有发电商以古诺形式参与产量竞争,发电商间采取非合作博弈形式,每个发电商的决策变量为自身发电量。

2 市场均衡模型

2.1 纳什均衡

市场中发电商在自身决策变量的驱使下,寻求自身效益最大化。假设每个发电商 k 对应有决策变量 ζ_k ,构成各自独立策略集 $S_k = \{\zeta_k | \zeta_k \in [\zeta_{k\min}, \zeta_{k\max}]\}$,市场中存在发电商的策略集合 $(S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*)$,对任一博弈方来说,在该策略下发电商都没有改变自身策略的动机,即各个发电商收益均达到最优 $\max f_k(\zeta_k | \zeta_{-k})$,该策略集合即称为纳什均衡,满足:

$$f_k(\zeta_k^* | \zeta_{-k}^*) \geq f_k(\zeta_k | \zeta_{-k}^*), \forall k \quad (5)$$

2.2 批发市场均衡模型

火电商和绿电商在批发市场中进行产量竞争,在可再生能源配额下,此时批发市场中绿电商的优化问题可以描述如式(6)、式(7)。

$$\max f_{\text{green},j} = P_s q_j - C_{\text{Renewable},j} + p_c Q_j^{\text{TGC}} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } q_j^{\min} \leq q_j \leq q_j^{\max} \quad (7)$$

式中:绿电商的利润为其在批发市场的售电收入减去发电成本,再加上在绿证交易市场的绿证收入。

q_j^{\max} 和 q_j^{\min} 分别为绿电商出力的上下限。

同理,火电商在批发市场中,其利润为售电收入减去发电成本,再减去在绿证交易市场的绿证购买费用,其优化问题可以描述如式(8)、式(9)。

$$\max f_{\text{coal},i} = P_s q_i - C_{\text{Termal},i} - K p_c q_i \quad (8)$$

$$\text{s.t. } q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max} \quad (9)$$

2.3 绿证交易市场均衡模型

本文假设绿证交易市场为供给函数模型,绿电商在绿证市场进行决策,最终决定绿证交易价格,绿电商的决策原则为

$$\max_{\alpha_j} f_{\text{green},j} = P_s q_j - C_{\text{Renewable},j} + p_c Q_j^{\text{TGC}} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} 0 \leq Q_j^{\text{TGC}} \leq (1-K)q_j \\ \sum_{j=1}^n Q_j^{\text{TGC}} = K \sum_{i=1}^m q_i \\ Q_j^{\text{TGC}} = \alpha_j - \beta_j p_c \end{cases} \quad (11)$$

其中:式(10)为绿电商的效益最大化目标;式(11)约束分别为绿电出售证书约束、供需平衡约束及绿证价格约束。

2.4 批发市场和绿证市场的交互影响

在批发市场和绿证市场环境,发电商博弈行为如图1所示。

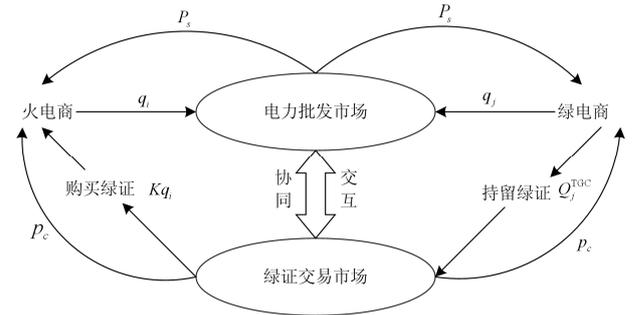


图1 批发市场和绿证市场协同的均衡模型

Fig. 1 Equilibrium model of coordination between wholesale electricity market and green certificate market

在批发市场中,绿电商和火电商分别申报出力 q_j 、 q_i 决定批发市场价格 P_s 。在配额责任的约束下,火电商需要向绿证市场购买 Kq_i 的绿证,绿电商可通过操纵绿证销售量 Q_j^{TGC} 决定绿证价格 p_c 。因此各发电商的决策变量需要同时考虑到绿证市场和批发市场竞争情况,在寡头垄断的情况下,绿电商可能通过持有绿证来行使市场力抬高绿证价格,火电商在高额的绿证约束下,将会减小其出力降低自身成本,进一步将会对绿电商的竞价策略造成影响。可以看出,批发市场和绿证市场存在紧密耦合的关系,各发电商的策略行为是相互影响的。

