

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210901

# 基于联盟区块链的直购电交易模型

田雨扬, 卢锦玲, 赵洪山, 任惠, 王飞, 杨子菲

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 目前, 大用户直购电主要与配额制相结合, 成为推动新能源消纳的一个重要方式。为探索一种透明、可靠的直购电方法, 依托第三代区块链超级账本技术, 搭建了基于联盟区块链的直购电交易平台。首先, 在智能合约中自动执行直购电交易及碳权管理功能, 确保直购电与碳权交易路径安全可查。其次, 在直购电市场中引入绿色证书激励, 并设计碳排放权交易参与直购市场环节, 对不同交易方式的模型求解。最后, 基于设计的交易平台运行交易, 完成“报价-上链-出块”的全过程。结果表明, 碳权参与直购市场环节可以对高排放企业起惩罚作用, 能通过市场手段引导减排, 为直购交易建设提供新思路。

**关键词:** 区块链; 直购电; 碳交易; 碳中和; 配额制

## Direct purchase electricity transaction model based on a consortium chain

TIAN Yuyang, LU Jinling, ZHAO Hongshan, REN Hui, WANG Fei, YANG Zifei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** At present, the direct purchase of electricity by large users is mainly combined with a quota system. This has become an important way to promote new energy consumption. In order to explore a transparent and reliable direct power purchase method, relying on third-generation blockchain super ledger technology, a direct power purchase trading platform based on the alliance blockchain is built. First, the direct power purchase transaction and carbon rights management functions are automatically executed in the smart contract to ensure that the direct power purchase and carbon rights transaction paths are safe and checkable. Secondly, this paper introduces green certificate incentives in the direct power purchase market, and designs carbon emission rights trading to participate in the direct purchase market, and analyzes the models of different trading methods. Finally, transactions are run based on the designed trading platform to complete the whole process of "quotation-on-chain-block production". The results show that the participation of carbon rights in the direct purchase market can punish high-emission companies, guide emission reduction through market means, and provide new ideas for the construction of direct purchase transactions.

This work is supported by the Key Special Fund of Intergovernmental Cooperation in International Science and Technology Innovation of National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFE0122200).

**Key words:** blockchain; direct power purchase; carbon trading; carbon neutral; quota system

## 0 引言

大用户直购电是指具有一定用电规模的企业或个体与发电机组或新能源电站直接签订购电合同的一种交易形式, 这种交易形式可以在售电侧引入竞争机制, 提高电力资源的优化配置水平。截至2020年底, 大用户直购电的交易试点工作陆续开展, 直

购电量不断提升。为了应对当前电力不平衡情况, 大用户直购电低电价扩增用电需求, 这样做一方面可以降低企业用电成本, 另一方面可以降低发电过剩压力。在当下“碳达峰、碳中和”的目标引领下, 电力行业因高能耗特点成为节能减排的主力军。大用户直购电作为配额制的参与主体, 在碳交易市场存在重要价值。研究碳交易参与下的直购电市场机制对降低企业用电成本, 实现减排目标具有重要意义。

对大用户直购电的方式及机制, 有相关学者进行了研究。文献[1]提出了大用户直购电几种新型市

**基金项目:** 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项资助(2018YFE0122200)

场机制，分别分析了场内场外直购电的交易模式。文献[2-3]更进一步研究了大用户购电的交易算法并进行了设计改进。现有的直购电机制通常会与新能源消纳配合，文献[4]总结了大用户的几种含新能源交易匹配的直购电方案。文献[5]对大用户直购与风力发电共同参与调度的可行性进行分析，提出一种经济调度模型。

能源交易离不开有效的安全保障<sup>[6-8]</sup>，考虑到直购电系统交易规模大，交易频次少<sup>[9-10]</sup>，且直购交易的主体具有去中心化特点，因此需要一种新技术保障直购电交易市场安全稳定运行。区块链作为一种基于分布式网络的分散数据库，其在能源领域的应用已有大量研究<sup>[11-17]</sup>。文献[18]总结了不同区块链开发平台特点，介绍了区块链技术在电力运营管理、市场交易上的应用。文献[19]介绍了区块链在电动汽车充电桩运维中的应用，以拜占庭容错机制提高系统响应速率。文献[20]探索了跨链技术在调频辅助市场的交易应用，使用调度中继链将发电侧和高能耗用户链路链接。文献[21-22]从辅助服务市场发展现状出发，讨论了区块链技术参与市场改进的可行性。文献[23]构建了一种基于联盟区块链的分布式能源交易模型。另有文献对于区块链在绿证及碳交易上的应用开展了研究。文献[24-25]针对绿色证书市场搭建了区块链的底层环境和应用环境，并开发了绿证交易的功能和接口。而对于区块链在碳交易方面的应用，文献[26]建立了碳配额的成本模型、减排奖惩模型和匹配模型，利用努力减排值作为三种模型的桥梁。文献[27]则使用联盟链进行碳交易权市场的构建，并结合区块链的跨链技术沟通金融链和碳权链。以上文献均尝试了将区块链技术与电力市场相融合，但并未涉及到直购电领域。

本文在现有研究的基础上，考虑到将区块链技术应用与直购电市场的技术难点，结合直购交易特点设计基于联盟区块链的交易模型。首先分析了区块链技术与直购电市场的结合点，为了保障直购电这类交易的安全稳定达成，需要预先将智能合约嵌入区块中，从智能合约的函数进行直购电及碳交易的耦合设计，结合智能合约的自动执行特点规划完整周期内的交易程序。其次，为解决碳交易与直购电结合的问题，以配额制为结合点从市场主体的需求出发设计了使用于直购市场的结算方法。最后，基于超级账本平台，在实验室环境下对算例进行验证，证实所提出直购模型的有效性和可行性。

