

基于博弈论的可再生能源证书交易双层优化模型

陶悦川¹, 孙荣峰², 姜建国², 赖姝颖¹, 邱靖^{1,2*}

(1. 悉尼大学电气与信息工程学院, 澳大利亚 悉尼 2006; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院能源研究所, 山东省生物质气化技术重点实验室, 山东省 济南市 250014)

Bi-level Optimization Model of Renewable Energy Certificates Trading Based on Game Theory

TAO Yuechuan¹, SUN Rongfeng², JIANG Jianguo², LAI Shuying¹, QIU Jing^{1,2*}

(1. School of Electrical and Information Engineering, University of Sydney, Sydney 2006, Australia;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Biomass Gasification Technology, Energy Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, Shandong Province, China)

Abstract: Emissions trading schemes (ETS), as a policy tool, are widely used to control and reduce carbon emissions under the market mechanism in many countries. At the same time, renewable energy certificates (REC) are also regarded as an important mechanism to promote the development of renewable energy in the world. However, how to improve the purchase motivation of REC to achieve its design goal is a problem concerned by the government and researchers. In order to explore whether the combination of two mechanisms can improve the purchase motivation of REC to realize further emission reduction, a bi-level model of the trading of REC based on game theory is proposed in this paper. Under the oligopoly electricity market, thermal generators can purchase REC and convert them into carbon emission quotas, while renewable energy power plants and emerging power-to-gas (P2G) stations can cooperate to further increase the profit. Taking the actual REC, electricity, and natural gas markets in Australia as the background, the above model is verified on the IEEE 30 bus system. The simulation results reveal that the REC trading between thermal generators and renewable energy power plants can increase the total social welfare and reduce carbon emissions, and the cooperation between renewable energy power plants and P2G stations is proved to be cohesive. In addition, the influence of carbon price on REC price and emission reduction effect is discussed through sensitivity analysis.

Keywords: carbon emission schemes; renewable energy certificates; game theory; power-to-gas; large-scale renewable energy

摘要: 碳排放交易体系(emission trading schemes, ETS)作为基于市场机制下控制和减少碳排放的政策工具已被越来越多国家采用,同时可再生能源证书(renewable energy certificates, REC)也是国际上促进可再生能源发展的重要机制,但如何提升REC的购买动机以实现其设计目标是政府和研究人员关注的问题。为探讨2种机制的结合能否提升REC的购买动机以实现进一步减排作用,提出了一种基于博弈论的REC交易双层模型,在与现实接近的寡头电力市场条件下,火力发电厂可以购买REC并将其转换为碳排放配额,同时可再生能源发电厂与新兴的电转气(power-to-gas, P2G)合作以求进一步提高利润。以澳大利亚实际的REC、电力、天然气市场为背景,在IEEE 30节点系统上进行了上述模型验证。仿真结果表明,火电机组与可再生能源机组之间的REC交易可以增加社会总福利并减小碳排放,可再生能源机组与P2G间合作具有结合力;另外通过敏感性分析讨论了碳价对REC价格和减排效果的影响。

关键词: 碳交易; 可再生能源证书; 博弈论; 电转气; 大规模可再生能源

0 引言

电力部门火力发电厂碳排放是导致全球变暖的主要原因之一。许多国家和地区都建立了控制和减少碳排放的碳排放权交易体系(emission trading schemes, ETS),并首先将电力部门纳入其中。同时,很多国家和地区也在实施可再生能源证书(renewable energy certificates, REC)及其交易机制,以支持可再生能源的优先调度。在欧盟、美国,上述2种市场机制同时运转。不同国家和地区的碳市场和REC机制的具体规

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019JZZY010901)。

Key Research and Development Program of Shandong Province (2019JZZY010901).

则不同，通常是独立运行。

碳排放交易是指将二氧化碳排放权作为商品形成的交易。以欧盟为例，每个参与国都会制定一个国家行动计划，在规定的期限内减少每个电厂的温室气体排放量，所设立的排放许可证数量以计划中批准的排放配额为准^[1]。国家行动计划设计了有限数量的排放许可证，称为欧盟配额（European Union Allowances, EUAs），每个EUA授予持有者排放1t二氧化碳的权利。欧盟ETS的前2个阶段只针对二氧化碳排放量。在第一阶段，95%的EUA免费分配，5%保留给新安装的设备。在第二阶段，最多10%的可用配额可以在欧盟国家间拍卖。欧盟的碳排放总量管制和交易计划为澳大利亚推动碳市场提供了经验，即碳市场要实现其总体目标，必须保持总量管制和交易制度中排放许可证的相对稀缺性。一些文献已对碳排放交易有了较为深入的研究。在输电层面，文献[2-4]考虑机组组合模型（unit commitment, UC）中的碳排放交易，研究如何通过ETS和需求侧响应实现系统的低碳排放。文献[5]研究了碳价格和排放配额分配机制对减排的影响。文献[6]将ETS嵌入储能规划模型中，以帮助中国实现减排目标。文献[7]讨论了初始配额的不同分配方法。文献[8-9]从发电公司角度，研究了发电厂碳排放配额交易的行为。文献[10]在碳市场背景下，研究了电力系统的旋转备用容量。文献[11-12]对碳市场和电力市场之间的相互作用进行了建模。文献[13]在碳-电辅助服务市场中，提出了虚拟电厂的竞价策略。文献[14-15]提出了考虑碳约束的多能源枢纽规划问题的双层模型。文献[16]基于碳流模型，提出了一种含有碳税的节点电价模型，研究了输电层面的碳交易成本如何向下游分配。文献[17]提出了一种旨在控制碳足迹的需求侧管理方法。文献[18]考虑了消费者的碳需求响应，以研究消费者的响应如何影响系统的总排放量。随着中国碳市场的发展，国内涉及碳交易条件的研究论文逐渐增多。文献[19]研究了在碳排放交易的环境下，高渗透率光伏电力系统的优先调度问题。文献[20]进一步研究了基于碳排放交易的热-电-气的综合能源调度。针对政策与机制，文献[21]通过总结2013年以来中国启动的7个碳排放交易试点的经验与启示，提出中国碳排放交易制度建设的目的、路线图和主要内容。文献[22]提出，虽然中国碳排放交易已经在多个省市展开试点，但缺乏国家层面的法律法规来约束交易行为，借鉴欧美碳排放交易的法律经验，对构建中国的碳排放交易法提出了建议。

REC是指国家对发电企业每MWh可再生能源（通常是风电和光伏发电）上网电量颁发的具有独特标识代码的电子证书，是风电、光伏发电量的确认和属性证明，以及消费绿色电力的唯一凭证。虽然欧洲已经建立了相应的REC系统，但REC具体所载属性细节并没有严格的规定^[23]，在区域内跨国界转让证书时，可能会出现差异，导致成员国之间的承认或会计问题。因此，18个欧盟国家与2个非欧盟国家建立了“欧洲能源证书（European Energy Certificate System, EECs）”联合标准，并成立发行机构（Association of Issuing Bodies, AIB）负责管理。当一家公司购买一份证书作为它所消耗的可再生能源电力的文件时，该证书将在电子证书注册处注销。可以从电力供应商处购买REC，即捆绑购买电力与REC，也可以单独从自由市场供应商购买REC。证书价格取决于许多市场因素，包括技术、年份和来源国，并高度依赖于国家支持计划和地缘环境，上述变量已被证明是市场面临的真正挑战，一个具有竞争性的环境对促进欧洲市场增长非常重要。

