

基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现

冯昌森¹, 谢方锐¹, 文福拴², 张有兵¹, 胡嘉骅³

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江省杭州市 310023; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310007;

3. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江省杭州市 310008)

摘要: 随着可再生能源发电技术的发展和普及,通过市场手段鼓励绿色能源发展的绿证配额制以及限制碳排放量的碳排放权交易制度得到了广泛的应用。目前,中国尚未形成成熟有效的绿证市场与碳排放市场,现行的绿证制度在鼓励可再生能源并网、缓解财政补贴压力等方面的表现不佳,且现行的碳市场对促进减排效果也不明显。文中提出一种绿证和碳联合交易市场模式,将绿色发电企业与传统化石能源发电企业联系起来,通过全局优化配置绿证和碳排放权资源以激励可再生能源发电和限制传统化石能源机组的碳排放量,从而推动能源转型。为保护绿证与碳排放市场交易数据的安全性和用户隐私,文中基于以太坊平台构建“去中心化”的双边联合交易市场。最后,算例仿真结果验证了所提基于区块链技术的双边联合交易模式的有效性。

关键词: 可再生能源配额制; 绿证; 碳交易; 区块链; 联合交易市场

0 引言

随着可再生能源的发展,增强电网对以风力发电、光伏发电为代表的间歇性可再生能源发电的消纳能力是一项重要课题^[1-2]。为缓解目前可再生能源发电面临的利用效率低、市场竞争力差的问题,鼓励环境友好的可再生能源发电,国际上提出了可交易绿色电力证书(下文简称“绿证”)与碳排放权的概念,并在一些国家得到应用。

可再生能源发电具有电能和环境双重价值,其环境价值可以由绿证来表征。绿证是一种对可再生能源环境价值货币化的手段,是可转让、可交易的有价证券^[3]。碳排放权交易将多余的碳排放份额视为商品,通过市场进行自由交易。碳排放权交易在通过配额限制碳排放的同时,利用市场手段提高低碳产业竞争力,促进可再生能源发电的发展。

目前,学术界针对绿证市场与电力行业内碳市场开展了广泛的研究。在绿证市场方面,文献[3]研究了可再生能源价格随供求关系在常规能源价格和绿证价格之和下方波动的动态均衡过程;文献[4-5]建立了边际价格模型和两阶段期权博弈模型,分析了影响绿证价格的主要因素;文献[6]探讨了绿证

在平衡光伏发电并网价格方面的作用;文献[7]构建了一个互补的、多区域综合绿证与电力市场模型,分析了绿证对促进可再生能源发电的经济影响,并证明绿证对可再生能源发电企业的市场竞争力有促进作用。

在碳排放权市场方面,文献[8-11]分别采用了熵权法、两级分配、选举机制讨论并设计了与交易市场相匹配的绿证、碳排放配额分配方法;文献[12]讨论了碳排放配额制下的交易决策及利益分配策略;文献[13]基于总量管制和交易(cap-and-trade)模式,对中国的碳减排项目进行分析,给出碳排放评级方法并对碳市场价格进行预测;文献[14-15]分析了欧盟碳排放交易系统(European Union Emission Trading System, EU ETS)与欧洲电力市场之间的相互作用;文献[16]模拟能源排放市场,分析了能源价格以及排放配额对市场的影响,并提供机制的改进与调整方向。现有文献关于绿证市场和碳市场的研究多集中于交易报价、初始配额分配、市场评估和协调机制等领域。

目前,关于碳市场与绿证交易的联合市场的相关研究仍较少。碳市场与绿证交易市场的目的均是节能减排与生态环境的可持续发展,因此有必要考虑两者的联合市场设计。此外,绿证与碳排放权市场对交易信息的准确性和安全性要求较高,交易主体需要对数据异步更新。对于传统的交易市场这是个很大的挑战,而区块链技术则为此提供了一种可

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2021-04-24。

上网日期: 2021-08-11。

国家自然科学基金资助项目(51777193)。

行思路。

文献[17]通过区块链技术实现了电动汽车充电的连续双边拍卖机制,通过需求响应机制引导电动汽车放电以平衡当地电力需求。文献[18]基于智能合约构筑了电网能源需求平衡和能源生产规则。文献[19]建立了基于信誉的区块链碳交易市场,提出新型的排放权交易计划以实现降低排放量与促进减排技术发展的双重目标。文献[20]提出了一种适应产消者角色的区块链点对点(P2P)能源与碳交易市场,在实现区域能源平衡的基础上减少了碳排放。文献[21]提出碳信用额度概念,利用区块链技术建立了开放式的交易市场。文献[22]基于区块链技术设计了电力行业碳交易体系整体框架与碳配额成本决策、减排奖惩以及交易匹配模型。文献[23]通过搭建区块链底层网络环境与应用环境建立了一个涵盖核发、交易、核查的绿证流通全生命周期的绿证交易平台。国外公司开发的区块链能源交易平台 TransActive Grid^[24]也已投入商业运行。

基于上述研究,挖掘传统绿证市场与碳市场的潜力,从节能和减排两个角度共同促进绿色能源可持续发展。基于共同的绿色、低碳目标,本文提出一种绿证和碳联合市场交易机制设计,通过全局优化配置绿证和碳排放资源以激励可再生能源发电和限制传统化石能源机组的碳排放量,从而推动能源转型。同时,为保障绿证和碳联合市场交易的安全有效、信息公开透明,通过编写智能合约将所提市场交易机制在以太坊平台进行实现,验证了所提模型和方法的有效性。

1 区块链与智能合约

区块链技术作为一种去中心化、透明化、合约执行自动化且具有可追溯性的数据库技术,其核心优势在于能够保证不同主体之间的相互信任,进而极大减少了维护或重塑信任的成本。区块链网络中的每一个节点拥有同样的权限,任意节点的故障异常都不会影响整个数据系统的正常运行。链上记录的信息在多个节点进行冗余备份,进行数据信息的更新时需要多个节点共同认证。被记录在链上的信息将被永久储存,链上同时记录了信息的完整传递路径以便追溯。这些都使区块链的数据存储拥有较高的鲁棒性与可靠性。

区块链通过区块的链式结构进行存储,如附录A图A1所示。每个区块的区块头保存区块链自身的状态信息,保证了链式结构的连接与延伸。区块头存储交易记录信息,并反映至区块头的Merkle

