

基于区块链的电力现货交易市场研究

龚钢军, 王慧娟, 张桐, 陈志敏, 魏沛芳, 苏畅, 文亚凤, 刘向军

(北京市能源电力信息安全工程技术研究中心(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Research on Electricity Market About Spot Trading Based on Blockchain

GONG Gangjun, WANG Huijuan, ZHANG Tong, CHEN Zhimin, WEI Peifang,

SU Chang, WEN Yafeng, LIU Xiangjun

(Beijing Engineering Research Center of Energy Electric Power Information Security (North China Electric Power University),
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: A new round of electricity reform is required for restoring the properties of electric power commodity. To build a competitive power spot market for “multi-seller to multi-buyer” under transactions decentralization, which is striving to form a “source-sell-load” bilateral intraday time-of-use price mechanism that reflects the time and location characteristics. But electricity spot market also faces many restrictions, such as cross-regional power trading regulation, energy type and transaction priority, smart trading model, cooperative scheduling and physical constraints, industry and government regulations, financial settlement and policy subsidies, etc. Based on the similar network topology of blockchain and power spot market system, dealt with the demands of the intelligence, real-time and security of the electric spot market transactions and constraints about electricity price in different time within a day were analyzed. Based on the blockchain, they were designed to electricity spot real-time dispatch transaction and regulatory model. Further, it also expounded the transaction flow and operation mechanism of this model and the impact of electricity spot price. Through the smart contract, the optimization algorithm of multi-objective search based on particle swarm optimization that use multi-objective search was run by a programmatic script. Through the algorithm, the sales company can achieve the optimal selection of multiple options for the development of electricity under the opening electricity. Then they can take exchange of the information through ETI. And to ensure the real-time transaction information, which improve transaction efficiency and provide timely information for the clean energy power plant to adjust the transaction price information. It can also provide a reference for the operation of the electricity spot

market which achieves dispatching transaction to decentralize.

KEY WORDS: power system reform; electricity spot market; intraday time-of-use tariff mechanism; blockchain; energy trading internet (ETI); multi-target search algorithm

摘要:新一轮电改要求还原电力商品属性,构建交易部分去中心化下“多卖方-多买方”的竞争性电力现货市场,力求形成体现时间和位置特性的“源-售-荷”双侧日内分时电价机制。但电力现货市场面临跨区域交易管制、能源类型与交易优先权、智能交易模式、协同调度与物理约束、行业与政府监管、金融结算和政策补贴等制约因素。该文基于区块链与电力现货市场体系相似的网络拓扑形态,针对电力现货市场交易的智能性、实时性和安全性等需求,分析日内分时电价的制约因素,设计区块链架构下的电力现货实时调度交易及监管模型,阐述该模型的交易流程和运行机制,及其对电力现货价格的影响。通过智能合约,将基于粒子群算法的多目标搜索优化算法进行程序化的脚本运行,实现放开电量下的售电公司多选择最优购电方案的制定,并通过能源交易互联网进行信息交互,保障交易信息的实时性,提高交易效率,为清洁能源电厂及时调整交易价格提供了数据信息,可为实现调度交易部分去中心化下电力现货市场的运行提供参考。

关键词: 电力体制改革; 电力现货市场; 日内分时电价机制; 区块链; 能源交易互联网; 多目标搜索算法

0 引言

电力市场主要包括中长期市场、现货市场、辅助服务市场、容量市场等^[1]。现货市场是电力市场体系的重要环节,对于电力市场的开放、竞争、有序运行起到了基础性的支撑作用,也是协调市场交易与系统安全的关键所在^[2]。现货市场主要开展日前、日内、实时电能量交易和备用、调峰调频等辅助服务交易^[3]。

现有电力交易市场以中长期的计划交易为主,

基金项目: 国家能源局科技项目(2017BJ0166)。

Project Supported by the Science and Technology Project of National Energy Administration (2017BJ0166).

现货电力交易相对缺失,而且在期货与现货的电力市场博弈中,市场滥用的问题在期货交易中尤为明显^[4],不利于构建现代化的电力交易市场。2015年3月,国务院发布的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》要求通过还原电力的商品属性^[5],实现电力供应由传统计划模式向市场交易模式的逐步转变,提出了以中长期交易规避风险,以现货市场发现价格的“现货+中长期”的市场联合运营模式^[6]。2017年9月,国家发展改革委、能源局发布的《关于开展电力现货市场建设试点工作的通知》选择了广东、蒙西、浙江、山西、山东、福建、四川、甘肃八个电力现货市场首批试点地区,要求组织市场主体开展日前、日内、实时电能量交易,实现调度运行和市场交易有机衔接,建立安全约束下的现货市场出清机制和阻塞管理机制,形成体现时间和位置特性的日内分时电价机制^[7]。2017年10月发布的“取消跨省发电、供电计划和省级发电、供电计划备案核准”中要求建立完善购电制度,保障清洁能源上网,规范电力市场主体行为,加强电力行业信用监督,形成市场性质的电力交易防护^[8]。

我国积极推动完善电力市场的初衷在于考虑到电力中长期市场的期货交易对冲市场价格波动风险的金融属性^[9],而电力现货市场是对其有效、有益的补充方式。但电力现货交易对交易监管、金融结算以及法律法规等配套机制的要求也很高。因此,在新一轮电改背景下,如何在遵循市场经济规律和保障电力系统稳定运行的前提下,构建高效、完善、有序、稳定运行的电力现货市场显得尤为迫切^[10]。

国家政策和市场规律性均要求电力现货市场形成体现时间和位置特性的日内分时电价机制。因此,应重点考虑以下3个方面制约因素:1)电力现货市场强调交易的实时性和自治性,而在现有统一调度计划机制的制约下,很难做到电力市场的快速反应与实时交易,必须在部分遵循调度管理下给予市场较大的灵活性和开放性即交易的自主化、智能化和部分去中心化;2)考虑能源端的远近距离、能源类型、能源端多源横向互补及备份冗余容量、发输配电价、源-网-荷-储的协同调度机制、电网的功率平衡等约束条件对电力现货市场的影响^[11],以及纵向多级调度统一调控模式的适应性和反应实时性,有必要增加调度的纵向协同自治和智能调度机制,即在调度部分去中心化下协同调整能量流对物理约束条件的适应性和冗余性;3)建立“多卖方-多买方”的竞争性电力现货市场的目的是力求形

成体现时间和位置特性的“源-售-荷”之间的双侧日内分时电价机制,因此,需要加强电力现货市场交易记录、金融结算、运行数据的统一监管与安全防护模式,必须防止交易双方或者第三方入侵者篡改交易数据或获取隐私数据,保证数据的机密性、完整性、可用性、防篡改性、可追溯性、可审计性等信息安全功能,即要求系统交易数据长期存储、数字摘要生成过程的前后关联性,从而防止交易数据被篡改,确保交易的“可控、能控和在控”。