在现有文献中，关于REC的研究还十分有限。文献[24]提到REC机制是一种可再生能源支持政策。文献[25]提出，REC作为政府的一项激励措施，可以促进可再生能源的快速发展。文献[26]揭示了罗马尼亚REC机制及可再生能源支持计划的演变。对于REC如何给可再生能源带来红利并减少总碳排放，目前还没有定量的模型和分析。文献[27]指出，可再生能源交易可以通过减少可再生能源补贴支出来减轻政府财政负担。为了验证REC的有效性，一些文献考察了不同碳政策下可再生能源的发展和经济效益。文献[28]研究了REC交易市场的运行模式，可再生能源投资者根据其产量获得证书，并将REC出售给零售商。文献[29]提出了在REC交易市场下，风能-太阳能-水力发电多目标动态经济排放调度模型。然而，还没有文献研究如何提高消费者购买REC的动机。在中国，较多研究集中于对REC的定价。例如，文献[30]研究了REC的价格形成机制。文献[31]分析了影响REC定价和交易的原因，并对比了实际REC的价格与企业愿意接受的REC交易边际价格。文献[32]研究了可再生能源电价附加资金补贴金额、补贴结算周期和拖延周期、消费者偏好对于REC定价的影响。文献[33]设计了可再生能源配额与REC交易配套机制，建立了多寡头非合作博弈模型，证明了设计的机制可以促进可再生能源的消纳。

澳大利亚目前没有碳市场,而REC是由电力消费者自主购买的自愿市场,认购率低。同时,当前电转气(power-to-gas, P2G)技术正蓬勃发展,可再生能源发电厂与其合作可降低弃风、弃光率并提高收益。

在上述背景下,本文以澳大利亚能源结构和市场条件为背景,通过允许火力发电厂购买REC增加碳排放配额,且引入P2G与可再生能源发电合作,研究包涵ETS与REC两种机制的发电交易模型,探讨REC的定价模型,研究其能否在实现社会最大效益时仍能帮助电力部门减排。另外,将通过敏感性分析研究碳价对REC价格和系统总排放量的影响。在具体研究中,与目前大多数研究的交易模型都基于完全竞争市场不同^[2-4, 18],本文中发电商按寡头市场考虑。

1 研究内容

1.1 碳排放配额

为控制燃煤等一次能源消费产生的碳排放,每台火力发电机组都实行了限额,限制其年度碳排放。发电商实际碳排放低于限额时,便可以出售剩余配额;而高于限额时,必须购买额外的配额。因此,碳交易应运而生。碳市场是一个池市场,每个人都可以在池中出售或购买配额。以前的大多数工作都默认假设池是无限大的,这样火力发电厂可以购买任意数量的配额。然而,燃煤发电厂的边际成本很低,而且往往不在乎碳排放税,可以通过购买大量的配额来保证发电量。这种现象违背了ETS的初衷,碳排放配额不能达到预期的减排目标。在本文的设计中,如果碳池是空的,发电商就不能再购买任何配额。

1.2 可再生能源证书(REC)

除了限制火电厂的发电量外,鼓励可再生能源的产出是减少碳排放的另一个途径。REC又称绿色证书、绿色标签,用来证明电力是使用可再生能源产生的,最初主要在欧洲使用,目前在全球范围内应用越来越广泛。一份REC表明可再生能源发电量为1 MWh。它是一种可交易的商品,其卖家是可再生能源发电商。最初,它的购买者是电力消费者。事实上,电能上网之后,不可能将可再生能源与不可再生能源产生的电能区分开来。这意味着购买者不能决定消费什么样的能源,而是支付额外的钱来支持可再生能源并承担社会责任,那么买方就不会从购买REC中获得任何直接利润。缺乏购买动机是澳大利亚等一些

国家REC认购率不高的原因。

目前,REC与碳交易之间没有直接的联系。本文研究了REC与碳排放配额的相关性。可以认为,REC代表消耗一定数量的可再生能源,不应评估该数量的电力排放量,因为在地市场需求固定的情况下,当更多的可再生能源被调度时,所调度的不可再生能源就将减少。因此,火电厂可以购买REC并将其转换为配额,这使得REC的购买动机增加。在许多国家,REC机制仍处于试验阶段,市场尚未完全开放。然而,未来REC市场发展蓬勃时,REC的价格将完全取决于市场交易,而不是政府制定。本文根据市场供求关系建立了可再生能源价格模型。与碳交易具有碳池不同,在REC交易中,生产者和消费者必须一一对应。

1.3 研究框架

在所提出的模型中,博弈论用来帮助每个参与者做出决策。模型中有3种参与者,即P2G、可再生能源发电厂和火力发电厂。每个参与者通过一个双层模型最大化其收益,如图1所示,上层目标是使市场参与者的收益最大化,下层目标是实现系统的经济调度。对于回报模型,P2G将出售碳配额,而火力发电厂将出售或购买配额。REC交易发生在每对火电厂和可再生能源发电厂之间。利用KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件将这3个双层模型转化为3个单层模型。通过找到纳什均衡点来确定每个参与者的最优策略。

2 博弈论模型

很多文献假定市场是完全竞争的,然而现实生活中大多数市场都是寡头市场。本文中光伏发电厂、风力发电厂、P2G和大型火力发电厂的数量有限,并且它们都由几家大公司所有,每个公司都希望通过考虑竞争对手的策略来获得最大利润。因此,本文建立博弈论模型来帮助其决策。

2.1 非合作博弈模型

本文P2G设备 G 、可再生能源发电厂 R 和火力发电厂 T 这3种市场参与者的策略分别标记为 S_G 、 S_R 、 S_T 。在博弈论模型中,博弈者期望找到一个纳什均衡作为博弈的最佳结果,纳什均衡须满足^[34]:

$$S_G^* = \arg \max_{S_G} R^{P2G}(S_G, S_R^*, S_T^*) \quad (1)$$

$$S_R^* = \arg \max_{S_R} R^{RNB}(S_G^*, S_R, S_T^*) \quad (2)$$

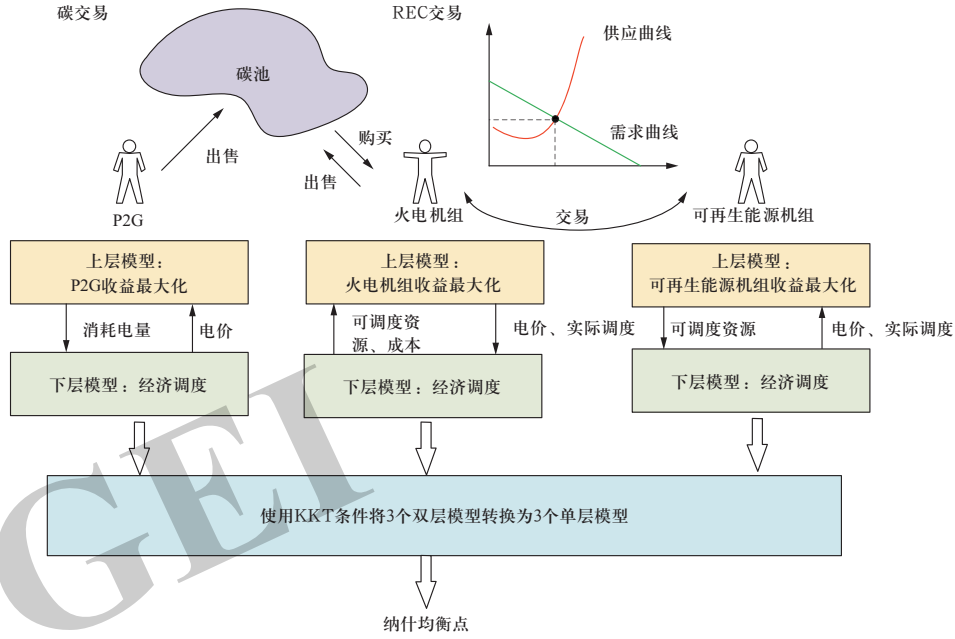


图1 ETS与REC交易机制并行框架

Fig. 1 Framework of parallel operation for ETS and REC

$$S_T^* = \arg \max_{S_T} R^{TG}(S_G^*, S_R^*, S_T^*) \quad (3)$$

式中： S_G^* 、 S_R^* 、 S_T^* 分别为参与者在纳什均衡点的策略； R^{P2G} 、 R^{RNB} 、 R^{TG} 为参与者的利益函数。

在纳什均衡点，每个博弈者都认为不管其他博弈者如何改变策略，自己的策略都是最佳选择，这表明没有博弈者可以通过单方面改变自己的策略来做得更好。

2.2 合作博弈模型

在大多数情况下，非合作博弈所获得的利润将小于合作博弈。在合作博弈中，一方可以与另一方结盟，使联盟总价值最大化，然后分配利润。本文假设可再生能源发电厂与P2G合作，联盟及其策略可记为