Root,保障信息不被篡改。所有记录上链的信息,例如智能电表记录的可再生能源上网电量等,都会经过非对称加密与各区块的多次确认,从而保障上链数据的安全准确可靠。

智能合约^[25]是一种部署于区块链中,在无需第三方参与的情况下,以代码方式形成、验证或执行合约的计算机协议。它保障了区块链在无需第三方监督的条件下高效执行各类脚本算法,适应各类应用场景的逻辑与需求。智能合约与区块链技术的融合增加了交易的灵活性,改变了传统交易系统的顺序执行模式,更适合实际复杂的交易应用场景。智能合约在区块链上的部署如图1所示。

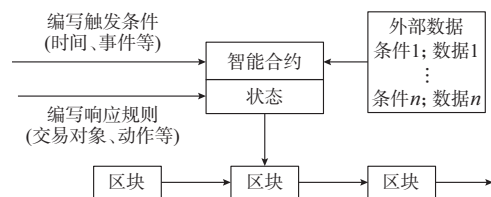


图1 智能合约在区块链上的部署

Fig. 1 Deployment of smart contract in blockchain

在绿证与碳排放交易市场中,智能合约除负责对交易市场内产消者报价进行匹配出清,还可以履行监管部门的职责,实现对交易信息的自动检测,例如实际碳排放量数据的核查、绿证交易时对绿证所有权和有效期的确认等。

2 基于区块链的绿证和碳联合市场

2.1 现有绿证交易市场与碳排放权交易市场

国家可再生能源信息管理中心在2017年核发了中国首批绿证,并于2017年7月1日起试运行绿证自愿认购交易。但截至2020年7月,仅有2200名认购者累计认购了37916个绿证。其中,风电累计交易量占核发量的比例不足0.2%;光伏累计交易量占核发量的比例更是不足0.1%^[26]。现行模式下几乎无法发挥绿证作为可流通交易证券的功能,有悖于绿证提出时的主要目的,即通过市场手段填补可再生能源补贴资金的巨大缺口^[27]。

目前,国际上大部分国家和地区的绿证市场选定售电商或供电商作为履责主体来承担配额目标,如表1所示。澳大利亚、英国、意大利、美国多数州都采用等比例法将配额目标分摊到各履责主体^[28]。例如:澳大利亚规定2020年电力供应中20%为可再生能源;美国得克萨斯州的配额要求是2025年可再生能源装机容量达到10GW。

由于国外电力市场的市场化程度远高于国内,

表1 国际上主要的绿证市场
Table 1 Major green power certificate markets in the world

绿证市场所在国家或地区	履约主体	发展目标
英国	供电企业	2015年可再生能源发电占电力供应15.4%
美国加利福尼亚州	售电企业	2030年可再生能源发电占电力销售50%
美国马萨诸塞州	售电企业	2030年可再生能源发电占电力销售25%
意大利	发电企业	2012年可再生能源发电占上网电量75%
韩国	供电企业	2022年可再生能源发电占电力供应10%
日本	供电企业	2014年可再生能源售电达160 TW·h
澳大利亚	售电企业	2020年可再生能源发电占电力供应20%

注:日本与意大利2012年后改为实行固定电价制度;英国2017年后改为实行差价合约制度。

中国的绿证市场不能照搬国外经验。2019年5月10日,国家发改委和国家能源局发布的《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》^[29]中规定,中国按省级行政区域对电力消费设定可再生能源电力消纳责任权重,由电网企业承担经营区消纳责任权重实施的组织责任。国家能源局2017年7月17日发布的《让更多人参与绿色电力消费》^[30]一文中同样指出,绿证的主要使用者应为火力发电企业。同时,以发电侧的化石能源发电企业作为绿证配额履责主体的相关交易市场机制^[9]、国家级与省级市场协调方案^[31]以及与结合电力批发市场的综合能源优化与绿证交易^[32]等相关研究都已取得一定成果。因此,在现阶段中国绿证市场中的交易主体与履约主体都应是发电企业,这是由中国电力市场化程度及可再生能源发展状况共同决定的。

中国拥有全球最大的碳市场,电力行业的碳排放又是在所有行业中占比最大的,建立一个有效的碳市场对促进电力行业的节能减排具有重要作用。中国碳交易市场于2017年12月19日正式启动^[33],目前碳市场同样存在活力不足的问题。参考国外较为成熟的绿证、碳排放权交易市场,推广强制交易配额制度是一种改进的方式。配额制结合绿证交易可以起到发现可再生能源真实价格、体现可再生能源外部特性的货币价值、引导可再生能源投资和电网规划以及激励可再生能源生产消纳的作用^[34]。

目前,中国的碳排放配额多数仍处于免费分配阶段,但未来极有可能由免费配额逐步转向拍卖。

欧盟体系已经通过拍卖的方式分配了一定比例的碳配额^[35],而美国的区域温室气体减排组织(Regional Greenhouse Gas Initiative, RGGI)则是完全通过拍卖分配配额^[16]。欧洲排放交易系统采取了总量管制和交易规则对各成员国和企业分配碳排放限额,当实际排放量小于限额时,可以将剩余碳排放权出售获利,反之则需要购买。目前,国际上主要的碳市场交易机制如表2所示。国际上各类碳交易所使用的碳商品为“碳排放权”^[36]。而中国碳市场目前使用的商品为中国核证减排量(China certified emission reduction, CCER)与碳排放配额。中国试行的碳排放权交易^[37]则通过将碳排放配额与核证减排量2种商品折算为碳排放权余额进入碳市场进行交易,见图2。

表2 国际主要碳市场
Table 2 Major carbon markets in the world

国家或地区/碳市场	交易主体/履约主体	交易机制
欧盟/EU ETS	发电企业/国家 (落实到发电企业)	总量管制和交易
美国加利福尼亚州/CA CAT	发电企业/各州 (落实到发电企业)	总量管制和交易
美国康涅狄格等7州/RGGI	发电企业/各州 (落实到发电企业)	总量管制和交易
美国7州与加拿大4省/WCI	所有行业碳排放主体/各州(省)	总量管制和交易
美国芝加哥/CCX	会员公司/会员公司	总量管制和交易
澳大利亚/GGAS	发电企业/售电企业	总量管制和交易