区块链作为一种分布式的数据库和去中心化的P2P对等网络,具有智能合约、分布决策、协同自治、防篡改的高安全性和公开透明性等特征^[12-13],天然上在运行方式、拓扑形态、安全防护等方面适配于电力现货交易市场,可以很好的支撑电力现货交易市场的建设与防护。文献[14]构建了基于区块链技术的大用户直购电交易框架,从市场准入、交易、结算和物理约束四个方面说明区块链如何在实际中应用于大用户直购电;文献[15]提出基于区块链技术的跨省发电权交易模型,分析了区块链在发电权交易中的适用性;文献[16-17]从工作量证明、互联共识、智能合约、信息安全等方面剖析了区块链技术应用于自动需求响应的关键技术,文献[18]提出联网微电网支持点对点的区块链技术,为区块链技术与电网技术融合的适应性提供了验证方案。

以上文献结合现有电力体制的发展需求,研究了智能合约、协同自治、点对点交易等区块链技术在大用户直购电、跨省发电权交易、售电侧自动需求响应中的应用模式,探讨了点对点交易的联网微电网的实现,但是没有结合电力现货市场的场景,进一步分析电力现货交易市场架构、部分去中心化下电能商品实时交易与协同调度机制、“源-售-荷”三者之间的双侧日内分时电价机制的关联性与制约性、政府监管模式、数据安全等因素。因此,本文针对区块链与电力现货市场体系的相似网络拓扑形态,从技术融合角度出发,研究区块链支撑下的电力现货交易市场的模型架构及流程,构建在调度和交易部分去中心化下电力现货市场调度交易的自主性和智能自治性,探讨实时电价交易的形成和价格制约因素,以及基于粒子群多目标搜索优化算法支撑的“源-售”双方达成智能合约的共识机制,识别售电公司多选择购电方式下的最优购电方案,保障购电方案的公开透明性,力求形成体现时间和位置特性的“多对多”的购售电模式。

1 “源-售-荷”双侧日内分时电价交易模型

1.1 新一轮电改对日内分时电价交易的推动性

电力现货交易市场通常专指商品即时物理交割的实时市场,考虑到电力商品交割的瞬时供需平衡特征,电力市场往往将现货市场的时间范围扩大到实时交割之前的数个小时乃至一日^[19]。现货市场一般由日前市场、日内市场和实时市场组成一个完整的现货市场体系^[20]。电力现货交易在一定程度上能够缓解当前新能源浪费的问题,提升电力市场交易的竞争机制和调节机制,完善“源-售-荷”三者之间的双边交易。

目前,能源端仍存在以下问题:1)厂网利益问题,致使风能和太阳能等清洁能源存在大规模“弃风弃光”,甚至“弃水”问题;2)计划性指令调度控制,致使火电机组的发电机组运行小时数普遍偏低,以及不同电厂发电小时数的倒挂问题,同时市场反应与自主调节机制缺失;3)一直未有效推动落实用户直购电模式,没有形成“多买多卖、市场定价”的机制,致使发电厂亏损较大。而用户端也存在以下问题:1)售电侧为电网公司一家垄断,缺少市场竞争机制;2)在目前电力总体供大于求,以及清洁能源上网价格偏高的情况下,电网企业缺少大量接入清洁能源发电量的动力,售电侧价格单一,仍然遵循“电网企业独买、独卖、政府定价”机制;3)在国家大力推进“煤改电”等电能替代方案与节能工程之际,为了鼓励用户优先使用电能,提出并采用了分时电价和低电价措施,致使电网公司负担了大量的电费资金补贴,企业运行利润受损。

新一轮电改针对电力系统“源-荷”两端随机性特征增强的特点,遵循“放开两头,管住中间”的基本原则,目的在于打破电网垄断,通过市场化的定价方式还原电力的商品属性。现货电价反映了电力市场运行形态,也是市场成员进行经营决策的基本依据^[21]。在能源端交易计划部分放开下,能源端和售电侧的双边直接交易模式是对电力改革顶端设计方案的具体承接和实际执行^[22]。在形成体现时间和位置特性的日内分时电价交易机制的基础上,能为双边的中长期交易、电力期货交易、调峰调频等辅助服务提供参考,也有利于推动用户侧日内分时用电价格的实施。面对电力零售市场的激烈竞争局面,售电公司必须转变发展思路和经营理念,在电力零售市场开展新的商业模式研究,探索新的业务

方式和盈利模式,提高电力交易竞争力^[23-24],使售电公司掌握更大的电能支配权和价格调整空间,有利于售电公司采取预存电费、套餐、团购等方式吸引更多用户,形成有竞争力的电力商品类型和价格体系。

1.2 “源-售-荷”双侧日内分时电价交易模型

新一轮电改在确保电力系统电量平衡和持续稳定运行的前提下,放开部分发电和用电计划,构建交易部分去中心化的“多卖方-多买方”竞争性电力交易市场模式,允许符合条件的发电企业、售电公司或大客户通过双边交易或多边交易等方式,确定交易电量和交易价格,实现调度运行和市场交易有机衔接,有利于形成市场机制下更加合理的“源-售”端分时电价和“售-荷”端分时电价,最终形成“源-售-荷”双侧日内分时电价联动和互赢的局面。但对于电力现货市场日内分时电价交易的进行,也受到多种因素的制约,如:能源端依据能源端供给平衡、售电公司能源购买报价等选择售电公司;售电公司依据能源端供给的平衡、清洁能源优先供给、区域内电厂优先供给、政策补贴、能源上网价格等选择能源端;用户则依据售电公司提供的分时段电价及各种购电优惠方案选择售电公司购电。图1为日内分时电价交易的“源-售-荷”三方购售电模型架构及约束。

相对于电力市场的中长期计划交易而言,图1中电力现货市场在基于日内分时电价的短期交易过程中具有以下特点:

1)交易方式的不同。电力市场中长期的计划交易需要通过统一的电力交易中心完成,交易额度为计划性分配,能源交易时间与能源输配时间相隔很长;而基于日内分时电价的电力现货市场交易为日前、日内和数小时内的短期交易,能源交易时间与能源输配时间相近。且对于“多卖方-多买方”的竞争性购售电交易市场模式,可供选择的方式有很多,市场反应速度要求高,若通过统一的电力交易中心实现现货交易,不利于在市场约束下形成合理的“源-售”端分时电价和“售-荷”端分时电价,因此应采取基于能源交易互联网承载,各节点地位平等的交易部分去中心化或完全去中心化的电力现货交易模式。

2)交易方案的约束不同。电力市场中长期的计划交易往往基于期货方式采用集中采购、以量谈价,存在能源价格波动风险,也不利于降低用户侧的用电价格;而基于日内分时电价的电力现货市场