联盟： $\{G, R\}$ ， $\{T\}$ ；

策略： $\{S_G, S_R\}$ ， $\{S_T\}$ 。

第一个联盟包含P2G和可再生能源发电厂，第二个联盟包含火力发电厂。这种联盟博弈是否具有结合力将在案例研究中讨论。如果联盟博弈是有结合力的，那么将满足： $v(\Gamma) \geq \sum_{k=1}^K v(\tau_k)$ ， Γ 是参与者集合， $v(\Gamma)$ 是参与者的价值函数，即利益。

目前，在中国、澳大利亚等一些国家，传统燃煤发电机组仍处于主导地位。如果可再生能源发电厂和

P2G独立竞争，它们可能会失去优势。因此，本文假设可再生能源发电厂和P2G的联盟方式是合作博弈的核心，即能使总合作稳定分配的集合^[35]。核心中的任意一个分配都不导致参与者组合脱离总合作，因为建立一个新的合作并不能使参与者组合获得更大的收益。根据式(4)–(5)搜索纳什均衡点：

$$(S_G^*, S_R^*) = \arg \max_{S_G, S_R} R^{P2G, RNB}(S_G, S_R, S_T^*) \quad (4)$$

$$S_T^* = \arg \max_{S_T} R^{TG}(S_G^*, S_R^*, S_T^*) \quad (5)$$

第4章将对P2G和可再生能源发电厂的联合收益进行建模，即式(22)与式(27)之和。至于收益在集团成员之间的分配，没有具体限制。本文采用讨价还价的方法对收益进行了划分，即 $\max \prod_{k=1}^K (v(\tau_k)^* - v(\tau_k))$ ，其中 $v(\tau_k)^*$ 是有合作的收益， $v(\tau_k)$ 是无合作的收益。

2.3 纳什均衡点的搜索

在博弈模型中，纳什均衡点的搜索是一个多层的分布式优化问题。本文采用迭代搜索法求解纳什均衡。

步骤1：初始化，即参与者从策略集合中随机选择的初始策略 (S_G^0, S_R^0, S_T^0) 。

步骤2：每一个参与者或联盟根据上一回合对手的策略轮流做出决定：

$$(S_G^k, S_R^k) = \arg \max_{S_G, S_R} R^{P2G, RNB}(S_G, S_R, S_T^{k-1}) \quad (6)$$

$$S_T^k = \arg \max_{S_T} R^{TG}(S_G^{k-1}, S_R^{k-1}, S_T) \quad (7)$$

式中: k 为轮次。

步骤3: 检验策略是否为纳什均衡点。当没有参与者改变策略时, 即找到纳什均衡点:

$$(S_G^k, S_R^k, S_T^k) = (S_G^{k-1}, S_R^{k-1}, S_T^{k-1}) = (S_G^*, S_R^*, S_T^*) \quad (8)$$

步骤4: 重复步骤2和步骤3, 当找到纳什均衡时停止迭代。纳什均衡是所有参与者的最终策略。

3 可再生能源证书定价模型

3.1 拐折的需求曲线

REC的价格模型可以通过需求-供给曲线来求解。可再生能源发电厂是REC的产出者, 本文REC的主要消费者为火电机组。在寡头市场中, 需求曲线是如图2所示的拐折曲线^[36]。文中需求-供给曲线是反应整个市场情况的聚合曲线, 而非特定公司的需求-供给曲线, 体现了总需求和总供给如何在宏观经济层面上相互作用。沿着拐折的需求曲线, 弹性是不同的。当参与者将其价格提高到 P_0 以上, 其他竞争对手将不会跟随, 由于替代效应该参与者将失去市场份额。因此, P_0 上方的需求曲线将相对具有弹性。当降价时, 需求将失去弹性, 因为它的竞争对手会紧随其后。在寡头价格模型中, 不存在价格竞争。企业的目标是达到利润总额的一阶导数为0时所能获得的最大利润总额, 表示为

$$\pi' = R_T' - C_T' = R_M - C_M = 0 \quad (9)$$

式中: π 是净利润; R_T 是总收益; C_T 是总成本; R_M 是边际收益; C_M 是边际成本。

当边际成本等于边际收益时, 利润最大。边际成本曲线(MC)是图2中所示的供给曲线。总收入可以表示为

$$R_T = PQ \quad (10)$$

式中: P 是出销售价格; Q 是交易量。

假设需求曲线(平均收入曲线)为

$$P = mQ + n \quad (11)$$

可以得到:

$$R_T = PQ = mQ^2 + nQ \quad (12)$$

$$R_M = R_T' = 2mQ + n \quad (13)$$

因此, 边际收益曲线(MR)总是具有与需求曲线(D)相同的截距和2倍的斜率, 如图2所示。可以通过边际收益曲线与边际成本曲线的交点确定交易量 Q_0 。当交易量为 Q_0 时, 价格可以通过需求曲线算出 P_0 。在这种情况下, 消费者剩余是区域1, 而生产者剩余是区域2和4。然而, 在竞争市场中, 需求曲线和供给曲线的交点可以确定价格。在这种情况下, 消费者剩余是区域1、2和3, 生产者剩余是区域4和5。寡头和竞争市场相比, 寡头市场中的生产者剩余更大。然而, 从社会福利的角度来看, 寡头市场失去了区域3和5, 损失了社会福利。

3.2 需求曲线的平移

目前, REC的价格往往由政府制定, 并且太阳能的REC价格高于风能, 因为其投资成本不同, 这导致市场向风能的REC倾斜。然而, 当未来REC市场开放时, REC价格可以统一。如图2所示, 当需求曲线固定为 D_0 , 供给曲线为 S_0 时, 市场价格为 P_0 。当成本在小范围内增减时, 市场价格不会发生变化。例如, 当

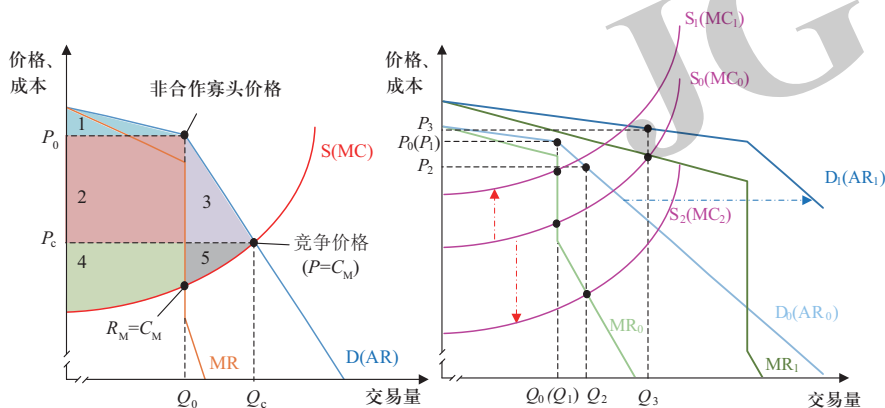


图2 拐折的需求曲线

Fig. 2 Kinked demand curves

成本增加时，供应曲线将垂直向上移动到 S_1 ，此时市场价格可以建模为 P_1 ，与 P_0 相同。在交易量上，需求曲线和边际收益曲线可以表示为

$$P = \begin{cases} mQ + n, Q < Q_0 \\ uQ + v, Q \geq Q_0 \end{cases} \quad R_M = \begin{cases} 2mQ + n, Q < Q_0 \\ 2uQ + v, Q \geq Q_0 \end{cases} \quad (14)$$