注:芝加哥气候交易所(CCX)以会员制运营,会员涉及航空、电力、环境、汽车、交通等数十个不同行业。

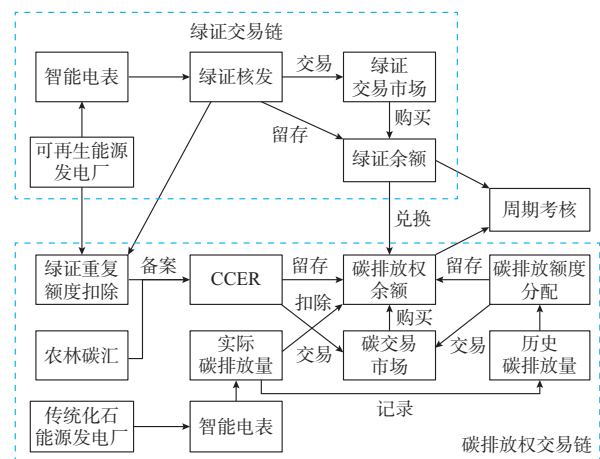


图2 绿证和碳联合市场交易机制
Fig. 2 Trading mechanism of joint market for green power certificate and carbon

2.2 配额制下的联合交易市场

本文所提配额制下的绿证交易市场流程为:交易市场开启前,政府及监管部门审查并生成可再生

能源发电公司绿证资质。以每个配额制定周期内发电公司实际上网的绿色电量来确定核发绿证数量。获得绿证后发电公司通过密封报价方式进入绿证市场,经过连续双向拍卖(continuous double auction, CDA)机制匹配达成交易后,绿证的所有权转移到买方用户。在交易前与交易后都需要对被交易绿证的所有权、有效周期(每张绿证有效期为一个配额制定周期)进行确认。在配额制定周期结束前,监管部门对各产消者所持绿证的有效性和所有权进行检查,即兑付。经过兑付的绿证即失去有效性。对未达到目标配额的产消者以买断的方式进行惩罚。

配额制下碳市场中碳排放权的交易流程与绿证类似。交易市场开启前,监管部门对参与碳市场的各产消者提供初始碳排放权配额。进入配额制定周期后,监管部门通过产消者处的智能电表记录每个配额制定周期内用户的实际碳排放量。超出碳排放配额的用户与有碳排放权余量的用户根据自身需求进行密封报价,经CDA机制匹配达成交易后进行碳排放权的转移。在交易前与交易后同样需要对被交易碳排放的所有权、有效周期进行确认。在配额制定周期结束前,监管部门兑付各产消者的碳排放权。对超出目标配额的产消者以买断的方式进行惩罚。

在联合市场中,绿证与碳排放额的撮合匹配阶段结束后,若还存在有绿证余量的产消者与碳排放权仍未满足的产消者,将绿证根据式(1)折算为可抵消的碳排放权数量,再次进行撮合匹配,直至所有产消者的绿证被全部消耗或所有产消者的碳排放权限额得到满足。

$$\eta = \alpha \frac{p_c}{p_g} \quad (1)$$

式中: η 为折算比例; α 为交易价格调整参数,与当地可再生能源类型、联合市场运行期间气候条件以及当地燃煤价格有关; p_c 为本轮联合市场中绿证交易的边际价格; p_g 为本轮联合市场中碳排放权交易边际价格。

2.3 联合市场运行机制

基于区块链的绿证与碳排放权联合交易市场运行机制如图2所示。图2所示的绿证和碳联合市场包括绿证区块链和碳排放权区块链,以及两条链的交互。

绿证交易区块链:智能电表准确记录可再生能源上网电量,并根据链上内置规则自动核发绿证。拥有绿证配额的企业都可以进入绿证交易市场进行交易,可再生能源发电厂通过出售绿证获得经济利

益以获得绿电补贴,化石能源发电商通过购买绿证获得相应绿证完成配额指标,通过市场手段完成对绿电企业的补贴。所有绿证交易均在链上完成,保障交易的可靠性,并简化监管过程。

碳排放权交易区块链:CCER由核证的可再生能源与农林碳汇等减排项目上链组成。碳配额则根据链上记录的历史碳排放量按内置规则生成,公开透明。智能电表记录当前周期传统化石能源发电厂的实际碳排放量,若在本轮市场中实际碳排放量小于企业拥有的碳排放权余额,则该企业可持有多余的碳排放权作为碳排放权交易的卖方进入市场;若本轮市场中实际的碳排放量大于企业持有的碳排放权余额,则该企业作为碳排放权交易的买方进入市场。碳配额则根据链上记录的历史碳排放量按内置规则生成,公开透明。

联合市场机制:图2中两交易链之间的箭头表示两条交易链的交互,由于部分可再生能源同时满足绿证核发和碳排放权中CCER的标准,故在联合交易前需要将绿证区块链中的绿证核发信息同步至碳排放权区块链,扣除重复额度。当绿证与碳排放权分别出清后,持有绿证余额的企业可以根据当前周期的绿证与碳排放权的边际价格将其转化为碳排放权余额,再次进入市场进行交易,实现绿证和碳资源的全局配置。

根据市场交易机制与竞价机制,市场监管者部署智能合约到区块链网络中作为绿证与碳排放权公共智能合约来使用。发电企业作为市场主体需要注册既定结构体的节点账户。若交易主体认可该智能合约,则通过合约地址调用合约,用于市场主体之间的交易与价值转移。基于智能合约的绿证和碳排放联合交易流程如图3所示,有以下步骤。

步骤1:在联合市场配额制定周期开启前,政府及监管部门对参与联合交易市场的各产消者制定绿证和碳排放配额;各市场主体在区块链网络中注册账户,网络返回各个用户的唯一公钥与私钥;监管部门根据市场机制与竞价机制制定智能合约框架。

步骤2:通过资质审查的可再生能源发电公司经过智能电表对上网绿电计量后获得相应数量的绿证;智能电表记录各产消者的实际碳排放量;各产消者根据自身需求向网络中密封申报绿证与碳排放权报价信息,包含交易量和价格。