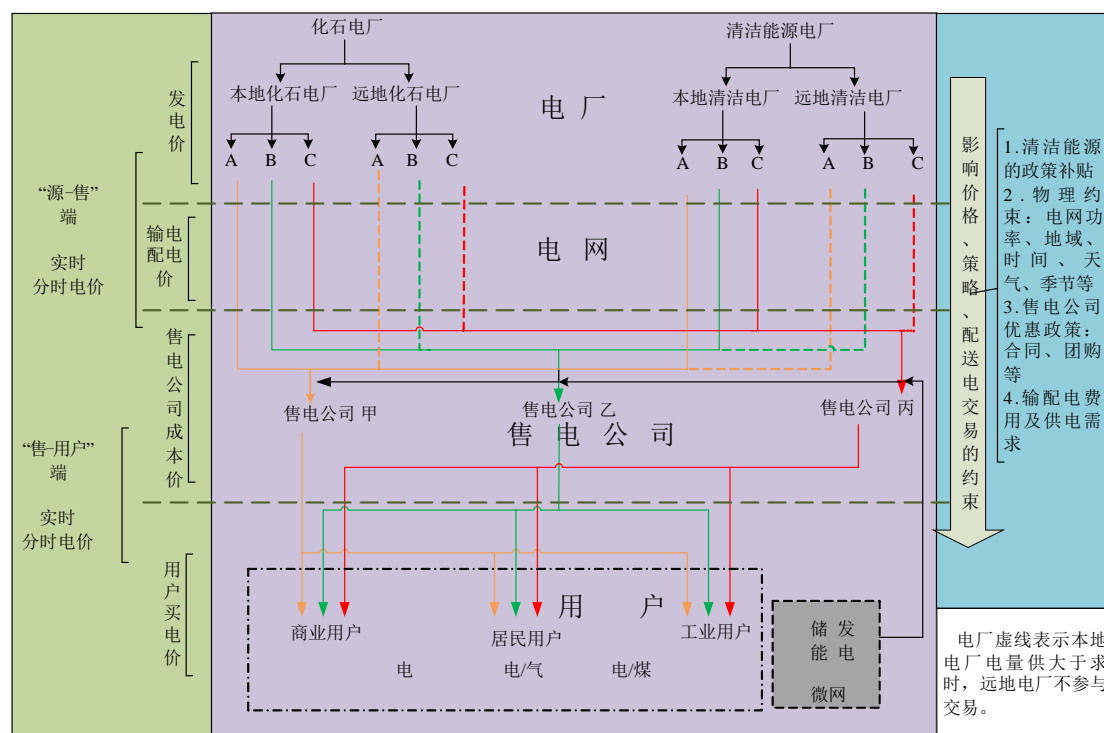


图1 日内分时电价交易购售电模型架构及约束

Fig. 1 Intraday time-of-use electricity trading model structure and constraints

交易需要对日常电量需求的不同时间段进行分析，售电公司根据不同时段用户电量使用需求的不同制定不同的购电方案，能源电厂则根据自身能源供给情况制定不同的售电方案，双方通过智能协商来保障交易的准确性和实时性。

3) 物理约束机制的不同。由于太阳能和风能等清洁能源电厂易受自然条件的影响产生供电能力波动性，以及电网功率、天气、地域、传输距离等的物理约束均会影响到电力市场中长期交易电能的输配；而实时电价交易的进行与中长期交易存在很大的不同，电力现货市场实时交易可依据精确的短时间调度功率预测和预报气象信息，避免电网功率、天气、地域等方面的限制约束。

2 基于区块链的电力现货市场模型

2.1 基于区块链的电力现货实时调度交易及监管模型

电力现货市场的运行受到多方面的制约，对于发达地区的许多省份而言，省内电力供小于求，需从外省调电，当省内电价居高，省外电价低廉时，省内电力的销售便会受到影响。而对于不发达省份，省内电力供大于求，存在窝电现象^[25]，急需将多余电量输出给发达地区供电，但跨省输电距离远，损耗大，输电配送费用的产生也会造成输电成本增加。同时，目前的电力现货交易主要采用大客

户直购电的方式，这是买卖双方基于双边博弈的协商结果，并不是全局最优协商方案^[26]。而且，基于政策补贴的清洁能源消纳方式不利于电力市场化的长期发展。另外，电力现货市场的运行还存在双侧交易安全问题、实时电力配送问题、售电公司的选择与政府监管问题以及实时电价计算问题等。

区块链中各节点地位相等，不存在完全中心化的节点，通过共识机制共同维护正常的运行^[27]。因此，在区块链的架构下，电力现货市场各节点按照时间顺序协商达成现货电价方案、输配电路径方案、交易优先级分配方案，提高了实时交易的公平性和有效性；另外，区块链分布式数据存储和可追溯性也保障了现货市场交易的完整性、不可篡改^[28]，极大保障了交易的安全。同时，由于现货市场主要针对日前、日内、数小时内的电能量交易，相对于区块链每10min生成区块的特点^[29]，实时性要求并不高，若采取电力现货市场的调度和交易每小时协商形成共识的机制，可以很好的满足电力现货交易市场的调度交易需求。因此，区块链架构下的电力现货实时调度交易及监管模型如图2所示。

图2中，针对A省和B省的电能量现货交易，以区块链技术为支撑，以ETI为信息交互基础，形成了包括区块链BC1(调度链)、区块链BC2(交易链)、区块链BC3(政府监管链)的区块链架构下的电力现货实时调度交易及监管模型。图2中：1) 区

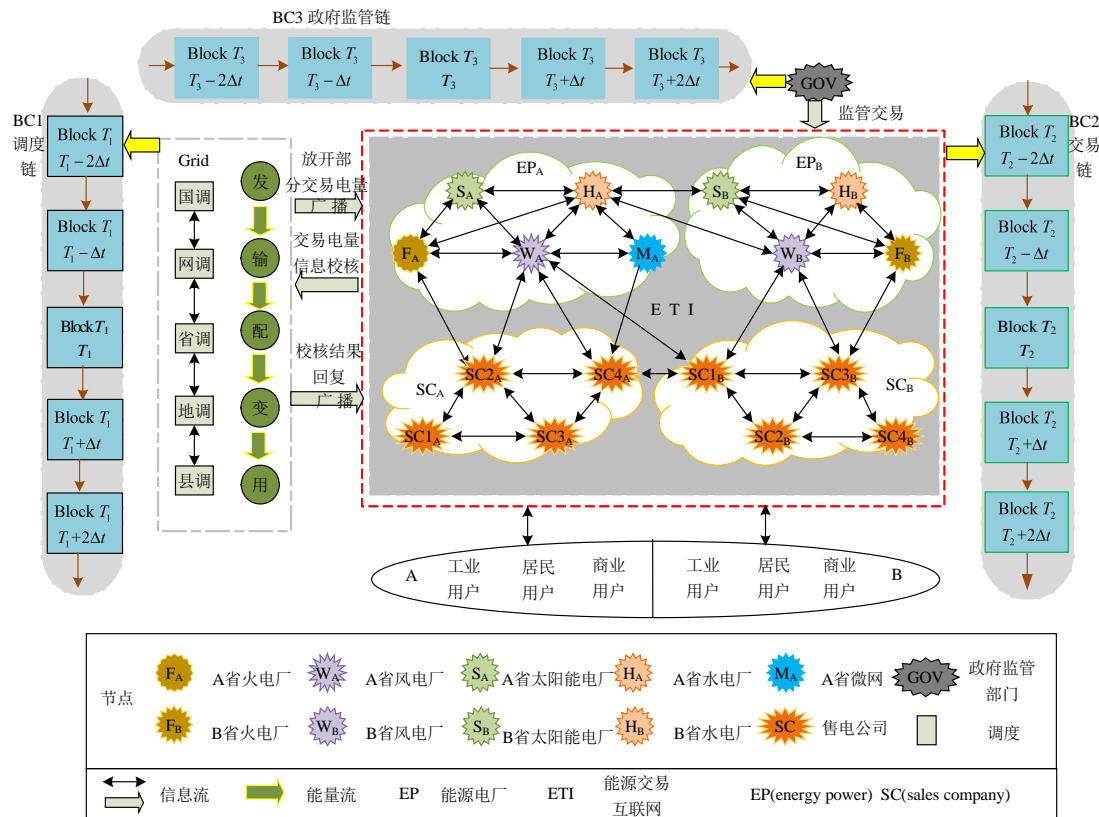


图 2 区块链架构下的电力现货实时调度交易及监管模型

Fig. 2 Electricity spot real-time dispatch transaction and regulatory model under the blockchain framework