供给曲线可以表示为 $P = aQ^2 + bQ + c$ 。

当满足 $aQ_0^2 + bQ_0 + c < 2mQ_0 + n$ 且 $aQ_0^2 + bQ_0 + c > 2uQ_0 + v$ 时，REC的价格可以确定为

$$P_0 = mQ_0 + n = uQ_0 + v \quad (15)$$

只有当成本发生较大变化时，例如成本降低到 S_2 ，市场价格才会发生变化。

当满足 $aQ_0^2 + bQ_0 + c < 2uQ_0 + v$ 时，供给曲线与边际收益曲线的交点可求得

$$aQ^2 + bQ + c = 2uQ + v \quad (16)$$

$$Q = \frac{2u - b + \sqrt{(2u - b)^2 - 4a(c - v)}}{2a} \quad (17)$$

REC的价格可以确定为

$$u \frac{2u - b + \sqrt{(2u - b)^2 - 4a(c - v)}}{2a} + v \quad (18)$$

同样，当 $aQ_0^2 + bQ_0 + c > 2mQ_0 + n$ 时，价格可以

$$\text{确定为 } m \frac{2m - b + \sqrt{(2m - b)^2 - 4a(c - n)}}{2a} + n。$$

若把ETS机制与REC机制结合，当可再生能源价格低于碳价时，一些市场投机者可能会购买大量的可再生能源，然后作为排放配额出售，这显然违反了最初的设计原则。但是如果把REC市场化，这个问题在本文的模型中是可以避免的。把供给曲线固定为 S_0 ，当需求急剧增加时，需求曲线将从 D_0 右移到 D_1 ，价格将从 P_0 上升到 P_3 。当市场价格超过碳价时，这种投机行为无收益，需求和价格最终将降至正常值。需求曲线和边际收益曲线被转移到

$$P = \begin{cases} m(Q+p) + n = mQ + mp + n, Q < Q_0 \\ u(Q+p) + v = uQ + up + v, Q \geq Q_0 \end{cases} \quad (19)$$

$$R_M = \begin{cases} 2mQ + mp + n, Q < Q_0 \\ 2uQ + up + v, Q \geq Q_0 \end{cases} \quad (20)$$

REC价格将确定为

$$m \frac{2m - b + \sqrt{(2m - b)^2 - 4a(c - n)}}{2a} - mp + n \quad (21)$$

4 可再生能源证书交易模型

本文第3章提出了基于市场供需曲线的REC定价模型，并分析了其价格变化与市场需求的联系，所确定的REC价格将在本章的优化问题中作为固定的参数。本章重点提出了基于博弈论的REC交易模型，得到REC交易量。该模型将体现REC与ETS相结合的思想，利用相对成熟的碳市场带动发展缓慢的REC交易。模型的意义在于通过可再生能源发电厂和P2G的合作，与火电机组进行竞争，从而增加联盟的利润，并起到减排的效果。

本章将提出一种搜索3个不同参与者的最优策略的方法，以及一种考虑竞争对手策略的双层模型，最大化每个参与者的利润。文中在可再生能源渗透率较高的假设下建立了随机模型，用概率最优潮流(probabilistic optimal power flow, POPF)捕捉可再生能源和负荷的不确定性^[37]。

4.1 上层模型：每个参与者的利益模型

4.1.1 P2G设备

P2G的收益包括销售天然气的收入加上碳环境利润减去购电成本：

$$\max R^{P2G} = \sum_{t=1}^T \sum_{p \in \Omega^P} (\pi_{p,t}^{\text{gas}} g_{p,t}^{P2G, \text{sg}} - \pi_t^C e_{p,t}^{P2G, \text{pur}} + \pi_t^{\text{CAR}} \alpha^{P2G} e_{p,t}^{P2G, \text{pur}}) \quad (22)$$

式中： Ω^P 为P2G的集合； $\pi_{p,t}^{\text{gas}}$ 是节点天然气价格； π_t^C 为出清电价； π_t^{CAR} 为碳价； $g_{p,t}^{P2G, \text{sg}}$ 为P2G向气网卖气量（单位为能量）； $e_{p,t}^{P2G, \text{pur}}$ 为P2G从电网买电量； α^{P2G} 是P2G的减排因子。

约束条件为

$$E_{p,t+1}^{P2G} = E_{p,t}^{P2G} + e_{p,t}^{P2G, \text{pur}} \eta^c - g_{p,t}^{P2G, \text{sg}}, \forall p \in \Omega^P \quad (23)$$

$$0 \leq e_{p,t}^{P2G, \text{pur}} \leq \overline{e_p^{P2G, \text{rate}}}, \forall p \in \Omega^P \quad (24)$$

$$0 \leq g_{p,t}^{P2G, \text{sg}} \leq \overline{g_p^{P2G, \text{SG}}}, \forall p \in \Omega^P \quad (25)$$

$$0 \leq E_{p,t}^{P2G} \leq \overline{E_p}, \forall p \in \Omega^P \quad (26)$$

式（23）是P2G的能量平衡（气与电的能量单位统一为MWh），其中 η^c 为P2G的效率。式（24）和（25）分别是单位时间内购电和售气量的边界限制，式（26）是P2G的容量限制。

4.1.2 可再生能源发电厂

可再生能源发电厂的收益有售电收入和出售REC

收入2部分, 如式(27)所示。

$$\max R^{\text{RNB}} = \sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \left(\pi_{r,t}^{\text{LMP}} \left(e_{r,t}^{\text{R,NGC}} + \sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} e_{rg,t}^{\text{R,GCG}} + \sum_{j \in \Omega^{\text{J}}} e_{rj,t}^{\text{R,GCC}} \right) + \pi_{r,t}^{\text{GC}} \left(\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} e_{rg,t}^{\text{R,GCG}} + \sum_{j \in \Omega^{\text{J}}} e_{rj,t}^{\text{R,GCC}} \right) \right) \quad (27)$$

式中: Ω^{RNB} 为可再生能源机组集合; $\pi_{r,t}^{\text{LMP}}$ 为节点电价; $e_{r,t}^{\text{R,NGC}}$ 为未认购的可再生能源出力; $e_{rg,t}^{\text{R,GCG}}$ 为火电机组认购的REC对应的可再生能源出力; $e_{rj,t}^{\text{R,GCC}}$ 为电力消费者认购的可再生能源出力; $\pi_{r,t}^{\text{GC}}$ 为REC价格。

约束条件为

$$e_{r,t}^{\text{R,NGC}} + \sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} e_{rg,t}^{\text{R,GCG}} + \sum_{j \in \Omega^{\text{J}}} e_{rj,t}^{\text{R,GCC}} = e_{r,t}^{\text{PV}} + e_{r,t}^{\text{W}}, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad (28)$$

$$e_{r,t}^{\text{R,NGC}} + \sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} e_{rg,t}^{\text{R,GCG}} + \sum_{j \in \Omega^{\text{J}}} e_{rj,t}^{\text{R,GCC}} \leq \overline{e_{r,t}^{\text{PV}}} + \overline{e_{r,t}^{\text{W}}}, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad (29)$$

$$e_{rg,t}^{\text{R,NGC}} \leq e_{gr,t}^{\text{G,GCG}}, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}}, \forall g \in \Omega^{\text{G}} \quad (30)$$

式中: $e_{r,t}^{\text{PV}}$ 和 $e_{r,t}^{\text{W}}$ 分别为光伏和风力发电的实际出力。

式(28)表示可再生能源发电厂由光伏和风力发电组成。式(29)表示光伏和风力发电的上网电量不能超过总的可调度电能, 这意味着可能存在弃风弃光现象。式(30)代表可再生能源发电厂出售的REC将小于火力发电厂所需的REC数量。

4.1.3 火力发电厂

火电厂的收益等于售电收入减去购买REC的成本, 再减去购买碳排放配额的成本。

$$\max R^{\text{TG}} = \sum_{t=1}^T \sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} \left(\pi_{g,t}^{\text{LMP}} e_{g,t}^{\text{G}} \right) - \pi_t^{\text{GC}} \left(\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} \sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \right) - \pi_t^{\text{CAR}} \left(\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} \varepsilon_g^{\text{QT,pur}} \right) \quad (31)$$

式中: Ω^{G} 为火电机组的集合; $e_{g,t}^{\text{G}}$ 为火电机组的出力; $e_{gr,t}^{\text{G,GCG}}$ 为第 r 个可再生能源机组提供的REC; $\varepsilon_g^{\text{QT,pur}}$ 为购买的碳排放配额。

约束条件为

$$\varepsilon_g^{\text{QT,pur}} = \sum_{t=1}^T \left(e_{gt}^{\text{G}} - \sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \left(e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \alpha^{\text{GC}} \right) - C_{\text{AP}g} \cdot \chi_g \right), \quad \forall g \in \Omega^{\text{G}} \quad (32)$$