步骤3:参与者通过访问地址调用智能合约,制定包括交易对象、截止时间、合约自动执行的条件等,并用各自私钥进行签名,以保证合约的有效性,合约基于CDA机制对各产消者的报价进行撮合

匹配。

步骤4:执行的合约通过P2P的方式在区域能源网络中广播,最新的合约将集中打包为区块传播到交易市场网络中。

步骤5:通过共识机制验证的合约在区块链网络传播并存入区块链,交易节点通过客户端接口调用此前得到网络认可的合约,节点会将此合约先保存到内存中。当交易开始后,发送请求,启动状态机

对出清合约执行匹配出清操作,结算合约再根据每笔交易的具体细节进行转账操作,在规定时间内经部分节点验证后达成一致,智能合约执行完成。

步骤6:联合交易市场配额制定周期结束前,对各产消者在周期内的绿证与碳排放权的数量进行结算,超出配额部分的绿证可抵消超出配额部分的碳排放。记录各产消者绿证与碳排放权的数量,作为下一周期配额制定的依据。

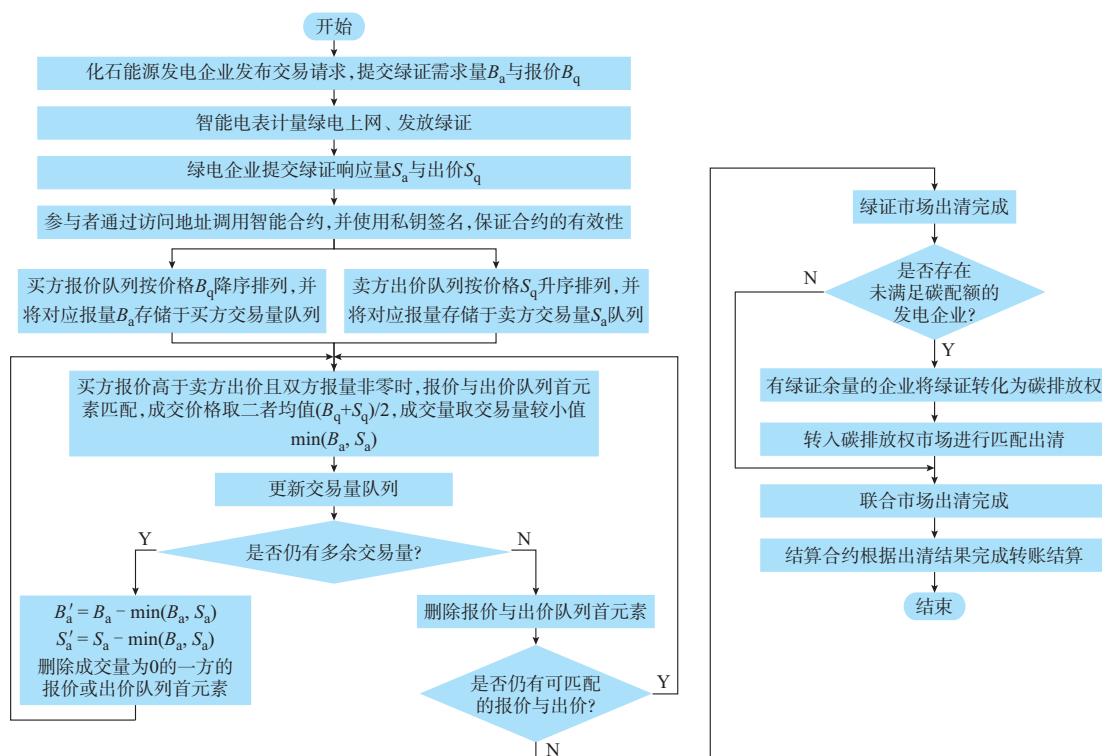


图3 基于智能合约的绿证和碳联合交易流程

Fig. 3 Flow chart of joint trading for green power certificate and carbon based on smart contract

2.4 配额目标及分配

国际上常用的2种配额目标指定方法有可再生能源发电总量目标和比例目标。国家能源局2018年3月发布的《可再生能源电力配额目标及考核办法(征求意见稿)》确定各省(区、市)可再生能源电量消纳占比等于各省(区、市)可再生能源消纳量除以本地区全社会用电量。由此可设定绿证配额目标。

$$0 \leq R = \frac{Q_r^p}{Q_t^p} \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_{r,i}^p = Q_r^p \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_{r,i}^p + \sum_{j=1}^n Q_{r,j}^p = Q_r^p \quad (4)$$

式中: R 为时段 T 的配额比例目标; Q_r^p 为时段 T 内可再生能源预计发电总量; Q_t^p 为时段 T 内全社会预计

用电总量; $Q_{r,i}^p$ 和 $Q_{r,j}^p$ 分别第 i 个可再生能源生产者和第 j 个化石能源发电公司在时段 T 内预计发电量; m 为区域内可再生能源发电公司总数; n 为区域内化石能源发电公司总数。

可再生能源发电公司的绿证配额目标为:

$$A_{g,i}^r = \alpha' Q_{r,i}^p \quad (5)$$

式中: $A_{g,i}^r$ 为本周期可再生能源发电公司 i 对应的绿证配额; α' 为可再生能源出力标准参数,由历史出力数据与当期天气情况(光照、风力)确定。

设 λ_j 为第 j 个化石能源生产者在上一周期的配额完成比。当 $\sum_{j=1}^n \lambda_j < n$ 时,即上一周期存在未完成配额的生产者时,本周期配额按式(6)至式(8)进行分配。

$$A_{g,j}^p = [B\theta_g + C(1 - \theta_g)](1 - R)Q_t^p \quad (6)$$

$$B = \frac{Q_{l,j}}{\sum_{j=1}^n Q_{l,j}} \quad (7)$$

$$C = \frac{1 - \lambda_j}{\sum_{j=1}^n (1 - \lambda_j)} \quad (8)$$

式中： $A_{g,j}^p$ 为本周化石能源发电公司 j 对应的绿证配额； B 为生产者装机容量占区域总装机容量的比例； C 为上一周期生产者完成配额比例的相对值； $Q_{l,j}$ 为化石能源发电公司 j 的装机容量； θ_g 为绿证配额分配调整参数，其数值由实际弃风、弃光等问题确定； $(1 - R)Q_p^r$ 为区域绿证需求量； RQ_p^r 为可再生能源发电公司绿色发电配额。