3 模型求解

本文构建的模型是一个电力批发市场和绿证交易市场协同作用机制下的均衡模型。发电商在两个市场中决策存在相互影响关系,两个市场的交互作用难以通过显函数形式获得,通常该类问题的求解是一个EPEC问题,鉴于传统的EPEC问题求解过程较为复杂,本文提出一种多群体协同进化算法用以求解两个市场的均衡。

协同现象广泛存在于生物界中, 本文运用多群体协同进化算法, 从动态的进化博弈理论出发, 以各个群体间的协同最优效益作为解空间的搜索方向, 各个主体博弈目标为对应市场环境下的效益最优。本文首先采用简单随机搜索生成发电商在电力批发市场的策略组合, 发电商间通过产量竞争确定市场批发电价, 进而寻求其在批发市场的最优策略, 市场的最优策略组合通过最优适应度函数进行评价。其次, 绿电商在考虑批发市场决策情况下, 通过制定其在绿证交易市场的策略变量影响绿证交易价格。通过批发市场和绿证市场的协同配合, 发电商最终的策略组合收敛于纳什均衡, 求解过程如图 2 所示。

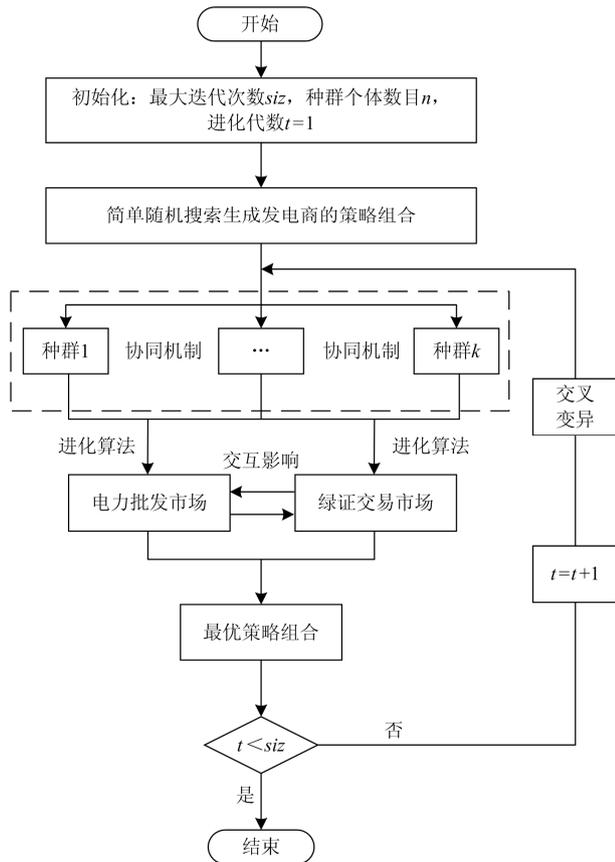


图 2 多群体协同进化算法求解流程

Fig. 2 Solution flow of multi-swarm co-evolutionary algorithm

在多群体协同进化算法中, 各群体依照自身的进化策略对整个解空间进行并行搜索, 每代群体的决策环境为上一代的最优决策策略。假设第 k 代中, 火电商和绿电商在电力批发市场的策略集合分别为 $S_{i,k}^{\text{fire}}$ 和 $S_{j,k}^{\text{green}}$, 发电商在批发市场的决策环境为上一代的其他市场主体 ($-t$) 最优策略集 $\omega_{-t}^{\text{best}} : \{S_{1\text{best},k-1}^{\text{fire}}, \dots, S_{m\text{best},k-1}^{\text{fire}}, S_{1\text{best},k-1}^{\text{green}}, \dots, S_{n\text{best},k-1}^{\text{green}}\}$, 绿电