式中: χ_g 为碳排放系数。

$$\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} \varepsilon_g^{\text{QT,pur}} \leq \sum_{t=1}^T \sum_{p \in \Omega^{\text{P}}} \left(\alpha^{\text{P2G}} e_{p,t}^{\text{P2G,pur}} \right) + Q_{t-1}^{\text{pool}} \cdot \kappa_g, \quad \forall g \in \Omega^{\text{G}} \quad (33)$$

$$\underline{e}_g^{\text{G}} \leq e_{g,t}^{\text{G}} \leq \overline{e}_g^{\text{G}} : \phi_{g,t}^{\text{min,G}}, \phi_{g,t}^{\text{max,G}}, \quad \forall g \in \Omega^{\text{G}} \quad (34)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \geq \sum_{t=1}^T e_{g,t}^{\text{G}} E_{\text{ROR}\%} : \xi_g, \quad \forall g \in \Omega^{\text{G}} \quad (35)$$

$$e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \leq e_{rg,t}^{\text{R,GCG}}, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}}, \forall g \in \Omega^{\text{G}} \quad (36)$$

式(32)计算发电厂需要购买(或出售)的配额数量, 等于总排放量减去购买的REC转换的配额以及分配的配额; 如果该值为负, 表示发电厂可以出售配额。式(33)表示当池中没有配额时, 发电厂不能再购买配额。式(34)为单位时间内发电机的输出限制。式(35)是指根据政府政策, 火电机组通过购买REC承担的可再生能源发电量应大于其总发电量的一定比例。式(36)表示火力发电厂购买的REC小于可再生能源发电厂提供的REC数量。

4.2 下层模型: 基于碳交易和REC交易的经济调度

经济调度(economic dispatch, ED)由ISO执行, 以实现市场清算和最优调度。火电机组的招标将包括购买REC和碳排放配额的成本, 这意味着减排成本将转移到消费者身上。ED模型可以表示为

$$\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} (a_g^{\text{G}} e_{g,t}^{\text{G}}) + \pi_t^{\text{GC}} \left(\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \right) + \pi_t^{\text{CAR}} \left(\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} \varepsilon_g^{\text{QT,pur}} \right) + \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} (a_r^{\text{PV}} e_{r,t}^{\text{PV}}) + \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} (a_r^{\text{W}} e_{r,t}^{\text{W}}) \right) \quad (37)$$

式中: a_g^{G} 、 a_r^{PV} 及 a_r^{W} 分别为火电机组、光伏发电及风力发电机组的竞标价。

约束条件除式(32)~(36)外, 还包括

$$\sum_{g \in \Omega^{\text{G}}} e_{g,t}^{\text{G}} + \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} (e_{r,t}^{\text{PV}} + e_{r,t}^{\text{W}}) - \sum_{p \in \Omega^{\text{P}}} e_{p,t}^{\text{P2G,pur}} - \sum_{j \in \Omega^{\text{J}}} L_{j,t} = 0 \quad (38)$$

$$\underline{c}_l \leq \sum_{m \in \Omega} G_{\text{SFI},m} \left(e_{m,t}^{\text{G}} + e_{m,t}^{\text{PV}} + e_{m,t}^{\text{W}} - e_{m,t}^{\text{P2G,pur}} - L_{m,t} \right) \leq \overline{c}_l : \omega_{l,t}^{\text{min}}, \omega_{l,t}^{\text{max}}, \quad \forall t \in (1, T) \quad (39)$$

式中: $L_{j,t}$ 是负荷量; $G_{\text{SFI},m}$ 是机组转移因子; $\overline{c}_l$ 和 $\underline{c}_l$ 是潮流上下限。

目标函数使系统总成本最小化。式(38)是系统的能量平衡,式(39)是潮流限制。本文潮流计算采用直流模型,使用功率传输分布因子(power transfer distribution factor, PTDF)计算。

将双层优化问题转化为一层优化问题,需要求出上述问题的拉格朗日函数,如式(40)所示。下层模型的最优解应满足式(41)–(55)中的KKT条件。

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{g \in \Omega^G} (a_g^G e_{g,t}^G) + \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} (a_r^{\text{PV}} e_{r,t}^{\text{PV}}) + \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} (a_r^{\text{W}} e_{r,t}^{\text{W}}) \right) + \\ & \pi_t^{\text{GC}} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \right) + \pi_t^{\text{CAR}} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \varepsilon_g^{\text{QT,pur}} \right) + \\ & \left(-\chi_g \left(\sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \left(e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} \alpha^{\text{GC}} \right) + C_{\text{AP}g} \right) - \right. \\ & \left. \sum_{g \in \Omega^G} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{p \in \Omega^{\text{P}}} \left(\alpha^{\text{P2G}} e_{p,t}^{\text{P2G,pur}} \right) - \varepsilon_g^{\text{QT,pur}} + Q^{\text{pool}} \right) - \right. \\ & \left. \xi_g \left(\sum_{t=1}^T \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} e_{gr,t}^{\text{G,GCG}} - \sum_{t=1}^T e_{g,t}^{\text{G}} E_{\text{ROR}\%} \right) \right) + \\ & \left(-\mu_t \left(\sum_{g \in \Omega^G} e_{g,t}^G + \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} (e_{r,t}^{\text{PV}} + e_{r,t}^{\text{W}}) - \sum_{p \in \Omega^{\text{P}}} e_{p,t}^{\text{P2G,pur}} - \sum_{j \in \Omega^{\text{I}}} L_{j,t} \right) - \right. \\ & \sum_{l \in L} \omega_{l,t}^{\min} \left(\sum_{m \in \Omega} G_{\text{SFI},m} \left(\frac{e_{m,t}^G + e_{m,t}^{\text{PV}} + e_{m,t}^{\text{W}}}{e_{m,t}^{\text{P2G,pur}} - L_{m,t}} \right) - c_l \right) - \\ & \sum_{l \in L} \omega_{l,t}^{\max} \left(\bar{c}_l - \sum_{m \in \Omega} G_{\text{SFI},m} \left(\frac{e_{m,t}^G + e_{m,t}^{\text{PV}} + e_{m,t}^{\text{W}}}{e_{m,t}^{\text{P2G,pur}} - L_{m,t}} \right) \right) - \\ & \sum_{g \in \Omega^G} \phi_{g,t}^{\min,G} (e_{g,t}^G - \underline{e}_g^G) - \sum_{g \in \Omega^G} \phi_{g,t}^{\max,G} (\bar{e}_g^G - e_{g,t}^G) - \\ & \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \phi_{r,t}^{\min,\text{PV}} (e_{r,t}^{\text{PV}} - 0) - \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \phi_{r,t}^{\max,\text{PV}} (\bar{e}_{r,t}^{\text{PV}} - e_{r,t}^{\text{PV}}) - \\ & \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \phi_{r,t}^{\min,\text{W}} (e_{r,t}^{\text{W}} - 0) - \sum_{r \in \Omega^{\text{RNB}}} \phi_{r,t}^{\max,\text{W}} (\bar{e}_{r,t}^{\text{W}} - e_{r,t}^{\text{W}}) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} & a_g^G + \chi_g \varepsilon_g^{\text{GC}} + \xi_g E_{\text{ROR}\%} - \mu_t - \\ & \sum_{l \in L} G_{\text{SFI},g} (\omega_{l,t}^{\min} - \omega_{l,t}^{\max}) - \phi_{g,t}^{\min,G} + \phi_{g,t}^{\max,G} = 0, \\ & \forall g \in \Omega^G \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & a_r^{\text{PV}} - \mu_t - \sum_{l \in L} G_{\text{SFI},m} (\omega_{l,t}^{\min} - \omega_{l,t}^{\max}) - \phi_{r,t}^{\min,\text{PV}} + \phi_{r,t}^{\max,\text{PV}} = 0, \\ & \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \end{aligned} \quad (42)$$

$$a_r^{\text{W}} - \mu_t - \sum_{l \in L} G_{\text{SFI},m} (\omega_{l,t}^{\min} - \omega_{l,t}^{\max}) - \phi_{r,t}^{\min,\text{W}} + \phi_{r,t}^{\max,\text{W}} = 0,$$