当 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = n$ 时，即上一周期不存在未完成配额的生产者时，本周配额按式(9)进行分配。

$$A_{g,j}^p = 0.1(1 - R)Q_p^r \frac{Q_{l,j}}{\sum_{j=1}^n Q_{l,j}} \quad (9)$$

设 μ_j 为第 j 个化石能源生产者在上一周期的碳排放配额完成比。当 $\sum_{j=1}^n \mu_j > n$ 时，即上一周期存在超出配额的生产者时，本周配额按式(10)、式(11)进行分配。

$$A_{c,j}^p = [B\theta_c + D(1 - \theta_c)]dQ_p^r \quad (10)$$

$$D = \frac{\mu_j - 1}{\sum_{j=1}^n (\mu_j - 1)} \quad (11)$$

式中： $A_{c,j}^p$ 为本周化石能源生产者 j 对应的碳排放配额； d 为化石能源生产者供电时的电量-碳排放转化系数； D 为上一周期生产者完成配额比例的相对值； θ_c 为碳排放配额分配调整参数，其数值由实际碳排放确定。

当 $\sum_{j=1}^n \mu_j \leq n$ 时，即上一周期不存在超出配额的生产者时，本周配额按式(12)进行分配。

$$A_{c,j}^p = dQ_p^r \frac{Q_{l,j}}{\sum_{j=1}^n Q_{l,j}} \quad (12)$$

2.5 基于区块链技术的出清机制实现

本文所提市场机制在区块链上的实现主要分为两部分：①智能合约的编写；②搭建私有链环境运行。本文采用以太坊官方开发环境Remix平台进行智能合约的编写与编译。所使用编程语言为Solidity 0.4版本。同时使用以太坊官方开源软件

Geth客户端作为私有链搭建与测试环境。

搭建私有链需要有一个“创世区块”来对私有链进行初始化。进入Geth客户端中调用已编写好的“创世区块”进行私有链的搭建。私有链搭建完成后，启动节点并通过Web3 Provider环境将编写在Remix上的智能合约部署到私有链上。链上各节点即可调用智能合约实现功能。

智能合约对已提交报价的买卖双方通过CDA规则进行匹配出清，智能合约运行机制如附录A图A1所示，联合市场运行流程如图3所示。

3 算例分析

3.1 场景设计与参数设置

假设有14个产消者参与绿证和碳联合交易市场，其中有12个发电公司(6个风力发电公司和6个传统发电公司)和2个居民用户。用户中有1个安装了屋顶光伏组件。本文假设：①所有带光伏机组/组件的节点均通过了监管部门的资格审查，可以产出绿证；②所有发电公司节点都有绿证配额与碳排放配额；③普通用户节点仅有碳排放配额。

设定2条交易链，分别处理绿证交易与碳排放权交易，2条交易链独立运行，在结算之前，有绿证余量的产消者可以与仍未满足碳排放权需求的产消者进行交易，各节点可进行绿证与碳排放权的兑换。此处以绿证交易链为例阐述交易链的运行逻辑。在仿真中设置一个交易周期^[38]为4个阶段，分别是发布交易阶段、密封报价阶段、P2P撮合匹配阶段和结算阶段，时序如图4所示。

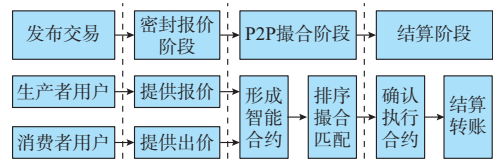


图4 绿证市场交易周期
Fig. 4 Trading cycle of green power certificate market

在发布交易阶段，各个产消者根据自身需求提供报价或出价，分别进入报价队列与出价队列。当满足报价队列内报价数量与出价队列内出价数量同时大于5时自动触发智能合约，报价与出价队列进入P2P撮合阶段。结算阶段的以太币(单位为eth)与人民币的汇率统一取：1 eth=1 500元。在交易周期开始时，假设每个产消者拥有50 eth作为初始资金用于报价。

3.2 仿真计算

按照3.1节设计的场景，共有7位生产者用户和

6位消费者用户参与联合交易市场。联合交易市场开启后,进入密封报价阶段。各产消者根据自身实际生产绿证数以及实际碳排放量提出报价。在仿真实验中,假设每个产消者报价信息如图5、图6所示。7名生产者的出价分别为156、136、145、152、143、148、165元,出价时间分别为116、99、83、96、105、95、49 s;6名消费者的报价分别为171、168、172、153、163、159元,报价时间分别为114、88、106、88、56、74 s。可见,在本轮绿证交易周期的报价环节中,有7名生产者和6名消费者提出了出/报价,每笔出/报价均未超出密封报价的时间段,都是有效出/报价,最终有7名生产者用户和6名消费者用户进入联合交易市场的下一阶段,根据报价时间的先后顺序,将这些用户进行排序撮合。

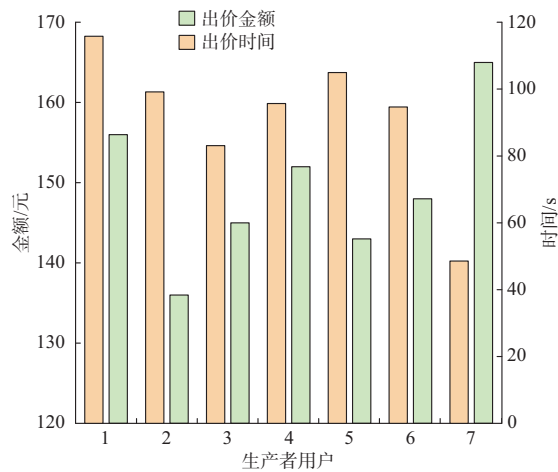


图5 生产者出价数据
Fig. 5 Offer data of producers

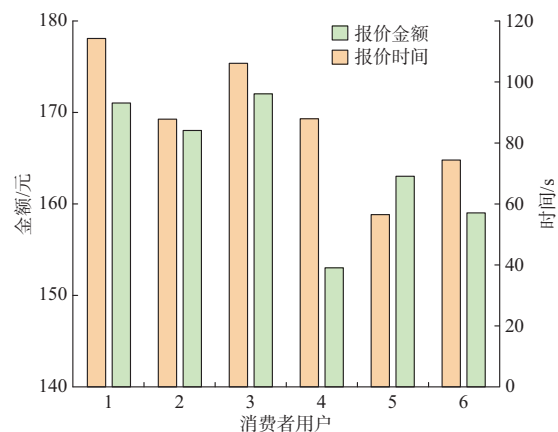


图6 消费者报价数据
Fig. 6 Bidding data of consumers

密封报价后进入P2P撮合匹配阶段。在Remix平台编写智能合约实现2.3节所述的市场机制。核心匹配程序分为2个合约,合约一对各产消者进行初始化设置,包括各产消者的报价、报量等;合约二