### 1 直购区块链及架构设计

电力行业的直购市场作为一种特殊的交易模

式，通常与绿色证书及配额交易制度结合，成为一种促进新能源消纳的辅助手段。与绿色证书制度类似，碳排放权作为一种促环保的机制被提出。考虑到直购交易和碳排放权交易的特点，设计一种安全可靠的交易系统显得十分必要。本文依托区块链的超级账本平台，通过结合大用户与发电企业的电能直购和碳排放权交易市场，深化新能源消纳的市场交易品种，助力清洁能源发展。

#### 1.1 区块链结构及加密算法

区块链是一种类分布式账本的数据模型，其结构可以分为区块头与区块体。区块头含时间戳(timestamp)和随机数(nonce)。一个区块头不仅记录前一个区块的哈希值(Hash)，还要包含 Merkle 根节点，分别是用户侧、发电侧和交易中心侧，每条链均采用二叉树结构在子节点上记载 Hash 值。区块体是包含区块头及 Merkle 树子节点的部分，其分布式数据库的属性能完成若干记录，既可以存放交易信息，也可以存放其他某种信息。根据其开放程度，区块链分为公有链、私有链和联盟链，各类型区别如表 1 所示，其中联盟链的组织结构和权限管理最适宜电力市场的交易场景。按照联盟链的标准结构，根据实际业务的需求与功能，需要将市场主体进行节点分类。本文所设计的直购市场中，主要将主体分为两类节点，即交易节点和监管节点。其中，监管节点为主体节点，其权限最高，对全系统的数据库具有读写权限，为记账和准入的管理者。市场主体如购电大用户与发电企业为交易节点，只拥有交易权限，无记账和准入权限，在市场中的功能主要为发送交易信息、接受交易信息以及对全网节点交易内容进行记账。

表 1 区块链链路类型对比

Table 1 Comparison of blockchain link types

链型	隐私性	共识机制	适用场景
公有链	任何人都可以参与	POW	访问门槛低的场景
私有链	对单独的实体开放	POS/POW	对组织隐私有高要求，保护组织基本的产品不被破坏
联盟链	对特定的组织团体开放	Solo/Kafka/SBFT 等	机构间的交易、结算等 B2B 场景

区块链经典加密算法主要采取两种算法：非对称加密技术和哈希算法。主要方法是在区块中应用哈希算法计算当前区块的 Hash 值，并按此步骤计算默克尔树中每笔交易的 Hash 值。在转账交易中应用非对称加密算法，其运作原理如图 1 所示，每个参与直购市场的主体被分配公钥和私钥，交易主

体写入交易内容时,用私钥进行数字签名,基于区块链网络,将签名和交易内容发送到接受用户。接受用户通过对数字签名和传输内容进行解密对比摘要内容确认数据。

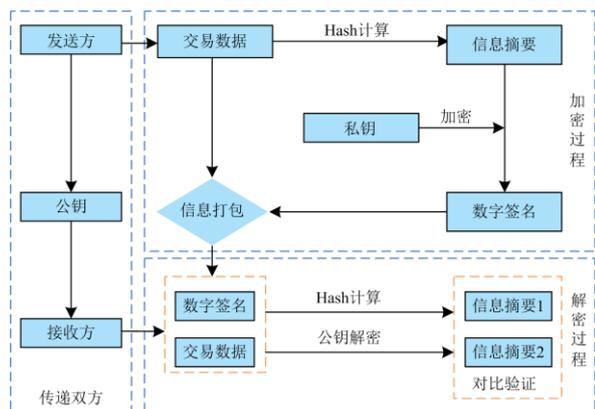


图1 区块链加密原理

Fig. 1 Principles of blockchain encryption

### 1.2 含碳排放直购电交易的合约设计

智能合约是一类具有图灵完备性的合约型程序,建立之初的区块链以第一代比特币为代表,不具备合约功能只具有货币属性。经过区块链技术多年的发展,以第二代区块链以太坊中的智能合约演化为第三代区块链超级账本中的链码。链码定义了一个或一组资产,其可以定义或解析多个相关的合约。直购电市场参与主体中发电企业和直购买方可以通过直购链码统一运转,碳排放市场用户则可以通过碳交易链码运转。链码中支撑合约运转的底层协议主要通过共识机制来作为标准。传统的共识机制核心内容包括节点选举、日志复制和安全保障,将内部节点分为了领导者、跟随者及选举者三类节点。将电力市场与区块链结合的关键便在于智能合约的设计,智能合约作为一种自动执行的工具可以有效避免交易内容被人为篡改,也避免了因交易后毁约导致的财产损失。

在设计考虑碳排放权的智能合约时,考虑到交易对象属性不同,因此需将各环节的合约部署函数写在各自合约上。在设计基于配额制的直购电量交易合约时:(1)在进行市场登记时,触发挂牌合约,由各个参与者提交交易电量与报价。同时在资金账户缴纳一定数额的保证金,支付完成后,该笔挂单才能被记载。(2)在交易挂牌周期结束后,由交易监管机构进行安全校核,执行校核合约。对校核达标的挂单上传到匹配系统;对不满足的挂单,合约会返回警告,并提示交易双方重新挂牌。(3)交易进入结算阶段后,按照所提出的匹配算法,触发出清合

约,自动计算交易金额及交易量,不需要人为参与。保障电量交易的安全可靠。

在设计碳排放权交易智能合约时,本文主要考虑到:(1)在调用配额分配函数时,监管机构根据指标对各主体进行配额,并自动执行链码。各交易主体需向合约支付一定违约金,相较于传统模式下政府组织的排放权交易,基于市场机制下的交易模式可以有效激励企业减排。(2)当完成一个排放权履约周期时,链码的自动决策系统将结合物联网技术采集各市场主体指标的执行情况,计算出碳排放缺额情况,并自动执行匹配算法。避免了在政府组织碳交易体系中,参与主体逃避减排责任等问题,可充分发挥减排奖惩的激励作用。(3)企业进入交易结算阶段时,触发碳结算智能合约,自动进行交易结算操作。基于链码的交易无需通过相关部门的人工审核,可提高碳交易效率,节约交易成本。