$$\forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad (43)$$

$$\lambda_i^{\text{GC}} - \chi_g \alpha^{\text{GC}} - \xi_g = 0, \forall g \in \Omega^G \quad (44)$$

$$\pi_t^{\text{CAR}} - \chi_g - \kappa_g = 0, \forall g \in \Omega^G \quad (45)$$

$$0 \leq \kappa_g \perp \left(\sum_{t=1}^T \sum_{p \in \Omega^{\text{P}}} (\alpha^{\text{P2G}} e_{p,t}^{\text{P2G,pur}}) - P_g^{\text{QT,pur}} \right) \geq 0, \quad \forall g \in \Omega^G \quad (46)$$

$$0 \leq \xi_g \perp \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{I}}} e_{gi,t}^{\text{G,GCG}} - \sum_{t=1}^T e_{g,t}^{\text{G}} E_{\text{ROR}\%} \right) \geq 0, \quad \forall g \in \Omega^G \quad (47)$$

$$0 \leq \omega_{l,t}^{\min} \perp \left(\sum_{m \in \Omega} G_{\text{SFI},m} \left(\frac{e_{m,t}^G + e_{m,t}^{\text{PV}} + e_{m,t}^{\text{W}}}{e_{m,t}^{\text{P2G,pur}} - L_{m,t}} \right) - c_l \right) \geq 0, \quad \forall l \in L \quad \forall t \in (1, T) \quad (48)$$

$$0 \leq \omega_{l,t}^{\max} \perp \left(\bar{c}_l - \sum_{m \in \Omega} G_{\text{SFI},m} \left(\frac{e_{m,t}^G + e_{m,t}^{\text{PV}} + e_{m,t}^{\text{W}}}{e_{m,t}^{\text{P2G,pur}} - L_{m,t}} \right) \right) \geq 0, \quad \forall l \in L \quad \forall t \in (1, T) \quad (49)$$

$$0 \leq \phi_{g,t}^{\min,G} \perp (e_{g,t}^G - \underline{e}_g^G) \geq 0, \quad \forall g \in \Omega^G \quad \forall t \in (1, T) \quad (50)$$

$$0 \leq \phi_{g,t}^{\max,G} \perp (\bar{e}_g^G - e_{g,t}^G) \geq 0, \quad \forall g \in \Omega^G \quad \forall t \in (1, T) \quad (51)$$

$$0 \leq \phi_{r,t}^{\min,\text{PV}} \perp (e_{r,t}^{\text{PV}} - 0) \geq 0, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad \forall t \in (1, T) \quad (52)$$

$$0 \leq \phi_{r,t}^{\max,\text{PV}} \perp (\bar{e}_{r,t}^{\text{PV}} - e_{r,t}^{\text{PV}}) \geq 0, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad \forall t \in (1, T) \quad (53)$$

$$0 \leq \phi_{r,t}^{\min,\text{W}} \perp (e_{r,t}^{\text{W}} - 0) \geq 0, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad \forall t \in (1, T) \quad (54)$$

$$0 \leq \phi_{r,t}^{\max,\text{W}} \perp (\bar{e}_{r,t}^{\text{W}} - e_{r,t}^{\text{W}}) \geq 0, \quad \forall r \in \Omega^{\text{RNB}} \quad \forall t \in (1, T) \quad (55)$$

下层模型可以作为补充约束加入到上层模型^[38]。

例如,可再生能源发电厂的两级问题可以重新表述为

目标函数: 式(27);

约束条件: 式(28)–(30), 式(41)–(55)。

其他2个参与者的双层问题也可以采用类似的方法建模。在得到3个参与者的单层数学模型后,通过对单个收益的累加,可以对P2G和可再生能源发电厂的合作收益进行建模,并期望得到最大的总收益:

$$(S_G^*, S_R^*) = \arg \max_{S_G, S_R} R^{\text{P2G,RNB}}(S_G, S_R, S_T^*) \quad (56)$$

然后依照2.3节的迭代过程,可以找到纳什均衡点 (S_G^*, S_R^*, S_T^*) 。

4.3 纳什均衡点的存在性和唯一性

由于式(22)、(27)和(31)中的目标函数和变量

是非空、闭合和凸的,所以所有参与者的策略集是非空、闭合和凸的。每个参与者的收益函数是双层问题,可通过KKT条件转化为连续可微的单层优化问题。综上,所提出的模型是一个凸博弈,根据文献[39]和[40],凸博弈的纳什均衡存在且唯一。

5 算例

5.1 算例假设与数据说明

本文提出的模型在IEEE 30节点系统上进行了测试,仿真实验在一台Intel Core (TM) i7-9750 CPU @ 2.6 GHz 16 GB RAM的计算机上完成,求解器使用MATLAB中OPTI工具箱的SCIP,仿真使用的主要参数见表1。电价和天然气价格数据取自澳大利亚能源市场运营商网站^[41-42],碳价数据取自COMMTRADE网站^[43]。

通过3个算例,比较本文的模型与传统的最优电力调度模型,算例设计如下:

算例1:不考虑REC,假设市场完全竞争;

算例2:考虑REC交易,假设市场为寡头,采用非合作博弈;

算例3:考虑REC交易,假设市场为寡头,采用P2G与可再生能源发电厂合作的博弈模型。

算例中,完全竞争市场与寡头市场的区别主要体现在2点:①在参与者设置上,寡头市场假设所有火电机组属于同一家公司,所有可再生能源机组属于同一家公司,完全竞争市场假设不同机组属于不同公司;②在数学模型上,寡头市场中由博弈论来决定每个参与者的决策,而完全竞争市场以最大化社会总福利为优化目标,不存在博弈。

表1 仿真参数设定

Table 1 Simulation parameters

参数	值	参数	值
火电机组竞标价 a^G	7澳元/MWh	碳配额 C_{APg}	1.2×10^7 t/a
光伏发电竞标价 a^{PV}	25澳元/MWh	最低可再生能源出力率 $E_{ROR\%}$	15%
风电厂竞标价 a^W	14澳元/MWh	P2G减排因子 α^{P2G}	0.75
碳排放系数 ζ^G	0.875~0.985	碳配额转换比 α^{GC}	0.8

5.2 仿真结果

图3为连续7天内的电价、天然气价格、碳价和REC价格曲线。从图3可以看出,由于电价多数时候高于天然气价格,如果P2G仅依靠低价购电、相对高价卖气的套利机制,利润非常有限。根据定价模型计算的REC价格几乎不变,但当碳价持续上涨时,由于需求的变化,REC的价格可能会上涨。

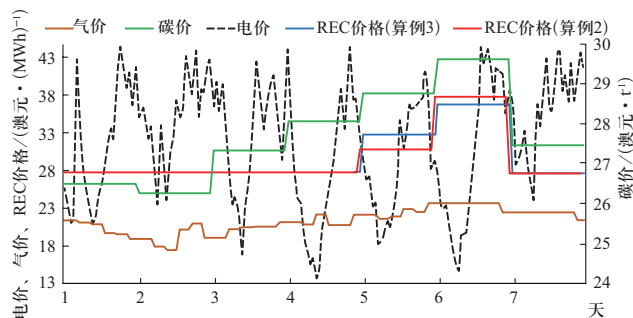


图3 连续7日的电价、气价、REC价格以及碳价

Fig. 3 Electricity price, gas price, REC price and carbon price in 7 consecutive days

图4至图6为算例1至3的火电厂和可再生能源发电厂的经济调度结果和REC交易结果。黑线是可再生能源发电厂的可调度能源,面积图代表可再生能源发电厂的实际调度能源,黑线和面积图之间的空白区域代表未利用的可再生能源。与算例1相比,算例2和算例3消纳了更多的可再生能源,因为REC的交易(绿色和橙色面积)确保了可再生能源的优先调度,且算例3的可再生能源利用率略高于算例2。此外,由于P2G和可再生能源发电厂的合作,REC的销售量增加,这必将增加联盟的总收入。从火电机组的出力看,算例3比算例1和2更平滑,这是因为当可再生能源发电厂与P2G合作时,P2G能够调节频率,平滑可再生能源输出。但在算例1和2中,这项工作是由火电机组完成的,将导致其输出随间歇性可再生能源波动。