将各产消者报价输入各自队列,完成排序撮合匹配操作。在geth客户端调用“创世区块”文件建立私有链mychain,在链上创建并解锁账户以获得私有链上的操作权,通过Web3 Provider将编写在Remix平台上的合约部署于私有链mychain上。接下来调用撮合匹配函数,将能源交易市场的出清逻辑部署至区块链中。使用getTransactionReceipt函数获取交易细节查询结果,如表3所示。

表3 首笔交易的区块信息
Table 3 Block information for the first transaction

区块信息	信息内容
区块号	1
交易价格	154元
交易绿证数量	85张
消耗的Gas	1 183 694
Gas限制	3 000 000
当前区块哈希值	0xd7bb8cd49f434a02816dbf7f68004ee88eb65f74ee408a4f7bfc35bf84ac5b9a

此时生产者、消费者撮合队列的撮合匹配过程已经完成,理论上能够发生的各笔交易也已经全部完成。绿证市场与碳市场的撮合匹配阶段结束后,若还存在有绿证余量的产消者与碳排放权仍未满足的产消者,将绿证折算为可抵消的碳排放权数量,再次进行撮合匹配,直至所有产消者的绿证被全部消耗或所有产消者的碳排放权得到满足。最后进入结算阶段,联合交易市场会根据本轮周期中发生的具体交易情况,对各个产消者进行资金、绿证以及碳排放权结算,并进行转账操作。在私有链中调用函数查看结算后各用户的余额情况,结果见表4。表4中的数值含义为:正数表示该产消者拥有的绿证/碳排放权数量,负数表示该产消者需求的绿证/碳排放权数量。

3.3 仿真结果与分析

通过调用智能合约中编写的相关函数可知,在本轮联合交易市场周期内,共发生了17笔交易。其中绿证交易市场发生了10笔交易,交易绿证数量、双方出/报价及出清情况如图7所示。交易结束时,所有绿证买方的需求均被满足,同时,部分绿证卖方有绿证余量。碳排放市场发生5笔交易,交易碳排放权数量、双方出/报价及出清情况见图8。图7和图8中,蓝线为买方报价信息,红线为卖方出价信息,绿线为成交信息。以图7为例,F(136,180)表示卖方F提供的报价是136元/张绿证,共售出180张;b-F(154,85)表示买方b与卖方F以154元/张绿证的价格达成交易,共交易了85张绿证。

表 4 结算前后各用户余额
Table 4 Customer balance before and after settlement

用户	交易前			交易后		
	余额/元	绿证/张	碳排放权/个	余额/元	绿证/张	碳排放权/个
生产者 A	75 000	110	0	92 160	0	0
生产者 B	75 000	180	0	102 665	0	0
生产者 C	75 000	160	0	99 460	0	0
生产者 D	75 000	130	0	94 825	0	0
生产者 E	75 000	175	0	102 025	0	0
生产者 F	75 000	140	0	96 441	0	0
生产者 G	75 000	50	0	79 950	20	0
消费者 a	75 000	-90	-40	52 725	90(-90)	40(-40)
消费者 b	75 000	-105	45	69 095	105(-105)	0
消费者 c	75 000	-85	55	73 600	85(-85)	0
消费者 d	75 000	-155	-55	39 652	155(-155)	55(-55)
消费者 e	75 000	-145	25	57 995	145(-145)	0
消费者 f	75 000	-205	-100	21 557	345(-205)	30(-100)

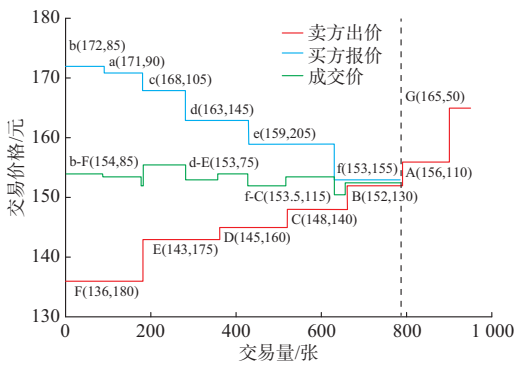


图 7 绿证市场出清结果
Fig. 7 Clearing results of green power certificate market

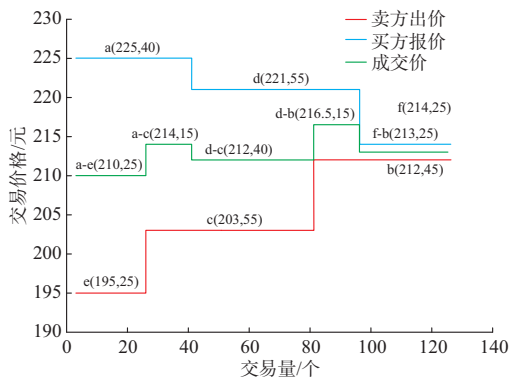


图 8 碳市场出清结果
Fig. 8 Clearing results of carbon market

交易结束时,所有拥有多余碳排放额度的卖方的库存全部清空,仍存在未获得与自身实际碳排放相匹配额度的买方。在完成绿证市场与碳市场的出清后,生产者 A 与生产者 F 仍存在绿证余量,消费者

f 没能在碳市场中购得与自身实际碳排放相应的碳排放权,3 个产消者继续进行撮合匹配,最终消费者 f 通过购买额外的绿证用以抵消自身无法在碳市场满足的多余碳排放量。