按照交易流程,碳市场与直购市场合约一旦被部署上链,将并行运转,按照程序自动执行交易。链路上的交易内容一方面可以被用作交易凭证,另一方面可以作为分布式数据库,便于后期校核交易账本。

### 1.3 直购交易总体架构

基于联盟链平台的直购市场架构如图2所示,完整的交互系统由业务层、服务层和由联盟链平台为基础的信息层组成,层与层之间相互嵌套,构成一个完整的分布式交易系统。信息层中,每条单独的链路区块都是由区块头和区块体组成。各交易主体提交的交易信息由链码记载于区块中,为服务层和业务层提供数据运行支持。服务层中,市场主体根据自身节点类型提交注册信息,交易组织的证书颁发机构(Certificate Authority, CA)节点进行注册信息的准入认证。认证通过的市场主体的信息统一入库管理,根据链码和加密算法生成系统唯一标识的身份字符串并分配公钥和私钥。公钥全网公开,

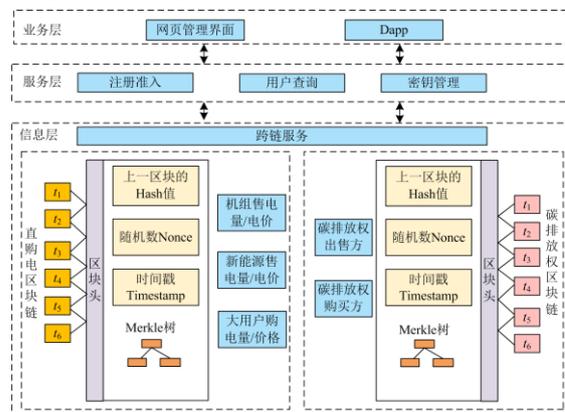


图2 联盟链直购交易架构

Fig. 2 Consortium chain direct purchase transaction structure

私钥返回主体节点进行本地存储，获得私钥的市场主体可以获得碳权交易应用系统的交易准入权限。业务层主要是由分布式应用和系统前端组成，包含监管主体界面和交易主体界面。提供市场交易与资金结算的数据交互及展示功能。

市场架构如图 3 所示，各市场参与主体首先调用注册合约缴纳一定保证金完成准入注册，根据主体的身份划分不同类型节点。准入后的主体在直购

周期内通过直购电匹配合约完成各主体直购交易出清，依据直购交易结果，通过合约之间调用将结果传输到碳排放权交易业务结算中，依据监管机构下发的排放额度决定是否购买，可买卖用户之间相互撮合完成碳排放权的流通并再次记载到区块中。待碳排放权匹配交易后，结算中心调用清算合约将直购电交易与碳排放权交易结果进行核实，完成计及碳排放权的直购市场出清，至此本轮直购市场交易完成。

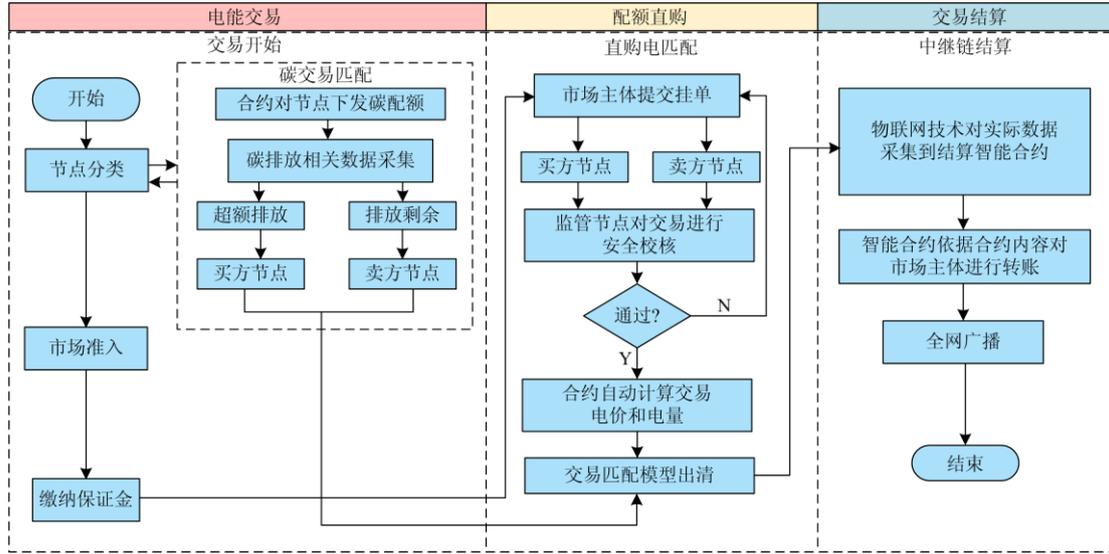


图 3 总体市场架构

Fig. 3 Whole market structure

## 2 含碳交易的直购电市场机制与模型

### 2.1 大用户直购电及配额制

传统的大用户直购电参与方主要包括大用户、发电企业和交易机构。符合准入机制的大用户和发电商按照事先约定的交易方式直接签订购电合同。这一方式打破了由电力公司主导的垄断市场格局，一方面有效降低企业的购电成本，另一方面可以与新能源消纳政策结合，引导市场发展。直购交易模式按照区域可以分为省内大用户直购和跨省直购。按照交易方式又可分为协商式双边交易、集中撮合交易、集中竞价交易及集中挂牌交易<sup>[2]</sup>。交易中心负责发布交易内容，参与直购的企业和发电商在规定时间内提交交易需求。交易中心按照一定的交易方法确定交易双方，调度中心对匹配后的交易进行安全校核及阻塞管理，得到有约束的交易结果，最终调度机构按照签订的合同进行电能输送。集中撮合模式作为应用最普遍的直购交易，流程如图 4 所示。参与集中撮合交易模式的目标函数为社会福利值最大，如式(1)所示。

$$F = \max(\sum_{p \in U} \sum_{q \in B_i} R_{i,q} S_{i,q} - \frac{1}{W_g} \sum_{g \in G} \sum_{n \in N_g} K_{g,n} L_{g,n}) \quad (1)$$