块链 BC1 是电网的调度链，形态上属于私有链。节点类型可包括国调、网调、省调、地调和县调五个调度节点等级中的全部或部分，各调度等级节点地位平等。调度链 BC1 以固定周期生成指定时段的放开交易额度值，即在明确物理约束条件下，将该电量值广播至交易链 BC2 各节点；在交易链达成初步交易方案后，调度链负责校核该方案的可执行性，若交易达成，则按照“发-输-配-变-用”的顺序将交易电量依指定时刻和指定区域进行配送；2) 区块链 BC2 是电力现货交易链，形态上属于公共链。以 A 省和 B 省交易为例，两省的 EP(能源电厂)节点及 SC(售电公司)节点属平级节点。各 EP 节点及 SC 节点在同步接收调度链下发的对应时段的放开交易额度值后，在基于去中心化的 ETI 上进行各节点购售电量和价格信息的交互，在固定时长内协商形成对应时段的初步交易方案，并报送调度链进行校核；3) 区块链 BC3 为独立形成的数据监管链，形态上属于联盟链。各监管部门作为节点参与整个区块链交易管理，此类节点仅留存交易链各交易区块生成的哈希摘要信息，并生成摘要目录树，用于实时记录和事后监管交易链中的交易信息。

2.2 基于区块链的电力现货交易流程

参考图 2 模型，可知基于区块链的电力现货市场运行主要取决于调度链 BC1、交易链 BC2 的协调运行机制，需要具体分析在调度链 BC1 明确物理约束条件下，交易链 BC2 的价格约束条件，以及二者之间的逻辑控制关系。具体流程如图 3 所示。

针对现有计划性放开部分电量的滞后性问题，遵照区块链固定时长(10min)达成共识和生成区块的机制，结合调度中心数据处理负荷特性，调度链 BC1 各节点采取固定时长(达成共识所需时长 $\Delta t=1h$)协商指定时段的放开电量额度值。以 T_i 至 $T_i+\Delta t$ 时段为例：1) 调度链 BC1 基于对目标时段(生效时刻 $T_{ic} \geq T_i+3\Delta t$)、目标区域的线路负载规划进行放开交易额度值的计算，目标时段由生效时刻起始，同时提供该区域内各 EP 节点到各 SC 节点对应用户的输配电价，并于 $T_i+\Delta t$ 时刻将上述信息广播至 ETI 中各节点；2) ETI 中所有 EP 节点及 SC 节点同步更新 $T_i+\Delta t$ 时刻接收到的放开电量额度值数据；3) 各 EP 节点基于接收到的放开电量额度值数据，制定并向 ETI 发布从生效时刻 T_{ic} 起 1h 内的预期出售现货电量 R_{GSG} 及上网价格 P_e ，各 SC 节点基于接收到的放开电量额度值数据制定，并向 ETI 发布从生

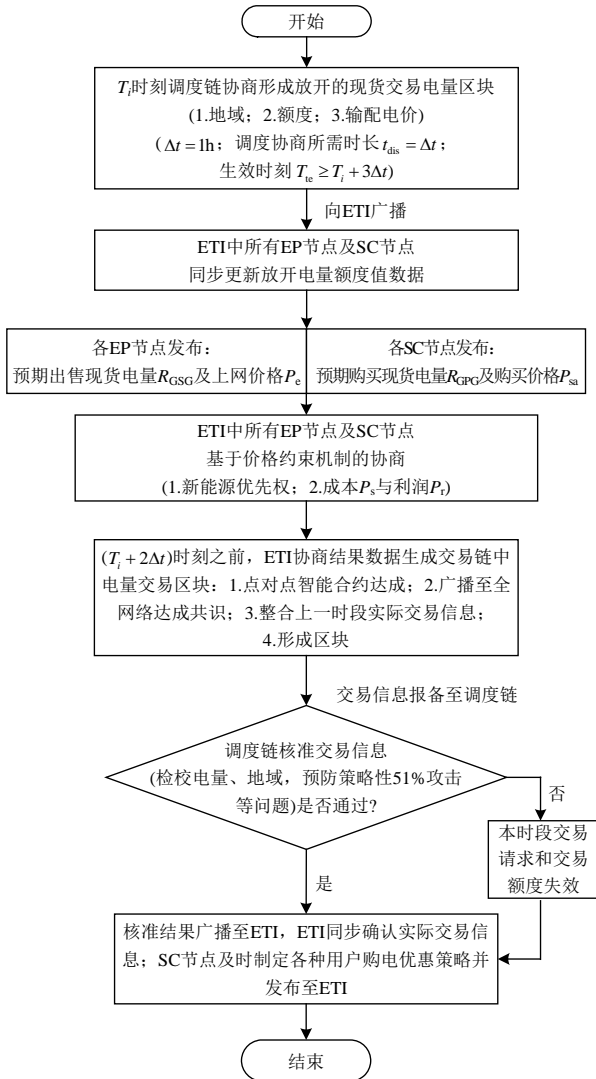


图3 区块链架构下的电力现货交易流程

Fig. 3 Electricity spot trading process under the blockchain framework

效时刻 T_{ie} 起 1h 内的预期购买现货电量 R_{GPG} 及购买价格 P_{sa} ; 4) 基于价格约束机制(如新能源优先权、成本 P_s 与利润 P_r 等), ETI 中各 EP 节点及各 SC 节点进行最优交易方案的协商; 5) $T_i + 2\Delta t$ 时刻之前, ETI 协商结果数据生成交易链中电量交易区块: 点对点智能合约达成, 广播至全网络达成共识, 整合上一时段实际交易信息, 形成区块; 6) ETI 将 $T_i + 2\Delta t$ 时刻生成的预期交易信息报备至调度链, 调度链对上报的预期交易信息进行校核, 校核内容包含各 EP 节点与各 SC 节点之间交易电量、地域等信息是否满足放开电量额度值等先期条件, 以及是否存在区块链协商共识的 51% 攻击问题; 7) 调度链向 ETI 广播校核结果, 向已获准通过的交易方案发放交易许可; 对未通过调度链核准的该次交易做驳回处理, 关闭其在本时段的申请权限, 并宣布本次下发电量额度作废, 以此保障交易的合理性和实时性,

防备数个未核准通过的交易申请在短时间内反复提交所带来的潜在分布式拒绝服务攻击隐患, 促使交易链严格遵照调度链下发的放开电量额度信息并开展交易协商。

3 区块链架构下电力现货市场运行价格约束

3.1 传统电力现货交易电价的制定及局限性

按照目前电力现货市场日内分时电价的产生机制, 在电厂、电网、售电公司、大用户之间供需关系的影响下^[30], 日内分时电价的制定以及在电价制定过程中存在交易局限性。