由图 7 与图 8 可知,所提联合市场下各产消者可以在区块链平台上进行绿证及碳排放权的交易,以满足自身的绿证及碳排放配额。在绿证市场与碳市场无法完全满足所有产消者需求时,有效整合绿证与碳排放权资源:对可再生能源发电公司来说,可以有效处理周期内生产出的绿证,实现更高的经济效益,避免了因绿证过期造成的浪费;对传统化石能源发电公司来说,通过购买绿证兑换更多的碳排放权,可以避免过多的碳排放量超出碳配额而造成的企业信誉降低和监管部门的高额罚金;对联合市场作用区域电网来说,鼓励了可再生能源发电公司的发电,并通过联合市场转化为实际的经济效益,可以有效促进可再生能源的消纳。

4 结语

为应对化石能源枯竭和全球变暖问题,有效促进可再生能源在配电网中的消纳以及对高耗能发电公司的碳排放限制,本文提出了一种基于区块链技术的绿证和碳联合交易市场机制。运用 CDA 机制设计了去中心化的绿证和碳排放权双边交易流程。本文将绿证交易市场及碳交易市场有机结合,并基于以太坊搭建了去中心化的绿证和碳排放权双边交易平台,调用智能合约实现联合市场的出清。

本文为区块链技术在电力金融领域的阶段性研究。区块链技术在能源领域的应用仍处于初步探索

阶段,尤其是共识算法方面。后续的研究可以致力于寻找一种新的共识算法,在分布式能源调度中有效考虑绿证和碳排放权的市场价值,更准确地衡量绿色发电的经济与环境双重效益。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] 史连军,周琳,庞博,等.中国促进清洁能源消纳的市场机制设计思路[J].电力系统自动化,2017,41(24):83-89.
SHI Lianjun, ZHOU Lin, PANG Bo, et al. China's market mechanism design ideas for promoting clean energy consumption [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (24) : 83-89.
- [2] YU Y, MI Z, ZHENG X, et al. Accommodation of curtailed wind power by electric water heaters based on a new hybrid prediction approach[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 525-537.
- [3] 张翔,陈政,马子明,等.适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究[J].电网技术,2019,43(8):2682-2690.
ZHANG Xiang, CHEN Zheng, MA Ziming, et al. Research on electricity market trading system adapting to renewable energy quota system [J]. Power System Technology, 2019, 43 (8) : 2682-2690.
- [4] 张浩,赵青松,石建磊.中国绿证交易定价决策研究[J].价格理论与实践,2019(9):42-45.
ZHANG Hao, ZHAO Qingsong, SHI Jianlei. Research on the trading pricing strategy of Chinese tradable green certificate [J]. Price: Theory & Practice, 2019(9): 42-45.
- [5] 俞萍萍.绿色证书交易机制下可再生能源发电定价研究:期权博弈模型及数值模拟[J].价格理论与实践,2018(11):38-41.
YU Pingping. Pricing model of renewable energy under tradable green certificate system: option games model and numerical simulation[J]. Price: Theory & Practice, 2018(11): 38-41.
- [6] TU Qiang, MO Jianle, BETZ R, et al. Achieving grid parity of solar PV power in China: the role of tradable green certificate [J]. Energy Policy, 2020, 144, 111681.
- [7] HELGESEN P I, TOMASGARD A. An equilibrium market power model for power markets and tradable green certificates, including Kirchoff's laws and Nash-Cournot competition [J]. Energy Economics, 2018, 70, 270-288.
- [8] 彭谦,周晓洁,杨睿.国家绿证交易市场与省级日前电力市场协调均衡机制设计[J/OL].电网技术[2020-05-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20191127.1536.002.html>.
PENG Qian, ZHOU Xiaojie, YANG Rui. Design of coordination and balance mechanism between national green power certificate trading market and provincial day-ahead power market [J/OL]. Power System Technology [2020-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20191127.1536.002.html>.
- [9] 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.
- [10] 宋旭东,莫娟,向铁元.电力行业碳排放权的初始分配机制[J].电力自动化设备,2013,33(1):44-49.
SONG Xudong, MO Juan, XIANG Tiejuan. Initial allocation mechanism of carbon emission permit in electric power industry [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33 (1) : 44-49.
- [11] 梅天华,边巧燕,谢俊,等.考虑碳排放权的低碳电力调度及收益分摊[J].电力系统自动化,2016,40(22):49-55.
MEI Tianhua, BIAN Qiaoyan, XIE Jun, et al. Low-carbon power dispatching and benefit allocation considering carbon emission allowance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 49-55.
- [12] 赵双,潘险险,林俐.碳排放配额托管业务中联合系统交易决策及利润分配策略[J].电力系统自动化,2020,44(16):30-36.
ZHAO Shuang, PAN Xianxian, LIN Li. Trading decision and profit distribution strategy of joint system in carbon emission quota custody business [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 30-36.
- [13] SHANG Tiancheng, YANG Lan, LIU Peihong, et al. Financing mode of energy performance contracting projects with carbon emissions reduction potential and carbon emissions ratings[J]. Energy Policy, 2020, 144: 111632.
- [14] ANKE C P, HOBBI E H, SCHREIBER S, et al. Coal phase-outs and carbon prices: interactions between EU emission trading and national carbon mitigation policies [J]. Energy Policy, 2020, 144, 111647.
- [15] WEIGT H, ELLERMAN D, DELARUE E. CO₂ abatement from renewables in the German electricity sector: does a CO₂ price help?[J]. Energy Economics, 2013, 40: 149-158.
- [16] DORMADY N C. Carbon auctions, energy markets & market power: an experimental analysis [J]. Energy Economics, 2014, 44: 468-482.
- [17] KANG Jiawei, YU Rong, HUANG Xuming, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13 (6) : 3154-3164.
- [18] CLAUDIA P, TUDOR C, MAECEL A, et al. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids[J]. Sensors, 2018, 18(1): 1-21.
- [19] KHAQQI K N, SIKORSKI J J, HADINOTO K, et al. Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application [J]. Applied Energy, 2018, 209: 8-19.
- [20] HUA Weiqi, JIANG Jing, SUN Hongjian, et al. A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets[J]. Applied Energy, 2020, 279: 115539.
- [21] KAWASMI E A, ARNAUTOVIC E, SVETINOVIC D. Bitcoin-based decentralized carbon emissions trading