式中： $F$  为市场总福利； $p$  为市场大用户主体； $q$  为用户提交报价顺序； $B_i$  为大用户报价集； $W_g$  为参与机组  $g$  的网损因数； $K_{g,n}$  为机组  $g$  的  $n$  号报价； $L_{g,n}$  为机组  $g$  的  $n$  号报量； $N_g$  为参与市场机组  $g$  的报价集； $R_{i,q}$  为大用户  $i$  的  $q$  号报价； $S_{i,q}$  为该次报价成交电量。市场中参与撮合的交易主体以目标函数为引导进行匹配算法，确认每次交易的直购双方编号及交易量。

为了应对新能源消纳问题和减轻“弃风弃光”现象，市场先后出台了配额制和绿色电力证书交易机制。对于可再生能源发电企业，其发出一定量的绿色电能后，会相应获得一定数量的绿色证书；对于大用户也是相同道理。交易部门根据实际的情况和需要，为市场主体分配一定数量的绿色能源额度，以要求市场参与者在结束交易周期后归还绿色证书来完成配额。由绿证制度所衍生出的交易市场，交易双方可以根据需求购买或出售绿色证书，以此完成配额指标。

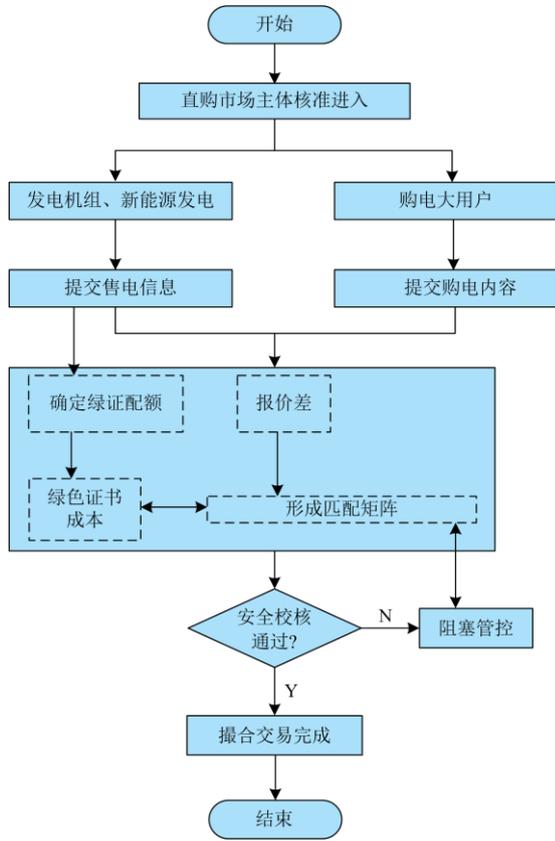


图4 直购电交易流程

Fig. 4 Direct purchase of electricity transaction process

基于配额制的直购交易结算算法如式(2)和式(3)所示。基于配额制的直购电交易算法是以高低匹配为基础改进的匹配矩阵法, 包含了绿色证书参与市场的成本。其中含  $m$  个买家和  $n$  个卖家的匹配矩阵可以表示为式(2), 社会福利折算公式如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} X_{ij} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

$$X_{ij} = X_{A,i} - X_{B,j} - T_b P_g - Z_{ij} \quad (3)$$

式中:  $T_b$  为交易的绿色证书数量;  $P_g$  为由市场供需锁定的绿色证书价格;  $Z_{ij}$  为大用户直购的政府补贴。撮合方法按照折算后的  $X_{ij}$  从大到小依次确定交易双方序号。确认交易双方后, 在矩阵中移除该行或该列并更新矩阵进行下一轮匹配, 直到社会福利小于 0, 交易结束。每轮交易的结算费用按照社会福利均分方式确定。其中, 跨省交易的大用户结算价格表示为

$$L_i = F_{B,i} - 0.5 \left[ f_{B,i} - \left( \frac{F_{S,j}}{1 - \varepsilon^*} + S^* + W \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $L_i$  为跨省交易的大用户结算价格;  $F_{B,i}$  为大用户  $i$  向区块链弱中心化节点提交的购电价格;  $\varepsilon^*$  为省间输电损耗;  $S^*$  为省间输电价格;  $W$  为环保补

贴费用。跨省交易发电商的结算价格表示为

$$L_j = F_{S,j} + 0.5 \left[ F_{B,i} - \left( \frac{F_{S,j}}{1 - \varepsilon^*} + S^* + W \right) \right] (1 - \varepsilon) + T_b P_g \quad (5)$$