商在绿证交易市场的策略集合为 $L_{j,k}^{\text{green}}$, 其决策环境为上一代的其他市场主体 ($-t$) 最优策略集 $\tau_{-t}^{\text{best}} : \{L_{1\text{best},k-1}^{\text{green}}, \dots, L_{n,k-1}^{\text{green}}\}$, m 和 n 分别为火电商和绿电商的数目。

为提高多群体协同进化算法整体的搜索性能, 本文引入自适应遗传算子和精英保留策略规避搜索方向的早熟收敛, 通过提高种群的多样性来提升算法的全局收敛稳定性。

4 算例分析

4.1 模型假设

本文假设市场中共有 6 家发电厂商参与市场竞争, 其中火电商 4 家 (G1, G2, G3, G4), 绿电商 2 家 (G5, G6), 发电商参数见表 1。电力批发市场为古诺竞争模型, 批发价格为逆需求函数 $p = 100 - 0.04Q$, 其中 Q 为批发市场交易电量。设定种群数目为 100, 最大迭代次数为 100。

表 1 参与市场的发电商参数

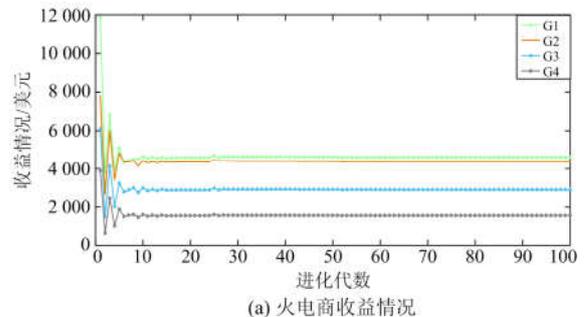
发电商	a	b	q_{\min}/MW	q_{\max}/MW
G1	0.061	25.265	0	400
G2	0.076	23.588	0	250
G3	0.073	29.037	0	200
G4	0.082	33.971	0	120
G5	0.085	32.000	0	200
G6	0.080	37.889	0	250

4.2 仿真分析

4.2.1 $K=0.2$ 时市场竞争情况

本节模拟配额比 $K=0.2$ 时的发电商决策情况, 进化过程中火电商收益情况如图 3 所示, 其中图 3(a) 为火电商的收益情况, 图 3(b) 为绿电商的收益情况。进化过程中发电商的出力情况如图 4 所示, 其中图 4(a) 为火电商的出力情况, 图 4(b) 为绿电商的出力情况。