- infrastructure model[J]. System Energy, 2015, 18: 115-130.
- [22] 杜晓丽, 梁开荣, 李登峰. 基于区块链技术的电力行业碳减排奖惩及碳交易匹配模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 29-35.
DU Xiaoli, LIANG Kairong, LI Dengfeng. Reward and penalty model of carbon emission reduction and carbon trading matching model for power industry based on blockchain technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 29-35.
- [23] 蔡元纪, 顾宇轩, 罗钢, 等. 基于区块链的绿色证书交易平台: 概念与实践[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 1-12.
CAI Yuanji, GU Yuxuan, LUO Gang, et al. Trading platform of green power certificate based on block chain: concept and practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 1-12.
- [24] NGUYEN C. An indie, off-the-grid, blockchain-traded solar power market comes to Brooklyn [EB/OL]. [2016-03-18]. <http://motherboard.vice.com/read/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar>.
- [25] SZABO N. Formalizing and securing relationships on public networks[J]. First Monday, 1997, 2(9): 1-21.
- [26] 中国绿色电力证书认购交易平台[EB/OL]. [2020-07-16]. <http://www.greenenergy.org.cn/>.
Green power certificate subscription trading platform of China [EB/OL]. [2020-07-16]. <http://www.greenenergy.org.cn/>.
- [27] 陈敏曦. 绿电新政[J]. 中国电力企业管理, 2019(16): 12-17.
CHEN Minxi. The new policy of green power certification [J]. China Power Enterprise Management, 2019(16): 12-17.
- [28] 朱发根. 绿色电力证书: 国际经验、国内前景和发电对策[J]. 中国电力企业管理, 2018(16): 64-69.
ZHU Fagen. The green power certificate: international experience, domestic prospect, and generation countermeasures [J]. China Power Enterprise Management, 2018(16): 64-69.
- [29] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知[EB/OL]. [2019-05-10]. <http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201905/t201905153662.htm>.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on establishing and improving the guarantee mechanism of renewable energy power consumption [EB/OL]. [2019-05-10]. <http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201905/t201905153662.htm>.
- [30] 国家能源局. 让更多人参与绿色电力消费[EB/OL]. [2017-07-17]. http://www.nea.gov.cn/2017-07/17/c_136449950.htm.
National Energy Administration. Let more people participate in green power consumption [EB/OL]. [2017-07-17]. http://www.nea.gov.cn/2017-07/17/c_136449950.htm.
- [31] 马子明, 钟海旺, 谭振飞, 等. 以配额制激励可再生能源的需求与供给国家可再生能源市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 90-96.
MA Ziming, ZHONG Haiwang, TAN Zhenfei, et al. Incenting demand and supply of renewable energy with renewable portfolio standard: mechanism design of national renewable energy market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 90-96.
- [32] 姚军, 何姣, 吴永飞, 等. 考虑碳交易和绿证交易制度的电力批发市场能源优化[J/OL]. 中国电力 [2021-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20201221.1429.012.html>.
YAO Jun, HE Jiao, WU Yongfei, et al. Energy optimization of electricity wholesale market with carbon emissions trading and green power certificate trading system [J/OL]. Electric Power [2021-03-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20201221.1429.012.html>.
- [33] ZHANG Da, ZHANG Qin, QI Shaozhou, et al. Integrity of firms' emissions reporting in China's early carbon markets [J]. Nature Climate Change, 2019(9): 164-169.
- [34] 刘秋华, 袁浩, 杨争林, 等. 可再生能源配额制下绿色证书补偿辅助服务方案探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 1-8.
LIU Qiu-hua, YUAN Hao, YANG Zhenglin, et al. Discussion on compensation ancillary service scheme of green certificates based on renewable portfolio standard [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 1-8.
- [35] LIN Xiong, SHEN Bo, QI Shaozhou, et al. The allowance mechanism of China's carbon trading pilots: a comparative analysis with schemes in EU and California [J]. Applied Energy, 2017, 185: 1849-1859.
- [36] 刘国中, 文福拴, 薛禹胜. 计及温室气体排放限制政策不确定性的发电投资决策[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 17-22.
LIU Guozhong, WEN Fushuan, XUE Yusheng. Generation investment decision-making under uncertain greenhouse gas emission mitigation policy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 17-22.
- [37] 中华人民共和国国务院. 碳排放权交易管理暂行办法[EB/OL]. [2020-07-16]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577360.htm.
State Council of the People's Republic of China. Interim measures for the administration of carbon emissions trading [EB/OL]. [2020-07-16]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577360.htm.
- [38] 平健, 陈思捷, 张宁, 等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3682-3690.
PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.

冯昌森(1990—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向: 电力系统优化与控制、人工智能、区块链技术。E-mail: fcs@zjut.edu.cn

谢方锐(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 区块链技术在电力系统中的应用。E-mail: 2111903068@zjut.edu.cn

文福拴(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统故障诊断与系统恢复、电力市场与电力经济、智能电网与电动汽车等。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

张有兵(1971—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控。E-mail: fyoubingzhang@zjut.edu.cn

(编辑 代长振)

Design and Implementation of Joint Trading Market for Green Power Certificate and Carbon Based on Smart Contract

FENG Changsen¹, XIE Fangru¹, WEN Fushuan², ZHANG Youbing¹, HU Jiahua³

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;

3. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China)

Abstract: With the development and popularization of renewable energy power generation technology, the green power certificate portfolio standard to encourage the development of green energy through market approaches and the carbon emission trading system to limit carbon emissions have been widely used. At present, China has not yet formed a mature and effective green power certificate market and a carbon emission market. The current green power certificate system has poor performance in encouraging renewable energy integration and alleviating the pressure of financial subsidies, and the current carbon market has no obvious effect on promoting emission reduction. In this paper, a joint trading market mode for green power certificate and carbon is proposed, which connects green power generation enterprises and traditional fossil energy power generation enterprises, and globally optimizes the allocation of green power certificate and carbon emission right resources to stimulate renewable energy power generation and limit the carbon emission of traditional fossil energy units. In order to protect the security and user privacy of transaction data between green power certificate and carbon emission markets, a “decentralized” bilateral joint trading market is constructed based on Ethereum platform. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the proposed bilateral joint trading mode based on the blockchain technology.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777193).

Key words: renewable portfolio standard (RPS); green power certificate; carbon trading; blockchain; joint trading market