不同算例中每个参与者的最终收益和净利润如表2所示。算例1的社会总收益和净利润均小于算例2和算例3,这是因为算例1没有考虑REC的交易,可再生能源发电厂失去了REC交易的利润。如果在所有算例中都除去REC的收益,算例1的总收益最大,因为算例1假设了完全竞争的市场,寡头市场会损失社会福利。当REC应用于算例2时,可再生能源发电厂的收益从2.22亿澳元增至2.65亿澳元,因为它们可以获得额外利润。然而,在纳什均衡点,P2G的收益仍然很

表 2 参与者的收益与净利润
Table 2 Participants' revenue and net profit

算例	参与者/联盟收益			社会总收益	净利润
	每个参与者总收益	出售电/气收益	碳交易/REC收益		
1	$R^{P2G}=0.17$	0.14	0.03	5.05	4.43
	$R^{RNB}=2.22$	2.22	—		
	$R^G=2.66$	2.66	—		
2	$R^{P2G^*}=0.15$	0.13	0.02	5.28	4.88
	$R^{RNB^*}=2.65$	2.34	0.31		
	$R^{G^*}=2.48$	2.48	—		
3	$R^{P2G,RNB^*}=3.31$	2.56	0.75	5.34	4.93
	$R^{G^*}=2.03$	2.03	—		

低，仅1500万澳元。为了获得更大的市场份额，算例3考虑了P2G和可再生能源发电厂的合作博弈模型，在纳什均衡下，联盟的总收益增至3.31亿澳元，火力发电厂的收益从2.48亿澳元下降到2.03亿澳元，表明竞争是成功的，联盟是有结合力的。

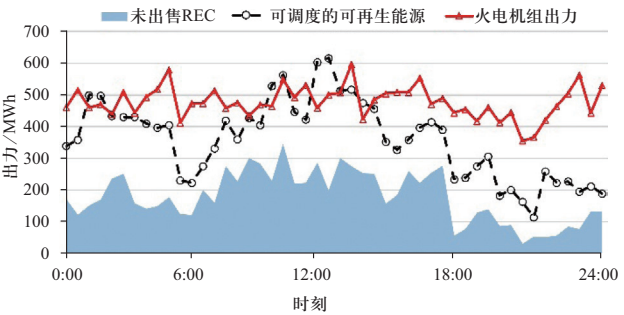


图 4 火电及可再生能源机组出力（算例1）
Fig. 4 Output of thermal generators and renewable plants (Case 1)

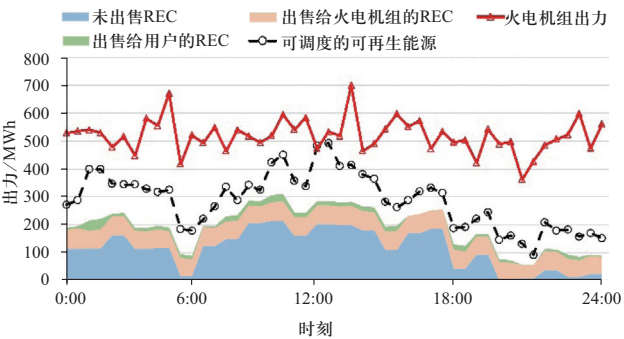


图 5 火电及可再生能源机组出力（算例2）
Fig. 5 Output of thermal generators and renewable plants (Case 2)

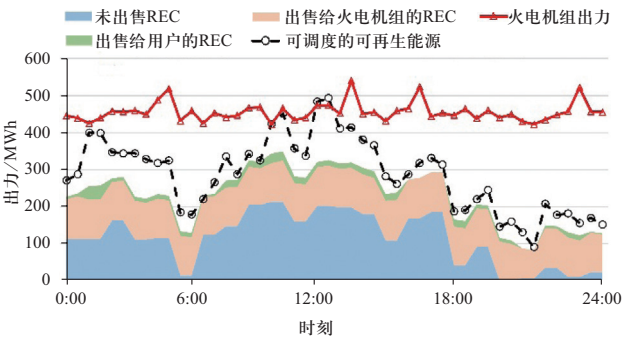


图 6 火电及可再生能源机组出力（算例3）
Fig. 6 Output of thermal generators and renewable plants (Case3)

5.3 敏感性分析

本节将研究纳什均衡点及仿真结果对不同参数的敏感性，尤其是当ETS和REC两种机制并行运行时，碳市场将如何影响REC市场。

5.3.1 碳价的影响

碳价在本文模型中是一个外部参数，它由电力系统以外的许多因素决定。每个参与者的策略不能在很大程度上影响碳价，因此参与者只能是价格的接受者。表3展示了当碳价发生变化时，纳什均衡点、REC价格和系统排放将如何变化。可再生能源发电厂与P2G联盟的收益与碳价正相关，对碳价上涨的敏感性比碳价下降更强。火力发电厂的收益与碳价负相关。REC的价格可能随碳价变化，但当碳价上涨或下降在5%以内时，REC的价格保持不变。碳排放量随碳价上涨而减少，当碳价上涨至10%时，碳排放量的变化较为敏感。

表 3 基于碳价的敏感性分析
Table 3 Sensitivity analysis based on carbon price

碳价变化	可再生能源与P2G联盟收益变化 $\Delta R^{P2G,RNB^*}$	火电机组收益变化 ΔR^{TG^*}	REC价格变化 $\Delta \pi^{GC}$	Δ 排放量
-10	-0.61	1.2	-12.3	0.13
-5	-0.42	0.43	0	0.07
5	5.7	-1.3	0	-0.13
10	6.1	-2.5	10.7	-3.4

5.3.2 碳配额的影响

表4展示了当分配的碳配额发生变化时，仿真结果将如何变化。当配额数量减少时，可再生能源发电厂与P2G联盟的收益增加，而火力发电厂的收益减少，且火力发电厂的收益对配额的变化更为敏感。配额的轻微减少不会影响REC的价格。但如果降低20%，由

于市场需求的变化, REC的价格将上涨14.5%。至于排放量, 当配额大幅减少时, 其变化也很敏感。

表4 基于碳配额的敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis based on carbon allowances

碳配额	可再生能源与 P2G联盟收益 变化 $\Delta R^{P2G, RNB*}$	火电机组收 益变化 ΔR^{TG*}	REC价 格变化 $\Delta \pi^{GC}$	Δ 排放量 %
90	0.61	-1.7	0	-0.24
85	0.88	-5.4	0	-1.34
80	1.2	-6.4	14.5	-4.56

6 结论

ETS与REC是国际上促进碳减排的2种主要市场政策工具。本文提出了一种包涵ETS与REC两种机制且引入P2G参与的发电交易模型, 并以澳大利亚的政策和市场为背景在IEEE 30节点系统上进行了仿真, 研究得到以下结论。

1) 通过允许火力发电厂购买REC增加碳排放配额, 将REC的主要购买者从电力消费者转变为火力发电厂, 可以增加REC的购买动机, 因此, 成熟的ETS可以推动REC市场的发展, 在保障各方收益的情况下实现碳减排。

2) 在模型研究中, 通过引入P2G与可再生能源发电厂合作以提高其收益, 并考虑与现实接近的寡头电力市场条件, 建立了基于合作博弈的双层优化模型, 上层目标是每个参与者收益最大化, 下层目标是ISO系统总成本最小; 通过KKT条件将3个双层模型转化为3个单层模型, 可以用分布式迭代求得纳什均衡点, 并带入电网模型进行系统计算。

3) 以澳大利亚政策和市场为背景的IEEE 30节点系统的仿真计算表明, 考虑REC交易的可再生能源发电厂与P2G合作有助于增加其收入, 减少火力发电机组收益, 促进电力部门整体碳减排; 另外, 碳价敏感性分析也揭示了碳市场对REC交易市场的影响。

4) 根据本文研究, 澳大利亚可以将ETS与REC市场相结合以提高REC的认购率, 进一步促进碳减排。

因电力系统结构、市场环境、体制机制等差异, 不同国家和地区ETS与REC的具体规则有较大差别。当前中国正在加快推进全国碳交易市场, 同样存在REC认购率很低的问题, 本文研究可以为中国ETS与REC如何协同提供启示。