由上图可知, 利用多群体协同进化算法, 市场整体在 60 代左右就趋于稳定。在进化早期, 由于搜



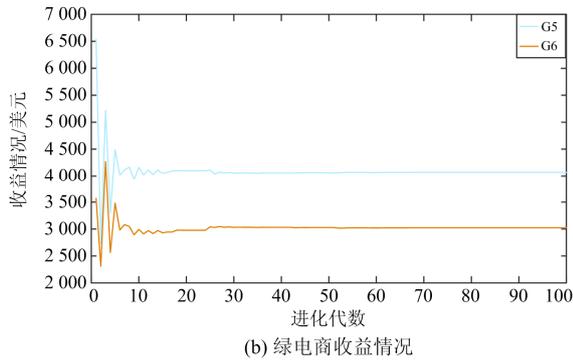


图 3 $K=0.2$ 进化过程中发电商收益情况

Fig. 3 Evolution process of generators' profits when $K=0.2$

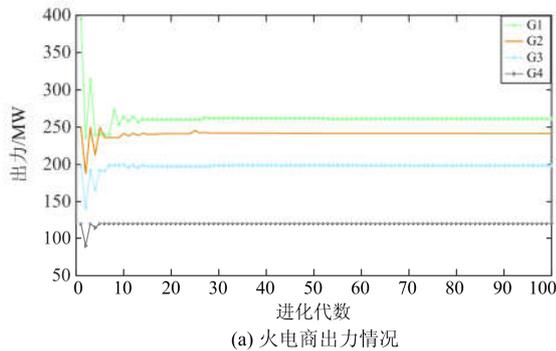


图 4 $K=0.2$ 进化过程中发电商出力情况

Fig. 4 Evolution process of generators' output when $K=0.2$

索方向的不确定性，波动性较大，发电商通过不断修正自身策略以获得效益最大化。随着进化代数的增加，最优适应度函数逐渐趋于稳定。

火电商 G1 成本系数较低，且具有较大的机组出力，因此在市场中具有较大的发电份额，仿真均衡时其最优出力和收益为(265.2 MW, 4 704.9 美元)。绿电商 G5 和 G6 最优出力和收益分别为(171.2 MW, 3 736.9 美元)、(125.4 MW, 2 742.1 美元)。

4.2.2 配额制对火电商和绿电商的影响

选取火电商 G1 和绿电商 G5 进行对比，图 5 为不同配额比例对其出力的影响，图 6 为绿电商 G5 在交易中可交易的证书和实际交易的证书情况。

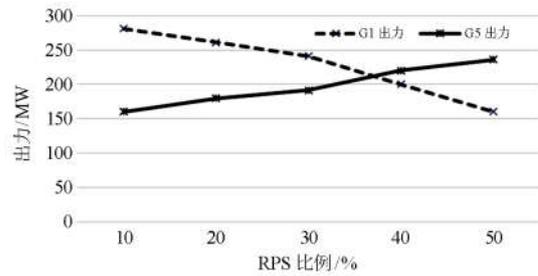


图 5 配额制对发电商 G1 和 G5 出力的影响

Fig. 5 Impacts of RPS on electricity output of G1 and G5

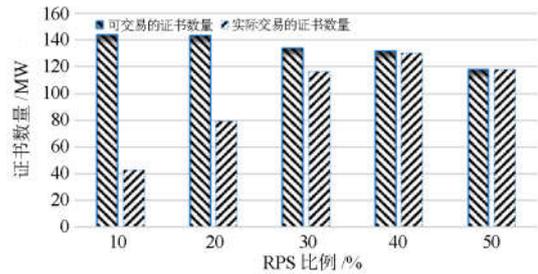


图 6 配额制对 G5 交易证书数量的影响

Fig. 6 Impacts of RPS on the number of transaction certificates of G5

由上图可以看出，随配额比例的提升，火电商在批发市场中的出力逐渐下降，绿电商在批发市场中的出力逐渐升高，绿电商实际交易的绿证数量逐渐等于可出售的绿证数量。分析原因如下：当配额比例较低的时候，绿电商实际出售绿证数量远小于可交易的绿证数量，一方面是由于火电商对绿证的需求比例较低，另一方面是由于绿电商在绿证市场滞留绿证导致。绿证商的滞留绿证将会导致绿证价格升高，火电商为减少其绿证购买成本，将会减少其出力。随配额比例的提高，发电商自身的配额要求以及市场中需求的绿证交易量逐渐升高，配额比例约为 40% 时，绿电商在绿证市场已无策略行为，为维持其最优利润，绿电商会批发市场通过减少出力控制绿证出售数量进而提高绿证价格。

4.2.3 配额制对批发价格及绿证价格的影响

图 7 为 RPS 比例对批发市场交易价格和绿证市场交易价格的影响，可以看出，随着配额比例的升高，两个市场的交易价格同时被抬高。分析可知，火电商不仅承担着自身的发电成本，在 RPS 下还需支出绿证费用，随配额比例的上升，一方面，绿电商滞留绿证使得绿证价格上涨，另一方面火电商所需购买的绿证数量增大，火电商为了减少绿证购买费用，将通过削减出力提高自身收益，电力批发市

场的交易价格因此提高。在绿证市场中, 随着配额比例的提高, 绿电商可交易的绿证数量和实际交易的绿证数量逐渐相等, 绿电商无法通过持有绿证行使市场力, 绿电商将减少批发市场的出力减少绿证市场的可交易绿证数量, 进而提高市场绿证价格, 绿证价格提高后, 火电又进一步减少出力, 绿证市场和批发市场存在着紧密的耦合关系。