式中,  $F_{S,j}$  为发电厂商  $j$  向区块链弱中心化节点提交的售电价格。

## 2.2 考虑碳交易的直购市场机制

典型的碳交易权市场采用基准线法<sup>[28]</sup>进行碳配额分配。在市场中, 主体可以根据自身需求, 申报碳权交易量, 以市场为引导实现对减排成本的有效调控。碳减排的奖惩, 通常是依据市场价格来反映。碳排放交易的匹配与直购电匹配算法类似, 市场中购碳权卖方价格需低于买方价格, 双方按照报价次序, 买方报价从高到低进行排序, 卖方价格从低到高进行排序, 然后进行匹配。直到报价截止时间或者到达结束轮次, 结束本次交易匹配, 交由交易机构进行出清登记。市场约束为

$$\sum_{i=1}^n B_{s,i} = \sum_j^m B_{b,j} \quad (6)$$

式中:  $B_{s,i}$  为第  $i$  个碳排放权卖方;  $B_{b,j}$  为第  $j$  个碳排放权买方。碳权交易量约束表示为

$$B_{s,i} < B_{s,i,\max} \quad (7)$$

市场用户  $i$  的碳权交易费用为

$$f_{s,i} = P_{i,c} B_{s,i} \quad (8)$$

式中,  $P_{i,c}$  为第  $i$  个用户的出清价格。碳权交易价格约束为

$$P_{i,\min} < P_{q,s} < P_{q,b} < P_{i,\max} \quad (9)$$

式中:  $P_{q,s}$  和  $P_{q,b}$  分别为出售和购买碳排放权的价格;  $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$  为碳排放权价格上下限。交易匹配约束为

$$P_{q,b,i} - P_{q,s,j} < P_{q,b,n} - P_{q,s,j} \quad (10)$$

式中:  $P_{q,b,i}$  与  $P_{q,s,j}$  分别为该次匹配的买家  $i$  和卖家  $j$  的报价;  $P_{q,b,n}$  为未匹配到的买方报价。

绿色证书的配额方法按照式(11)一式(13)进行约束。

$$0 \leq X = \frac{W_r^p}{W_t^p} \leq 1 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m W_{r,i}^p = W_r^p \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m W_{r,i}^p + \sum_{j=1}^n W_{f,j}^p = W_t^p \quad (13)$$

式中: 假设共  $m$  个新能源发电商和  $n$  个火电机组;

$X$  为该直购阶段的配额比例;  $W_r^p$  为该阶段内新能源发电商预计发电量;  $W_f^p$  为该阶段内大用户的预计购电量;  $W_{r,i}^p$  和  $W_{f,j}^p$  分别为第  $i$  个新能源发电商和第  $j$  个火电机组的发电量。当直购交易调用合约时, 绿证交易按照上式所示约束参与匹配, 确定绿色证书的比例及交易量, 最终达成合约并上链。

### 2.3 含碳权交易的直购电市场出清模型

直购市场的火电机组由于排放性能不同, 会产生一定的碳排放差额。在注册准入环节, 各发电商提交该机组碳排放能力, 基于基准线法确定碳额度。在实时市场中根据不同类型的机组发电量, 在智能合约中匹配并得到差额, 机组根据需求进入调用合约交易。碳排放权市场的建立可以有效促进低排放企业利用其技术优势获取配额, 对超排放机组则回收一定配额。有效促进机组向减排目标前进, 提高减排积极性。同时, 大用户购买新能源电能时可以获得碳配额, 使用火电机组电能则回收一定配额, 有利于建立市场机制引导下的绿色发展新模式。

按照图 3 设计的市场架构, 首先, 市场各主体确认自身准入权限, 由交易中心进行登记。确认资格后, 按照直购电配额与碳交易配额, 分别分配给参与交易的各个主体交易指标。在报价周期内, 直购电买卖双方进行电能交易申报, 交由中央机构进行撮合, 达成电能交易意向。按照集中撮合匹配算法计算后, 匹配双方根据确定的合约进行交易。电能交易阶段结束后, 对碳排放额指标达成度进行计算, 确认各碳市场主体超额或剩余情况, 按照配额需求提交至交易中心, 按照碳排放撮合匹配算法匹配, 确认碳排放权交易双方。双方按照交易确定的价格和数量进行履约, 完成碳排放交易阶段。最后, 两阶段的交易资金汇至市场出清链路, 由交易中心统一结算, 对各主体账户进行清算。至此, 该轮交易结束。

直购电市场在交易中的计算规模通常反映匹配组规模的大小, 直购电市场对时间尺度要求不高且区块链出块能力及解密计算的效率不高, 一般可以按照中长期市场(年度签署)与实时市场来划分。直购市场迭代数和交易匹配时间约束表示为

$$\begin{cases} R \leq R_{\max} \\ t_{\text{bid}} \leq T_{\max.Y} \\ t_{\text{con}} + t_{\text{queue}} \leq T_{\max.D} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $R$  为撮合交易中实际匹配迭代次数;  $R_{\max}$  为得到迭代结果最多需要的次数;  $t$  为各阶段交易的实际执行时间, 其中  $t_{\text{bid}}$  为签订中长期合约的用时,  $t_{\text{con}}$  为实时市场调用智能合约用时,  $t_{\text{queue}}$  为匹配到出

清队列用时;  $T_{\max}$  为各阶段交易最长执行时间, 其中  $T_{\max.Y}$  为大用户与火电机组确定年度售、购电计划的截止时限;  $T_{\max.D}$  为实时市场交易截止期限。通过超级账本链码中存储的交易结果与实际的直购结果比对, 同时通过区块链的数据溯源和不可篡改的特性, 构建规范化管理和透明公开的市场环境。

## 3 算例分析

### 3.1 仿真场景设置

在平台的选取上, 本文采用基于 Hyperledger Fabric 内核的 Z-ledger 作为部署平台, 对比以太坊地传统交易平台, 其带有的权限管理功能能够很好地满足市场的准入需求。此外, 交易平台支持自定义智能合约, 便于针对不同交互需求设计相应功能。

仿真硬件环境上, 本章在多台计算机模拟各电力市场交易方, 搭建直购电-碳交易的耦合直购模型, 将合约部署到链码容器中, 各参与者通过调用合约实现相应功能。此外, 在这些计算机上按照绿证模式的直购交易进行模拟, 即交易主体在交易机构的计算机上完成交易流程。分析对比两种模式下的工作效率与经济效益。