参考文献

- [1] 翁玉艳, 张希良, 何建坤. 全球碳市场链接对实现国家自主贡献减排目标的影响分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 27-33.
WENG Yuyan, ZHANG Xiliang, HE Jiankun. Impacts of the linkage of global carbon markets on the achievement of emissions reduction targets in nationally determined contributions[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 27-33(in Chinese).
- [2] SHAO M, JEWELL W T. CO₂ emission-incorporated AC optimal power flow and its primary impacts on power system dispatch and operations[C]// Proceedings of the IEEE PES General Meeting, 2010.
- [3] ZHANG N, HU Z G, DAI D H, et al. Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 420-427.
- [4] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. Multi-objective operation management of a multi-carrier energy system[J]. Energy, 2015, 88: 430-442.
- [5] XENOPHON A K, HILL D J. Emissions reduction and wholesale electricity price targeting using an output-based mechanism[J]. Applied Energy, 2019, 242: 1050-1063.
- [6] LU Z G, FENG T, LU C Y, et al. Carbon dioxide capture and storage planning considering emission trading system for a generation corporation under the emission reduction policy in China[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(1): 43-52.
- [7] ZHOU X, JAMES G, LIEBMAN A, et al. Partial carbon permits allocation of potential emission trading scheme in Australian electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 543-553.
- [8] HUANG J, XUE Y S, JIANG C, et al. An experimental study on emission trading behaviors of generation companies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1076-1083.
- [9] LI X R, YU C W, XU Z, et al. A multimarket decision-making framework for GENCO considering emission trading scheme[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4099-4108.
- [10] LU S Y, WU Y W, LOU S H, et al. A model for optimizing spinning reserve requirement of power system under low-carbon economy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1048-1055.
- [11] WANG J, KORITAROV V, KIM J-H. An agent-based approach to modeling interactions between emission market and electricity market[C]// Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
- [12] OLSEN D J, DVORKIN Y, FERNÁNDEZ-BLANCO R, et al. Optimal carbon taxes for emissions targets in the electricity sector[EB/OL]. 2018. <https://arxiv.org/abs/1804.06464>.

- [13] YANG Dechang, HE Shaowen, CHEN Qiuyue. Bidding strategy of virtual power plant considering carbon-electricity trading[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 306-314.
- [14] CHENG Y H, ZHANG N, LU Z X, et al. Planning multiple energy systems toward low-carbon society: a decentralized approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4859-4869.
- [15] CHENG Y, ZHANG N, KANG C. Bi-level expansion planning of multiple energy systems under carbon emission constraints[C]// Proceedings of the 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2018.
- [16] CHENG Y H, ZHANG N, ZHANG B S, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1307-1318.
- [17] POURAKBARI-KASMAEI M, LEHTONEN M, CONTRERAS J, et al. Carbon footprint management: a pathway toward smart emission abatement[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 935-948.
- [18] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [19] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
- LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97(in Chinese).
- [20] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电—热—气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13.
- QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13(in Chinese).
- [21] 郑爽. 中国碳交易市场建设[J]. 中国能源, 2014, 36(6): 9-12.
- ZHENG Shuang. China's carbon trading market construction[J]. Energy of China, 2014, 36(6): 9-12(in Chinese).
- [22] 何晶晶. 构建中国碳排放权交易法初探[J]. 中国软科学, 2013(9): 10-22.
- HE Jingjing. Legal considerations on establishing China's carbon emissions trading law[J]. China Soft Science, 2013(9): 10-22(in Chinese).
- [23] HULSHOF D, JEPMA C, MULDER M. Performance of markets for European renewable energy certificates[J]. Energy Policy, 2019, 128: 697-710.
- [24] APARICIO N, MACGILL I, RIVIER ABBAD J, et al. Comparison of wind energy support policy and electricity market design in Europe, the United States, and Australia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 809-818.
- [25] WONG P K C, KALAM A, BARR R. Modelling and analysis of practical options to improve the hosting capacity of low voltage networks for embedded photo-voltaic generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(5): 625-632.
- [26] NICOLIU R, IONEL I, VODA I. The evolution of green certificate support scheme for promoting renewable energy in Romania[C]// Proceedings of the 2017 International Conference on Energy and Environment (CIEM), 2017.
- [27] ZHANG Q, WANG G, LI Y, et al. Substitution effect of renewable portfolio standards and renewable energy certificate trading for feed-in tariff[J]. Applied Energy, 2018, 227: 426-435.
- [28] HUSTVEIT M, FROGNER J S, FLETEN S E. Tradable green certificates for renewable support: The role of expectations and uncertainty[J]. Energy, 2017, 141: 1717-1727.
- [29] LI X Z, WANG W Q, WANG H Y, et al. Dynamic environmental economic dispatch of hybrid renewable energy systems based on tradable green certificates[J]. Energy, 2020, 193: 116699.
- [30] 刘文平. 绿色电力证书交易机制研究[J]. 工程技术研究, 2017(8): 16.
- LIU Wenping. Trading mechanism research of tradable green certificates[J]. Engineering and Technological Research, 2017(8): 16(in Chinese).
- [31] 张浩, 赵清松, 石建磊, 等. 中国绿色电力证书交易定价决策研究[J]. 价格理论与实践, 2019(9): 42-45.
- ZHANG Hao, ZHAO Qingsong, SHI Jianlei, et al. Research on the trading pricing strategy of Chinese tradable green certificate[J]. Price: Theory & Practice, 2019(9): 42-45(in Chinese).
- [32] 王强, 谭忠富, 谭清坤, 等. 基于优惠价格的绿色电力证书交易模型[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 172-177.
- WANG Qiang, TAN Zhongfu, TAN Qingkun, et al. Trading model of green electricity certificate considering preferential prices[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 172-177(in Chinese).
- [33] 董福贵, 时磊. 可再生能源配额制及绿色证书交易机制设计及仿真[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 113-122.
- DONG Fugui, SHI Lei. Design and simulation of renewable portfolio standard and tradable green certificate mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 113-122(in Chinese).
- [34] FUDENBERG D, TIROLE J. Game theory[M]. MIT Press, 1991.
- [35] OSBORNE M J, RUBINSTEIN A. A course in game theory[M]. MIT Press, 1994.
- [36] MANKIW N G. Principles of economics[M]. Cengage Learning, 2020.

- [37] SUN W G, ZAMANI M, HESAMZADEH M R, et al. Data-driven probabilistic optimal power flow with nonparametric Bayesian modeling and inference[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1077-1090.
- [38] SINHA A, MALO P, DEB K. A review on bilevel optimization: from classical to evolutionary approaches and applications[EB/OL]. 2017. <https://arxiv.org/abs/1705.06270>.
- [39] ROSEN J B. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave N-person games[J]. Econometrica, 1965, 33(3): 520.
- [40] LIANG Y L, WEI W, WANG C. A generalized Nash equilibrium approach for autonomous energy management of residential energy hubs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(11): 5892-5905.
- [41] AEMO. National electricity market: data-dashboard[DB/OL]. [2020-11]. <https://www.aemo.com.au/Electricity/National-Electricity-Market-NEM/Data-dashboard>.
- [42] AEMO. Wholesale gas market: data-dashboard[DB/OL].[2020-11]. <https://www.aemo.com.au/Gas/Declared-Wholesale-Gas-Market-DWGM/Data-dashboard>.
- [43] COMMTRADE. Carbon price[DB/OL].[2020-11]. <https://www.commtrade.co.nz/>.

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-16。



陶悦川

作者简介:

陶悦川 (1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能电网、电力市场。

孙荣峰 (1974), 男, 研究员, 研究方向为低碳能源减排。

姜建国 (1982), 男, 研究员, 研究方向为低碳能源减排。

赖姝颖 (1994), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力金融衍生品。

邱靖 (1986), 男, 博士, 讲师, 研究员, 研究方向为电力系统规划、综合能源系统建模、能源经济学等。通信作者, E-mail: qiuqing0322@gmail.com。

(责任编辑 张宇)