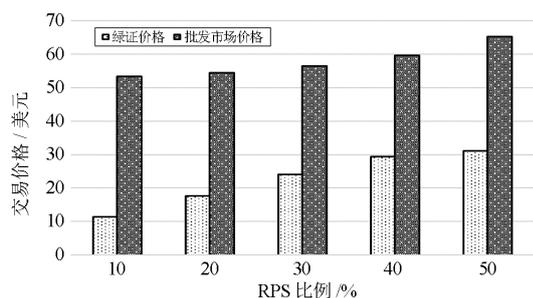


图 7 配额制对绿证市场和批发市场的影响

Fig. 7 Impact of RPS on the green certificate market and wholesale electricity market

4.3 算法鲁棒性分析

多群体协同进化算法作为一种智能算法, 能够扩大寻优的路径并得到最优解。在算法迭代过程中, 种群的规模、输入变量的范围都会对算法收敛性能和收敛速度产生影响。因此, 需要对本文提出的算法进行鲁棒性分析。本文选取种群规模大小和发电商出力范围区间对算法鲁棒性进行验证, K 取 0.3, 其他参数不变, 为便于分析, 以所有火电商和绿电商的总收益作为最优适应度函数。

图 8 是不同种群规模对算法收敛结果的影响, 分别取种群规模数为 30、50、70、100、150 进行仿真模拟。可以看出, 无论种群规模取值多大, 多群体协同进化算法在经过一定的进化代数后最终都会达到一个稳定的均衡解, 市场各成员最终收敛结果与种群规模的大小无关, 种群规模对算法的影响主

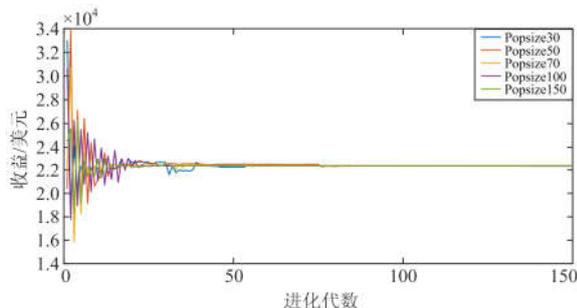


图 8 不同种群规模对算法收敛的影响

Fig. 8 Effect of different population sizes on the convergence of algorithms

要体现在求解时间上, 因此多群体协同进化算法具有较高的鲁棒性和稳定性。

图 9 是发电商出力区间大小对应的算法收敛情况。其中, 发电商出力区间等比例放大 1 倍、1.5 倍、2 倍、4 倍。可以看出, 随着出力区间的扩大, 算法搜索的波动性也随之变大, 出力区间越大, 算法收敛的代数越长, 但经过一定代数后, 多群体协同进化算法总能收敛到均衡解。因此, 本文提出的多群体协同进化算法具有较好的收敛性能。

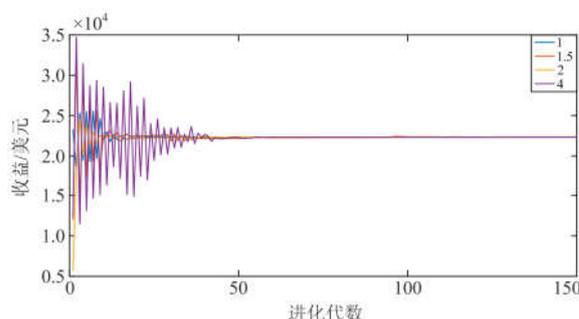


图 9 发电商出力区间大小对算法收敛的影响

Fig. 9 Effect of generator output interval on the convergence of the algorithms

5 结论

本文基于多群体协同进化算法建立了电力批发市场和绿证交易市场耦合的均衡模型, 结论如下:

1) 多群体协同进化算法作为智能算法的一种, 能够有效地求解多寡头博弈情况, 其能充分模拟市场中发电商的策略性行为并反映市场整体收益情况, 具有较好的鲁棒性。

2) 配额比例的提高能有效地增加绿电商的发电出力并减少火电商出力。为减少附加支出, 火电商将选择降低出力进一步影响批发价格, 绿电商在绿证市场通过操纵市场来提高绿证价格进而提高自身收益。火电商和绿电商的博弈同时抬高了两个市场的价格。