仿真实现原理为: 1) 结合所建立的含碳排放权的直购市场各个主体功能, 用含有搭建基于 Hyperledger Fabric 平台的计算机模拟交易节点, 用于发起直接购电或碳排放权交易请求。当用户或发电企业发生电能交易或碳交易时, 执行哈希计算并打包成区块。2) 生成公私钥和证书。超级账本平台的证书服务模拟直购市场中监管机构。企业想要加入直购交易体系, 必须提交申请到证书发放权威机构进行注册且得到签名和公私钥。3) 生成默克尔树。每个节点都把创世区块作为区块链的首区块, 即把创世区块设置为默克尔树的根节点, 进行数据存储, 从而保证直购交易相关数据的安全、可信。4) 安装和运行智能合约。所需智能合约主要包括直购准入智能合约, 监管中心安全校核智能合约、碳配额决策智能合约、减排奖惩智能合约、交易匹配智能合约等。

### 3.2 算例选取

为了分析不同市场机制下的直购交易情况, 文章从 3 种交易方案入手。实验交易链码通过 API 在 Matlab 2018a 环境下调用匹配出清程序计算。调用计算机的 CPU 为 AMD Ryzen 2600X, 主频 3.6 GHz, 16 GB RAM。

模拟直购市场交易数据见表 2—表 5, 跨区交易损耗如表 2 所示。设有 5 家不同行业的工业大用户, 各大用户提交挂单如表 3, 挂单含申报电价与电量。

设 5 台火电机组与 5 家新能源发电商参与市场, 其中火电机组可根据环保水平包含环保电厂与非环保电厂, 新能源发电包含风电与光伏。挂单见表 4 和表 5, 挂单包含申报价格、申报电量及补贴价格。并设代币与法币汇率为 1Token=0.1 元。各主体经过提交申请, 市场准入、获得数字密钥后成为市场参与节点。

方案 1: 不包含绿色证书交易及碳排放权的传统直购市场。此方案在不经区块链平台的情况下由仿真平台模拟发起电子合约达成撮合, 按照风火打捆比例为 1:3 参与配额交易, 交易资金由交易中心管理。

方案 2: 含有绿色证书市场的直购电交易模式, 此方案经过仿真平台在区块链上发起智能合约, 链码记载于单链上。设每生产 1 MWh 绿电会获得一本证书, 火电机组每生产 1 MWh 需交纳 0.2 本证书, 绿色证书价格分别按照 250 token/本、300 token/本和 350 token/本 3 种标准定价。工业大用户配额指标合格后, 可以将多余的指标在绿证市场流转获得额外收益。

表 2 跨区交易损耗及输电费用

Table 2 Cross-regional transaction losses and transmission costs

区域	网损率/%	输电费/(token/kWh)
A-A	2	0.2
B-B	2	0.2
C-C	2	0.2
D-D	3	0.3
A-B	6	0.8
A-C	7	1
A-D	6.5	0.9
A-A	2	0.2

表 3 大用户挂单情况

Table 3 Pending orders of large user

用户	购电量/MWh	报价/(token/kWh)
A	1 482	5.219
B1	1 698	5.117
B2	1 873	5.232
C	1 019	5.141
D	1 175	5.612

表 4 常规机组挂单情况

Table 4 Pending orders of conventional unit

机组		申报量/	报价/	CO <sub>2</sub> 排放量/(g/kWh)	环保折算价格/	交叉补贴费用/
类型	编号	MWh	(token/kWh)		(token/kWh)	(token/kWh)
非环保 火电厂	H1	1 732	3.146	787	0.15	0.1
	H2	1 214	3.183	816	0.15	0.1
	H3	1 332	3.159	791	0.15	0.1
	H4	1 549	3.123	802	0.15	0.1
环保火电厂	H5	2 308	3.165	683	0.1	0.1

表 5 新能源发电挂单情况

Table 5 Pending orders of new energy power generation

发电类型	发电商	报价/(token/kWh)	申报量/MWh
风电	W1	5.019	437
	W2	5.117	376
	W3	5.032	348
光伏	S1	4.941	172
	S2	4.912	223

方案 3: 绿色证书市场与碳排放权市场结合, 链码寄存于联盟区块链中运行。设碳排放权基准价格为 250 token/t<sup>[27]</sup>。年度单位综合发电碳排放基准设定为 760 g/kWh, 具体各机组二氧化碳排放量见表 4。各机组之间通过碳排放权区块链的交易, 满足配额需求。

### 3.3 仿真分析

根据不同方案的交易设计, 方案 1 通过传统交

易匹配模式对市场主体挂单进行出清, 由交易中心对交易过程进行全程监管。由于方案 1 不考虑绿证交易, 仅考虑打捆配额的方式促进新能源消纳, 绿色能源收益较少, 发电联盟总利润较低。

由表 6 的结果对比可见, 方案 2 引入绿色证书进行市场激励, 既能够帮助新能源消纳, 压低竞争成本, 又可以为新能源发电商带来额外收益。从各组不同绿证价格数据对比来看, 当绿证价格提高时, 市场总体收益也随之增加。说明绿色证书在大用户直购的市场机制中为新能源的消纳提供了保障, 也为市场主体的报价策略提供一定调整参考。

方案 3 的仿真结果由表 7 所示, 非环保机组超过基准, 需向环保机组购买一定碳权。碳排放权市场引入对直购模式起到一定辅助作用, 弹性价格可以利用市场引导发电企业节能减排, 推动低碳技术发展。基于联盟链的交易平台可以保障绿色证书及

碳排放权交易的公开透明，有助于公众对市场的监督。交易结果、交易规则、数据处理均由链码完成，为直购市场带来更完善的去中心化市场体验。

表 6 不含碳排放权直购交易结果

Table 6 Direct purchase transaction results without carbon emission rights

市场模式	绿证价格/ (token/kWh)	绿证收益/ token	新能源总利润/ token	发电商总收益/ token
方案 1 直购电撮合交易	—	—	7 247 000	39 787 000
方案 2 绿证+直购电配额	250	127 400	7 265 400	40 251 200
	300	151 600	7 552 100	40 473 000
	350	173 800	7 852 300	40 627 300