以图 1 中电价的形成过程为参考, 日内分时电价的形成如下所述。选取某一省份作为分析对象, 依据其省内电力需求的历史数据, 给出其电力交易实时电价, 不同时段用电量需求的不同将导致分时段电价的差异, 将一天分为若干时间段, 根据对日内不同时段用电量的分析, 即可分时段设定不同的电价。对于每一时段电价的组成如下:

设在 $t=T_a \sim T_b (a \leq b; a, b=0, 1, \dots, N)$ 时段, 发电厂的上网电价为 $P_e = \{P_n^f, P_n^{se}, P_n^{we}, P_n^{hy}, P_r^f, P_r^{se}, P_r^{we}, P_r^{hy}\}$; 其中, P_n^f 为本省化石能源电厂电价, 本省清洁能源电厂给定电价为 P_n^{se} (太阳能)、 P_n^{we} (风能)、 P_n^{hy} (水能); P_r^f 为省外化石能源电厂电价, 省外清洁能源电厂给定电价为 P_r^{se} (太阳能)、 P_r^{we} (风能)、 P_r^{hy} (水能)。

在政策鼓励清洁能源微网用户优先售电的情况下, 售电公司会优先购买微网用户的电量。按照上述要求给出了这些条件下的数学描述, 用以计算售电公司的购电成本 P_s 。数学描述如下:

$$P_s = P_m + \sum_{j \in \Omega_2} \sum_{i \in \Omega} [(P_j^i + P_{jd}) \times R_j^i \times K_i] \quad (1)$$

式中: P_m 为购买微网用户总的购电价; K_i 为是否选择该类型电厂购电, $K_i \in \{0, 1\}$ (0 为不选择该类型电厂购电; 1 为选择该类型电厂购电); P_j^i 为能源电厂上网电价; P_{jd} 为输配电费用, $P_{jd} = P_{jd} = \{P_{nd}, P_{rd}\}$ (P_{nd} 为省内输配电费用; P_{rd} 为省外输配电费用); R_j^i 为上网电价为 P_j^i 的能源电厂预留电量; $\Omega_1 = \{\text{太阳能电厂, 风能发电厂, 水力发电厂, 化石电厂}\}$; $\Omega_2 = \{\text{本省电厂, 省外电厂}\}$ 。在售电公司获利的条件下, 为了增加用户的数量、提高用户满意度, 灵活调整单位利润 $P_r (P_r \geq 0)$, 因此给定的价格即用户的购电价为:

$$P_v = \frac{P_s}{R_{\text{sum}}} + P_r \quad (2)$$

式中 R_{sum} 为售电公司购电总量。

对于不同种类的清洁能源电厂，其可发电的时段存在差异性，因此售电公司对各类清洁能源电厂的选择会受时间因素影响。如风电厂在风力满足发电要求的前提下，可达成 24h 供电；而太阳能电厂只能在白天并网供电，所以不同时段的购电成本也势必存在差异。

结合图 1 中影响电价的因素及上述分析，可初步得出如下结论：1) 目前日内分时电价的波动性很大；2) 在实际现货电价交易中，售电公司的购电方案仍相对单一；3) 用户购电方案仍需完善。因此，通过探讨日内分时电价形成机制的流程，为区块链架构下的电价交易提供参考，运用区块链技术的实时多选择购电是解决售电公司购电价格波动，提高电力交易效率，合理分配电能的优选方案。

3.2 市场约束下售电公司最优购电方案

针对 3.1 节中日内分时电价交易存在的局限性，结合图 2 区块链架构下的电力现货实时调度交易及监管模型，探讨该模型如何解决日内分时电价交易中存在的问题。模型中调度链提供放开电量、额度值及调度链校核交易信息的策略解决了电网功率约束的问题，解决了短时间预测风光新能源波动所带来的影响的问题。除功率约束及新能源供求波动因素外，电价的制定仍需考虑“售-荷”端用户之间的互信、交易时效性和效率，以及如何快速形成售电公司购电最优解等问题。区块链架构的引入解决了“售-荷”端用户之间互信的问题，节省了传统交易平台认证身份所需的必要时间，提高了交易信息交互的效率，有利于小时级电力现货市场决策的实现。在区块链架构下的电力现货交易模型中，通过基于粒子群的多目标搜索算法对售电公司购电方案进行优化，并将价格形成机制和售电公司购电策略算法融入智能合约，解决了电价制定的算力问题；对于“售-荷”端的用户购电方案选取，根据售电公司提出的各种购电优惠策略，解决了用户按需选择最优购电方案的问题。具体流程如图 4 所示。

图 4(a)描述的是交易链中售电公司在价格约束和交易优先权约束下，通过智能合约中的多选择购电方案算法实现售电公司的最优购电方案选取，保障交易的可靠性，并以 B 省为例在第 4 节中探讨该省在电力供不应求的情况下，运用该算法实现售电公司最优购电方案的获取；图 4(b)描述了在售电公

司获得最优购电方案的条件下，为用户制定不同购电优惠方案，并发布到 ETI，而用户多选择购电方式的选取，由于现阶段现货交易尚不完善，故主要考虑大用户直购电情况，售电公司重在制定吸引大用户购电的方案，提高市场竞争力。

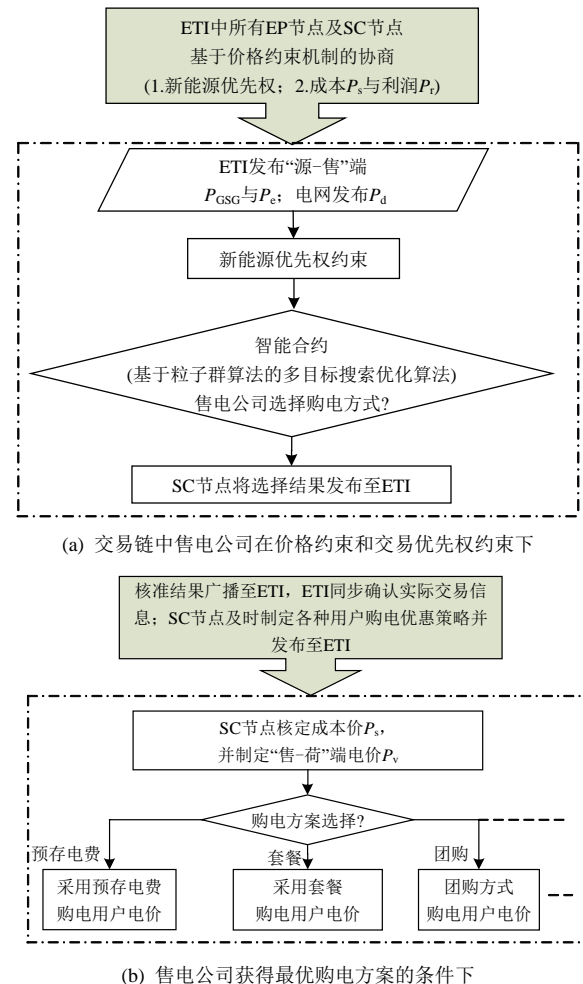


图 4 售电公司购电方案及用户购电方案选择流程
Fig. 4 Options flow chart of power company purchasing programs and user purchase program