3) 本文仅从发电侧的角度考虑配额责任制下的市场主体博弈行为, 未考虑在用户侧和售电商实施配额责任对市场带来的影响; 且当前研究仅采用电力库形式进行模拟, 未考虑实际电力市场中输电线路信息, 这些都将是下一步研究的重点。

参考文献

[1] TAMAS M M, BADE SHRESTHA S O, et al. Feed-in tariff and tradable green certificate in oligopoly[J]. Energy Policy, 2010, 38(8): 4040-4047.
 [2] WANG T, GONG Y, JIANG C. A review on promoting

- share of renewable energy by green-trading mechanisms in power system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 923-929.
- [3] 王彩霞, 李梓仟, 李琼慧, 等. 丹麦新能源参与电力市场机制及对中国的启示[J]. *中国电力*, 2018, 51(9): 143-150.
WANG Caixia, LI Ziqian, LI Qionghui, et al. Participation mechanism of renewable energy in the electricity market in denmark and its implications for China[J]. *Electric Power*, 2018, 51(9): 143-150.
- [4] 昌力, 庞伟, 严兵, 等. 可再生能源跨区现货市场技术支持系统设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 158-165.
CHANG Li, PANG Wei, YAN Bing, et al. Design of renewable energy inter-regional spot market operation support system[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 158-165.
- [5] 胡飞雄, 周保荣, 卢斯煜. 南方电网促进可再生能源消纳的实践及发展展望[J]. *中国电力*, 2018, 51(1): 22-28.
HU Feixiong, ZHOU Baorong, LU Siyu. The practice and perspective of promoting renewable energy integration in China Southern Power Grid[J]. *Electric Power*, 2018, 51(1): 22-28.
- [6] 吴亮. 利用微电网提高垃圾填埋场清洁能源利用率[J]. *广东电力*, 2018, 31(2): 65-69.
WU Liang. Improvement of use ratio of clean energy in landfill by using micro-grid technology[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(2): 65-69.
- [7] 赵岳恒, 周俊东, 金旭荣, 等. 基于水电消纳能力提升的外送能力及特性分析方法研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(7): 29-34.
ZHAO Yueheng, ZHOU Jundong, JIN Xurong, et al. Study on transmisson capacity and characteristic analysis method based on improving hydropower accommodation[J]. *Smart Power*, 2018, 46(7): 29-34.
- [8] 刘强, 刘佩, 马少飞, 等. 基于灰狼优化算法的分布式电源定容选址研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(11): 40-46.
LIU Qiang, LIU Pei, MA Shaofei, et al. Siting and sizing of distributed generation based on grey wolf optimization algorithm[J]. *Smart Power*, 2018, 46(11): 40-46.
- [9] 梁钰, 孙竹, 冯连勇, 等. 可再生能源固定电价政策和可再生能源配额制比较分析及启示[J]. *中外能源*, 2018, 23(5): 13-20.
LIANG Yu, SUN Zhu, FENG Lianyong, et al. Comparison and enlightenment of FIT and RPS for renewable energy[J]. *Sino-Global Energy*, 2018, 23(5): 13-20.
- [10] 李璐, 谭忠富, 张恩源. 可再生能源配额制实施中的市场力研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(12): 106-112.
LI Lu, TAN Zhongfu, ZHANG Enyuan. Research on market power in the implementation of renewable portfolio standard[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(12): 106-112.
- [11] 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.
- [12] 康重庆, 杜尔顺, 张宁, 等. 可再生能源参与电力市场: 综述与展望[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(3): 16-23, 2.
KANG Chongqing, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Renewable energy trading in electricity market: review and prospect[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(3): 16-23, 2.
- [13] 朱继忠, 冯禹清, 谢平平, 等. 考虑可再生能源配额制的中国电力市场均衡模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 168-176.
ZHU Jizhong, FENG Yuqing, XIE Pingping, et al. Equilibrium model of Chinese electricity market considering renewable portfolio standard[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 168-176.
- [14] 杨建林. 电力市场均衡模型及其相关算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
YANG Jianlin. The study for the equilibrium models of the electricity market and its related algorithms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [15] 赵文会, 闫豪楠, 何威. 基于风火网非合作博弈的电力市场均衡模型[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 103-111.
ZHAO Wenhui, YAN Haonan, HE Wei. Equilibrium model of electricity market based on non-cooperative game of wind farms[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 103-111.
- [16] 林女贵. 电力市场下多投资方微电网竞价均衡研究[J]. *广东电力*, 2018, 31(6): 40-45.
LIN Nügui. Research on bidding equilibrium of microgrid with multiple investors under electric power market[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(6): 40-45.
- [17] HUANG H, LI F X. Bidding strategy for wind generation considering conventional generation and transmission constraints[J]. *Journal of Modern Power Systems & Clean Energy*, 2015, 3(1): 51-62.
- [18] 令狐大智. 双寡头竞争环境下企业碳减排决策行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