表 7 含碳排放权直购交易结果

Table 7 Results of direct purchase of carbon emission rights

碳排放权匹配				绿证价格/(token/kWh)	绿证收益/token
买方	卖方	碳权重/t	出清价格/ (token/t)		
H1	H5	46 764	2 301	300	151 600
H2	H5	67 983	2 215		
H3	H5	41 292	2 480		
H4	H5	19 266	2 137		

完整交易通过 Z-Ledger 平台实现，交易的账户信息见图 5，包含所有主体账户的哈希值及其资产。交易的转账信息如图 6 所示，记载了每一笔订单的哈希值以及交易的内容。通过本文仿真的转账结果表明，区块链平台下的智能合约可以实现工业大用户基本直购交易，且可以实现绿色证书、碳交易权的配额交易管理等功能。相较于政府组织的直购交易，该模式可以有效避免恶意竞争，且数据分布式存放能增强交易安全性。此外，基于企业级联盟链的平台搭建还能防止数据被非主体用户篡改和查看。

0326584076990c56273635411454524265	资产	获取公钥	删除
051049b94c68af5a054e210899587bc5652f	资产	获取公钥	删除
16908c4645495c31264342a258af364902a	资产	获取公钥	删除
046837ba777e3cd0d9436739a2119f48	资产	获取公钥	删除
04631c52b0e8b8d49c258f02463e6b6757c	资产	获取公钥	删除
0301653a433af754bae393f203e781c748142	资产	获取公钥	删除
19642c50106064c48b23b698e9a785d8262379	资产	获取公钥	删除
0a7ca3c355ac72019786374825884788d0fe	资产	获取公钥	删除
1a0119059a278579452a5c4ca69494752a	资产	获取公钥	删除
0849990875c793a481645b12427710c0b0d3	资产	获取公钥	删除
64439193a19e68a20a30c946470a9981a6	资产	获取公钥	删除
0274e01351d1e93016e4c25d96a7005c0e0d1	资产	获取公钥	删除
08236667e372020e985a6721aa485e0891	资产	获取公钥	删除
10e7a2d20e9571549648888ba848c1192	资产	获取公钥	删除
c180da59a5499a2d7d33b592cd9653c9d	资产	获取公钥	删除

图 5 交易初始账户信息

Fig. 5 Initial transaction account information

交易详情
<p>TxHash: 7fa3e0b155d87f88307927d047b32b678a60b8c0e4544ba7a216b0e1</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   027140613520a95...   Green Certificate   173800</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>
<p>TxHash: b37d8543d8067a5937544743881014a912e14210a05448291687492b30c4a</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   08236667e372...   Green Certificate   151000</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>
<p>TxHash: 0be0b1e4a09d85c455e4b0c51002eb0c24cd0472715007405460a3e2a0d</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   030e78202fe085...   Green Certificate   127600</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>
<p>TxHash: 2f80cd1401b37a2a56d396e645327a254a54a236479e31d4e67034643bf</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   1a0119059a27...   Carbon   39260</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>
<p>TxHash: a9ff3cd4477946a29f9e3f0c030f8ba07e384b36a314166a51a4d6a76c87</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   0a7ca3c355ac072...   Carbon   42200</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>
<p>TxHash: 9123e3785ae72725894a5149755bc0b72015893548c04357194d9935b</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   0c43930343196a...   Carbon   67930</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>
<p>TxHash: 6e7d7f0618a-a054a4160464625a9896d52b0c003a95a918000707e</p> <p>Name: token</p> <p>Type: GOLANG</p> <p>Status: VALID</p> <p>Args: transfer   027140613520a95...   Carbon   46760</p> <p>Endorser: Org1MSP</p>

图 6 交易结果转账图

Fig. 6 Transaction result transfer diagram

## 4 结语

本文在考虑碳排放权参与直购电市场的情况下, 依托联盟区块链交易平台, 编写不同交易品种下的交易智能合约。并结合传统交易模式构建了含碳排放权的直购交易模型, 并通过算例验证了市场机制和交易平台的可行性。测试结果表明本文所提出的交易模型可以为直购市场中的新能源发电及低碳排放机组带来额外收益, 且基于联盟链的交易平台可以满足市场模型的需求。