通过对不同算法在多选择购电方案中适应性的研究，包括供求关系下采用线性算法解决多市场、多生产者的现货电价的规划模型^[31]，最终，选择参考基于粒子群算法的多目标搜索算法所解决的多目标优化问题，以多目标搜索算法对购电方案进行最优的搜索来实现区块链中各 SC 节点的最优购电方案的制定。通过研究该算法的数学模型、算法流程、粒子非劣解集的形成，对该算法在电力现货市场中“多卖方-多买方”的实时电能交易最优方案选取进行试用，模拟出在电力现货市场约束条件下售电公司购电的多选择方案中的最优解，在最优购电方案下成本最低。

一般情况下，多目标优化问题由多个目标函

数、决策变量参数和约束条件组成,由随机解通过迭代计算来寻找最优解^[32]。粒子寻优即产生非劣解的过程,包括初始筛选非劣解和非劣解集更新,在粒子更新前从非劣解集中随机选择一个粒子作为群体的最优。其中粒子的更新公式如下:

$$V^{k+1} = \omega V^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X^k) \quad (3)$$

$$X^{k+1} = X^k + V^{k+1} \quad (4)$$

式中: V 为粒子速度; k 为当前迭代次数; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为常数; r_1 、 r_2 为区间[0,1]的随机数; P_{id}^k 为个体最优粒子位置; P_{gd}^k 为全局最优粒子位置; X 表示粒子位置^[33]。

通过这种多目标搜索算法,在“多卖方-多买方”的实时电价交易过程中,以 B 省为例,对该省一家售电公司购电方案进行寻优。假设有 5 种类型电厂(包括微网)参与 B 省售电交易竞争,每种发电能源电厂又有 5 个省份(包括 B 省本身)参与,这 5 个省份的各类型能源电厂对 B 省电量交易所满足的放开交易电量额度值、上网电价不同,输配电费用也不同。根据粒子群多目标搜索算法建立该交易过程的数学模型,以 P 表示各能源电厂上网电价, R 表示各能源电厂满足放开交易的电量额度值,以 P_d 表示各能源电厂的平均输配电费用,建立 P 、 R 、 P_d 三个变量之间的函数关系如下:

$$\min P_e = \sum_{i=1}^5 P_i X \quad (5)$$

$$\max R_x = \sum_{i=1}^5 R_i X \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\sum_{i=1}^5 (P_i + P_{di}) R_i}{\sum_{i=1}^5 R_i} \leq 0.50 \quad (7)$$

式中: P_e 为能源交易电厂的电价; R_x 为能源交易电厂满足放开交易的电量额度值; P_{di} 为输配电费用; X 表示所选择的电厂,方案选择的约束平均电价为 0.5 元/(kW·h)。实际研究过程中,为了实现方案选择的最大随机性,对算法进行了优化,不局限于在每种能源电厂中挑选一个价格最低的电厂购电,而是在整体数据中挑选最佳电量及电价组合方案,同时多电厂购电方案可以在化石电厂发电成本增加的现状下减轻对化石电厂的依赖性。在市场约束下,依据售电公司购电量需求和电价最低原则,将该优化算法加入智能合约中执行,保障售电公司最优购电方案选取的智能化和公开化。

4 售电公司最优购电方案算法仿真

在区块链架构下的电力现货交易中,售电公司的多选择购电方案是交易链实现的重点,各省份 EP 节点处于同样的竞争地位。同时,按照基于粒子群算法的多目标搜索优化算法,在智能合约中执行售电公司多选择购电方案的选取,提高现货交易的效率,解决目前售电公司购电信息延迟,购电来源单一的问题。下面通过该算法在 MATLAB 中的仿真,实现售电公司购电最优解的搜索结果,并通过以下两种价格模型的对比,展现基于区块链的 ETI 信息交互的及时性,保障能源交易电厂的交易价格得到及时调整,提高其市场交易竞争力。

4.1 模型一

在参考目前各能源电厂在政府补贴下的上网电价的基础上,根据 3.2 节电价形成实例以 B 省的市场化电力现货交易为仿真模型。参与此次 B 省电力现货交易的省外能源电厂包括 C 省、D 省、E 省和 F 省的部分能源电厂,建立以 B 省、C 省、D 省、E 省和 F 省为例的实时电价交易模型。

假定参与此次 B 省售电公司购电方案竞争的各能源电厂上网电价、满足放开交易的电量额度值以及跨省输配电费用平均价格如表 1—3 所示。其中 1 代表太阳能电厂、2 代表风能发电厂、3 代表水力发电厂、4 代表化石电厂、5 代表微网。参与的交易数据如表 1—3 所示。

将表 1—3 中的数据按照多目标搜索算法中的

表 1 5 省份 5 种类型能源电厂上网电价表

Tab. 1 5 provinces 5 types of power plant tariffs 元/kW·h

省份	1	2	3	4	5
B 省	0.65	0.57	0.31	0.36	0.58
C 省	0.65	0.56	0.33	0.32	0.60
D 省	0.55	0.45	0.35	0.37	0.58
E 省	0.55	0.40	0.13	0.25	0.55
F 省	0.75	0.61	0.21	0.31	0.57

表 2 5 省份 5 种类型能源电厂满足
放开交易的电量额度值表

Tab. 2 Table of five provinces and five types of
energy power plants to meet the liberalization of

trading quotas					千 kW·h
省份	1	2	3	4	5
B 省	1500	1400	800	1600	400
C 省	1200	1000	500	2200	0
D 省	0	1400	650	1800	0
E 省	1450	1150	1800	2000	0
F 省	0	1300	2200	0	0

表 3 5 省份 5 种类型能源电厂平均输配电费用表
Tab. 3 Table of 5 provinces and 5 types of power plant
average transmission and distribution cost 元/(kW·h)

省份	1	2	3	4	5
B 省	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
C 省	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
D 省	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
E 省	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
F 省	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

仿真方式列成矩阵参与仿真过程，仿真实验中为了鼓励微网用户的发展，提高省内微网电量的消纳，且当售电公司愿意利用微电网提供综合能源服务来提高政府的支持率和自身的竞争优势^[34]时，在此次最优方案仿真过程中减去 0.2 元/kW·h 的微网上网电价。其中预留电量为 0 的数据表示此刻该类型能源电厂不参与 B 省电量竞争交易。按照优化方案及交易约束我们得到图 5 仿真结果。MATLAB 仿真非劣解结果中，横轴为该非劣解中的购电总量，纵轴为该非劣解下的平均电价，其非劣解结果对应如下所列矩阵，共包含 5 种非劣解，每一行代表一种非劣解，X-Y 表示选择购电方式(非劣解)的位置。

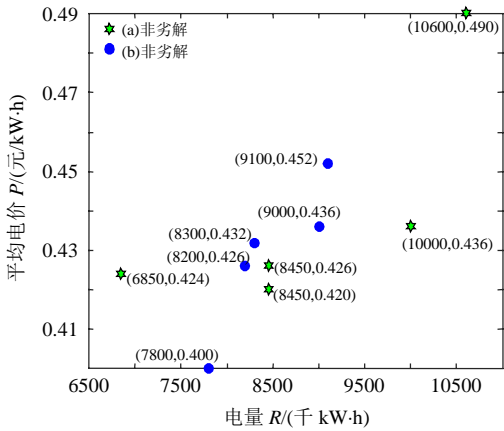


图 5 MATLAB 仿真结果图
Fig. 5 Chart of MATLAB simulation results

4-4	5-3	2-4	3-2	3-4
1-3	4-3	3-3	5-3	4-4
1-5	1-3	3-3	1-4	4-3
5-3	4-3	4-4	2-4	1-3
1-3	1-4	3-3	4-3	4-4