- LINGHU Dazhi. Enterprise decision-making on carbon emission reduction in duopoly[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [19] 张骥骧. 考虑排污权交易的有限理性竞争博弈模型研究[J]. 价值工程, 2018, 37(6): 101-103.
ZHANG Jixiang. Study on competitive game model with bounded rationality enterprise of emissions trading[J]. Value Engineering, 2018, 37(6): 101-103.
- [20] ZHOU H Z, TAMAS M M. Impacts of integration of production of black and green energy[J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 220-226.
- [21] 钟宇峰, 黄民翔, 文福拴, 等. 计及绿色证书交易机制的大用户直购电市场均衡分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 144-150.
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, WEN Fushuan, et al. Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 144-150.
- [22] 王晔, 王留晖, 张少华. 风电商与 DR 聚合商联营对电力市场竞争的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 110-116.
WANG Xian, WANG Lihui, ZHANG Shaohua. Impacts of cooperation between wind power producer and DR aggregator on electricity market equilibrium[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 110-116.
- [23] 王晔, 李渝曾, 张少华. 求解电力市场均衡模型的非线性互补方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 7-11, 58.
WANG Xian, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. A nonlinear complementary approach to the solution of equilibrium model for electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 7-11, 58.
- [24] 夏维. 基于进化博弈论的动态物流联盟多 Agent 仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
XIA Wei. Multi-agent simulation on dynamic logistics alliance based on evolutionary game theory[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [25] 马天男, 杜英, 苟全峰, 等. 基于 Berge-NS 均衡的电力市场多主体非合作博弈竞争模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 192-204.
MA Tiannan, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Non-cooperative competition game model of multiple subjects in electricity market based on Berge-NS equilibrium[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 192-204.
- [26] 石可, 陈皓勇, 李鹏, 等. 基于协同进化的两种电力市场出清机制分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 68-77.
SHI Ke, CHEN Haoyong, LI Peng, et al. Analysis on two kinds of electricity market clearance mechanism based on co-evolution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 68-77.
- [27] 陈永刚. 群体智能算法的若干改进研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
CHEN Yonggang. Research on improvements of swarm intelligence algorithms[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [28] 包涛, 程乐峰, 陈柏熹, 等. 基于人工智能算法的无功优化分析软件设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 89-96.
BAO Tao, CHENG Lefeng, CHEN Baixi, et al. Software design of reactive power optimization analysis based on artificial intelligence algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 89-96.
- [29] 马永杰, 朱琳, 田福泽. 基于精英种群策略的协同差分进化算法[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(2): 335-342.
MA Yongjie, ZHU Lin, TIAN Fuzhe. A cooperative differential evolution algorithm with elitist-population strategy[J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41(2): 335-342.

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-09-12

作者简介:

刘雨梦(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: 598251913@qq.com

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 工学博士, 教授, 研究方向为电力系统分析运行与控制、电力系统可靠性与规划、电力市场; E-mail: eehychen@scut.edu.cn

黄龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、综合能源。E-mail: 389711988@qq.com

(编辑 魏小丽)