针对大用户直购电这一特殊的电力交易模式, 文章分析了传统基于配额制的市场模型并加以改进。在双碳目标的引导下, 配额制和碳排放权交易是我国电力市场未来发展的重要窗口, 同时区块链及其加密技术已逐步发展成熟, 两者结合可以充分激活市场潜力。本文所建立的基于联盟区块链技术的直购模型可以有效助力电力行业直购交易体系, 构建公开可靠的市场环境, 为大用户、配额制和碳排放权接入电力市场的区块链交易平台联合规划提供研究基础, 为后续研究提供一定的参考和借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 夏清, 白杨, 钟海旺, 等. 中国推广大用户直购电交易的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 1-7.  
XIA Qing, BAI Yang, ZHONG Haiwang, et al. Institutional design and suggestions for promotion of direct electricity purchase by large consumers in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 1-7.
- [2] 陈皓勇, 张森林, 张尧. 电力市场中大用户直购电交易模式及算法研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 85-90.  
CHEN Haoyong, ZHANG Senlin, ZHANG Yao. Research on transaction mode of direct power purchase by large consumers in electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 85-90.
- [3] 陈西颖, 胡江溢. 大用户与发电企业直接交易算法探讨[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 100-103.  
CHEN Xiying, HU Jiangyi. Preliminary discussion on the straight power transactions between large power users and generation enterprises[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 100-103.
- [4] 张丽丽. 促进新能源消纳的大用户直购电集中交易模式及算法[D]. 保定: 华北电力大学, 2018.  
ZHANG Lili. The centralized trading mode and algorithm of large consumers direct-purchasing for the promotion of renewable energy consumption proportion[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.
- [5] 邓强, 詹红霞, 杨孝华, 等. 考虑风电不确定性和大用户直购电的电力系统经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 131-139.  
DENG Qiang, ZHAN Hongxia, YANG Xiaohua, et al. Power system economic dispatching considering the uncertainty of wind power and large consumers direct purchasing[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 131-139.
- [6] XU Yan. A review of cyber security risks of power systems: from static to dynamic false data attacks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 4(3): 8-19.
- [7] 艾崧溥, 胡殿凯, 张桐, 等. 能源互联网电力交易区块链中的关键技术[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 44-57.  
AI Songpu, HU Diankai, ZHANG Tong, et al. Key technologies of electricity transaction blockchain in energy internet[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 44-57.
- [8] 朱文广, 熊宁, 钟士元, 等. 基于区块链的配电网电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 165-172.  
ZHU Wenguang, XIONG Ning, ZHONG Shiyuan, et al. Power trading method for distribution network based on block chain[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 165-172.
- [9] 闵子慧, 陈红坤, 林洋佳, 等. 新电改背景下大用户直购双边博弈模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 77-84.  
MIN Zihui, CHEN Hongkun, LIN Yangjia, et al. Bilateral game model of large consumers' direct purchasing under power system reform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 77-84.
- [10] 徐云, 应黎明. 非对称压力下大用户直购电价格的讨价还价博弈[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 142-147.  
XU Yun, YING Liming. The bargain model for pricing of direct-power-purchasing under asymmetric pressure[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 142-147.
- [11] PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie. A two-stage autonomous EV charging coordination method enabled by blockchain[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(1): 104-113.
- [12] 黄虹, 文康珍, 刘璇, 等. 泛在电力物联网背景下基于联盟区块链的电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 22-28.  
HUANG Hong, WEN Kangzhen, LIU Xuan, et al. Power trading method based on consortium blockchain under ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 22-28.

[13] YANG Q, WANG H. Blockchain-empowered socially optimal transactive energy system: framework and implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3122-3132.

[14] 徐美强, 高志远, 王伟, 等. 基于区块链技术的智能变电站配置版本管理[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 60-67.  
XU Meiqiang, GAO Zhiyuan, WANG Wei, et al. Smart substation configuration version management based on blockchain technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 60-67.

[15] YANG J, PAUDEL A, GOOI H B. Compensation for power loss by a proof-of-stake consortium blockchain microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3253-3262.

[16] LOHACHAB A, GARG S, KANG B H, et al. Performance evaluation of hyperledger fabric-enabled framework for pervasive peer-to-peer energy trading in smart cyber-physical systems[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 118: 392-416.

[17] SAHA S, RAVI N, HREINSSON K, et al. A secure distributed ledger for transactive energy: the electron volt exchange (EVE) blockchain[J]. Applied Energy, 2021, 282.

[18] 王德文, 柳智权. 基于智能合约的区域能源交易模型与实验测试[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2010-2019.  
WANG Dewen, LIU Zhiquan. Regional energy transaction model and experimental test based on smart contract[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2010-2019.

[19] 杨玉博, 卢达, 白静芬, 等. 基于区块链技术的充电桩运维系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 135-141.  
YANG Yubo, LU Da, BAI Jingfen, et al. Research on the operation and maintenance system of charging pile based on blockchain technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 135-141.

[20] 沈鑫, 束洪春, 方正云, 等. 考虑高能耗用户参与的调频服务跨链交易模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 10-18.  
SHEN Xin, SHU Hongchun, FANG Zhengyun, et al. Cross-chain transaction model of frequency regulation service considering the participation of high energy consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 10-18.

[21] 李彬, 曹望璋, 祁兵, 等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 736-744.  
LI Bin, CAO Wangzhang, QI Bing, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 736-744.

[22] 李彬, 魏吟斌, 侯萌, 等. 支撑综合能源广义需求响应的区块链技术研究[J]. 供用电, 2020, 37(7): 18-23.  
LI Bin, WEI Yinwu, HOU Meng, et al. Research on blockchain technology supporting generalized energy demand response[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 18-23.

[23] 熊威, 杨彬佑, 张睿, 等. 基于联盟链的分布式能源交易模型研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 24-29.  
XIONG Wei, YANG Binyou, ZHANG Rui, et al. Research on distributed energy trading model based on consortium chain[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 24-29.

[24] 龚钢军, 杨晟, 王慧娟, 等. 综合能源服务区块链的网络架构、交互模型与信用评价[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5897-5911.  
GONG Gangjun, YANG Sheng, WANG Huijuan, et al. Network architecture, interaction model and credit evaluation of integrated energy service blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5897-5911.

[25] 张元星, 刁晓虹, 李涛永, 等. 区块链在绿色能源证书交易方面的应用与实践[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(6): 75-81.  
ZHANG Yuanxing, DIAO Xiaohong, LI Taoyong, et al. Application and practice of blockchain in green energy certificate trading[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(6): 75-81.

[26] PAN Yuting, ZHANG Xiaosong, WANG Yi, et al. Application of blockchain in carbon trading[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4286-4291.

[27] 吉斌, 刘妍, 朱丽叶, 等. 基于联盟区块链的电力碳权交易机制设计[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 32-40.  
JI Bin, LIU Yan, ZHU Liye, et al. Design of carbon emission permit trading mechanism in power industry based on consortium blockchain[J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 32-40.

[28] 许小虎, 邹毅. 碳交易机制对电力行业影响分析[J]. 生态经济, 2016, 32(3): 92-96.  
XU Xiaohu, ZOU Yi. Analysis of impact of carbon trading on power industry[J]. Ecological Economy, 2016, 32(3): 92-96.

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-09-17

作者简介:

田雨扬(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: tian\_yy@ncepu.edu.cn

卢锦玲(1970—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制。E-mail: lujinling@126.com

(编辑 周金梅)