根据实际电价在矩阵中对应的位置计算每种方案的总电量和平均电价，因此售电公司可根据实时电价和电量的需求，在 5 种方案中选取最优购电方式。方案总电量及平均电价如下：

1) 方案中的总电量为 10600 千 kW·h，平均电价为 0.490 元/(kW·h)；

2) 方案中的总电量为 8450 千 kW·h，平均电价为 0.426 元/(kW·h)；

3) 方案中的总电量为 5250 千 kW·h，平均电价为 0.420 元/(kW·h)；

4) 方案中的总电量为 10000 千 kW·h，平均电价为 0.436 元/(kW·h)；

5) 方案中的总电量为 6850 千 kW·h，平均电价为 0.424 元/(kW·h)。

若选取方案 3) 购电则需考虑微网用户的实际上网电价，售电公司并做出相应差额补贴。按照该算法选取的购电方案是在市场约束下的最优选择，有利于电力商品市场化的发展，同时保障售电公司购电方式的多样性、智能性和可靠性。

4.2 模型二

参考模型一中售电公司的最优购电方案可知，在实际电量交易中清洁能源电厂参与交易的竞争力较弱。若这些能源电厂能够及时的获取近时段交易信息，同时调整自身下一阶段的交易电价，是否能够提高自身的交易竞争力，降低该能源的浪费。如下给出在满足放开交易电量额度值不变的情况下，调整交易价格后的交易数据如表 4、5 所示。

表 4 5 省份 5 种类型能源电厂上网电价表
Tab. 4 5 provinces in 5 types of power plant tariffs 元/(kW·h)

省份	1	2	3	4	5
B 省	0.45	0.40	0.31	0.36	0.58
C 省	0.50	0.46	0.33	0.32	0.60
D 省	0.45	0.35	0.35	0.37	0.58
E 省	0.40	0.30	0.13	0.25	0.55
F 省	0.55	0.51	0.21	0.31	0.57

表 5 5 省份 5 种类型能源电厂平均输配电费用表
Tab. 5 Table of 5 provinces and 5 types of power plant
average transmission and distribution cost 元/(kW·h)

省份	1	2	3	4	5
B 省	0.03	0.03	0.08	0.08	0.08
C 省	0.13	0.13	0.18	0.18	0.18
D 省	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10
E 省	0.18	0.18	0.23	0.23	0.23
F 省	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20

在同样保障微网用户电量优先级的基础上，仿真图示非劣解结果如图 5(b)所示，仿真图示中对应的 5 种非劣解位置矩阵如下：

4-3	4-4	2-4	1-1	1-4
3-2	1-4	4-3	5-3	1-3
3-2	1-3	2-4	4-4	4-3
2-4	3-3	4-4	4-2	1-4
4-4	4-3	1-4	3-2	1-1

该方案下,在5种方案中选取最优购电方式。方案总电量及平均电价如下:

1) 方案中的总电量为 9100 千 kW·h, 平均电价为 0.452 元/(kW·h);

2) 方案中的总电量为 7800 千 kW·h, 平均电价为 0.400 元/(kW·h);

3) 方案中的总电量为 8200 千 kW·h, 平均电价为 0.426 元/(kW·h);

4) 方案中的总电量为 9000 千 kW·h, 平均电价为 0.436 元/(kW·h);

5) 方案中的总电量为 8300 千 kW·h, 平均电价为 0.424 元/(kW·h)。

分析这5种优化方案,与模型一中的五种优化方案相比,根据矩阵数据 X-Y 中 Y 出现 1、2 的概率,可以看出太阳能和风能发电厂参与电价交易的比例上升了。因此,清洁能源电厂在实时电价交易中,可以在电网输配电费用补贴的基础上,参考粒子群优化算法中的购电平均电价、购电总量和清洁能源电厂参与交易比例来降低自身的上网电价,提高清洁能源的消纳和竞争优势。

通过对图 5(a)和(b)各方案的比较可知,在及时调整清洁能源电厂上网电价后,可以提高清洁能源的交易竞争力,减少清洁能源的浪费。同时,该仿真结果表明,在区块链架构下的电力现货交易中,将该算法在智能合约中以程序化脚本运行,能够保障 ETI 中的各 EP 节点和 SC 节点之间交易的智能性、交易数据的多元性、交易信息的及时性等;保障能源电厂及时调整上网价格,同时为售电公司选择最优购电方式提供了信任机制和可靠性,其交易去中心化的特点能够提高实时交易的效率,促进电力现货交易的发展。

5 结论

本文研究了区块链在电力现货市场中的运行模式,将电力市场交易链化并与智能合约融合,保障了交易的可靠性和大数据交易的实时性、准确性,设计了由调度链向交易链广播协商形成的允许电力现货市场交易的电量额度、地域等信息的机制,解决了调度侧物理约束条件如何作用于电力现货市场的问题,形成了“源-售-荷”各节点之间的信任机制,提高了用户购电的满意度。优化的多目标搜索算法为售电公司实时购电方案提供了最优选择,进而推广至“多卖方-多买方”的电力现货市场电价交易。通过对比模型一和模型二,得出了

降低清洁能源的上网电价是提高清洁能源电厂参与电价交易竞争力主要方式的结论。此外,模型二的结果表明:在区块链去中心化的基础上,清洁能源电厂通过对电价交易信息的实时分析,实现了上网电价竞争力的最优化。在区块链架构下电价交易的博弈机制目前尚不完善,希望本文能为进一步研究区块链技术在电力现货市场的应用提供参考。

参考文献

- [1] 霍沫霖,何胜.电力市场化改革对需求响应的影响[J].供用电,2017,34(3): 15-20.
Huo Molin, He Sheng. The impact of electricity market reform on demand response[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(3): 15-20(in Chinese).
- [2] 邹鹏,陈启鑫,夏清,等.国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J].电力系统自动化,2014,38(13): 18-27.
Zou Peng, Chen Qixin, Xia Qing, et al. Logical analysis of electricity spot market design in foreign countries and enlightenment and policy suggestions for China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 18-27(in Chinese).
- [3] 王中夫.适应市场环境的多时间尺度优化调度研究[D].广州:华南理工大学,2016.
Wang Zhongfu. Research on multi-time scale optimal scheduling adapted to electricity market environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016(in Chinese).
- [4] Liu A L. Repeated games in electricity spot and forward markets - An equilibrium modeling and computational framework[C]//Proceedings of the 48th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing(Allerton). Allerton, IL, USA: IEEE, 2010: 66-71.
- [5] 朱继忠.美国电力市场的发展和实现方法分析[J].南方电网技术,2015,10(5): 22-28, 101.
Zhu Jizhong. Development and implementation method of electricity market in the USA[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(5): 22-28, 101(in Chinese).
- [6] 史连军,邵平,张显,等.新一代电力市场交易平台架构探讨[J].电力系统自动化,2017,41(24): 67-76.
Shi Lianjun, Shao Ping, Zhang Xian, et al. Discussion on architecture of new-generation electricity trading platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 67-76(in Chinese).
- [7] 国家发改委和能源局发布《开展电力现货市场建设试点工作的通知》[J].能源研究与利用,2017(5): 500.
National Development and Reform Commission and National Energy Administration issued Notice on Piloting

- the Construction of Electric Power Spot Market[J]. Energy Research & Utilization, 2017(5): 500(in Chinese).
- [8] 国家发改委取消跨省发电、供电计划[J]. 中国电力企业管理, 2017(32): 7.
National Development and Reform Commission canceled cross-provincial power generation and power supply plans[J]. China Power Enterprise Management, 2017(32): 7(in Chinese).
- [9] 马瑞, 刘宁宁, 侯倩, 等. 河北省南部电网电力市场化风险对冲分析[J]. 河北电力技术, 2016, 35(5): 34-36.
Ma Rui, Liu Ningning, Hou Qian, et al. Risk hedging method for power supply market in Hebei southern network[J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(5): 34-36(in Chinese).
- [10] 冯伟林. 现货与期货交易并存的电力市场理论建模与实证研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
Feng Weilin. Theoretic modeling and empirical research of electricity market with spot and futures trade [D]. Changsha: Hunan University, 2009(in Chinese).
- [11] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
Zeng Ming, Yang Yongqi, Liu Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124(in Chinese).
- [12] 曾鸣, 程俊, 王雨晴, 等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3672-3681.
Zeng Ming, Cheng Jun, Wang Yuqing, et al. Primarily Research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681(in Chinese).
- [13] Yli-Huumo J, Ko D, Choi Sujin, et al. Where is current research on blockchain technology?—a systematic review [J]. PLoS One, 2016, 11(10): e0163477.
- [14] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
Ouyang Xu, Zhu Xiangqian, Ye Lun, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745(in Chinese).
- [15] 施泉生, 刘坤, 温蜜. 基于区块链技术的跨省发电权交易模型[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 15-23.
Shi Quansheng, Liu Kun, Wen Mi. Interprovincial generation rights trading model based on blockchain technology[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 15-23(in Chinese).
- [16] 李彬, 张洁, 祁兵, 等. 区块链: 需求侧资源参与电网互动的支撑技术[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 1-8.
Li Bin, Zhang Jie, Qi Bing, et al. Block chain: supporting technology of demand side resources participating in grid interaction[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 1-8(in Chinese).
- [17] 杨晓东, 张有兵, 卢俊杰, 等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3703-3716.
Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Lu Junjie, et al. Blockchain-based automated demand response method for energy storage system in an energy local network [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3703-3716(in Chinese).
- [18] Sabounchi M, Wei Jin. Towards resilient networked microgrids: blockchain-enabled peer-to-peer electricity trading mechanism[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2017.
- [19] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.
Sun Hongbin, Guo Qinglai, Pan Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013(in Chinese).
- [20] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
Sun Hongbin, Guo Qinglai, Pan Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [21] 李灿, 龚乐年, 宋燕敏, 等. 电力市场中现货电价的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(6): 67-70.
Li Can, Gong Lenian, Song Yanmin, et al. The analysis of spot prices in electricity market[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(6): 67-70(in Chinese).
- [22] 张晨. 售电放开政策下电力交易多方主体利益分析模型研究[D]. 北京: 华北电力大学北京, 2016.
Zhang Chen. Research on multi-party principal interest analysis model of power trading under the policy of selling electricity[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016(in Chinese).
- [23] Salies E, Price C W. Charges, costs and market power: the deregulated UK electricity retail market[J]. The Energy Journal, 2004, 25(3): 19-35.
- [24] Roozbehanit M, Rinehart M, Dahleh M A, et al. Analysis of competitive electricity markets under a new model of real-time retail pricing[C]//Proceedings of the 8th International Conference on the European Energy Market. Zagreb, Croatia: IEEE, 2011: 250-255.

- [25] 沈方, 宋卓然, 张明理, 等. 电力体制改革进展及存在问题浅析[J]. 东北电力技术, 2017, 38(5): 1-5.
Shen Fang, Song Zhuoran, Zhang Mingli, et al. Research on development of Liaoning power grid based on electric power system reform[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(5): 1-5(in Chinese).
- [26] 王兆明. 基于双边多目标和时间限制的讨价还价协商模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(S1): 272-277.
Wang Zhaoming. Negotiation model of bargaining based on bilateral multi-goal and time constraint[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(S1): 272-277(in Chinese).
- [27] Qian Xiaochao. PoS cryptocurrency with no blockchain [J]. IACR Cryptology ePrint Archive, 2014, 2014: 330.
- [28] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
Zhang Jun, Gao Wenzhong, Zhang Yingchen, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: Needs, concepts, approaches and vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554(in Chinese).
- [29] Göbel J, Krzesinski A E. Increased block size and Bitcoin blockchain dynamics[C]//Proceedings of the 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2017: 1-6.
- [30] 刘博, 李军祥, 高岩. 智能电网分类用户实时电价算法研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2605-2609.
Liu Bo, Li Junxiang, Gao Yan. Research on real-time pricing algorithm for classified subscribers on smart grid[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(9): 2605-2609(in Chinese).
- [31] Qin R Y, Heo J H. The lead-lag relationship between volatility index futures and spot in the Korean stock market[J]. Social Science Electronic Publishing, 2017.
- [32] 王荣海, 胥勋涛, 申慧. 基于粒子群优化算法的多目标搜索算法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(1): 24-27.
Wang Ronghai, Xu Xuntao, Shen Hui. Multi-objective searching algorithm based on particle swarm optimization [J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(1): 24-27(in Chinese).
- [33] 郁磊. MATLAB 智能算法-30 个案例分析[M]. 北京航空航天大学出版社. 2011.
Yu Lei. MATLAB intelligent algorithm-30 case studies[M]. Beihang University Press, 2011(in Chinese).
- [34] Mohammadreza Mazidi, Alireza Zakariazadeh, Shahram Jadid, et al. Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86(10): 1118-1127.

收稿日期: 2017-12-14。

作者简介:

龚钢军(1974), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, gong@ncepu.edu.cn;

王慧娟(1994), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, wang594292080@163.com;

张桐(1992), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链在能源互联网中的应用、能源电力信息安全, Zhangtong0804@126.com。

(责任编辑 乔宝榆)



龚钢军

Research on Electricity Market About Spot Trading Based on Blockchain

GONG Gangjun, WANG Huijuan, ZHANG Tong, CHEN Zhimin, WEI Peifang,

SU Chang, WENG Yafeng, LIU Xiangjun

(North China Electric Power University)

KEY WORDS: power system reform; electricity spot market; intraday time-of-use tariff mechanism; blockchain; energy trading internet (ETI); multi-target search algorithm

The power spot market faces constraints such as cross-regional transaction control, energy types and transaction priorities, smart trading patterns, coordinated scheduling and physical constraints, industry and government supervision, financial settlement, and policy subsidies, etc. Combined with the scenes of the power spot trading market, and based on the similar network topology of blockchain and power spot market system, the paper further analyzes the structure of the electricity spot trading market, and the trading, dispatching mechanism of power commodity under the case of partial decentralization. Beyond that, it also researches the correlation and restriction of the two-side electricity price mechanism between "source-sell-charge" within one day, government supervision and the data security.

This paper deals with the demands of the intelligence, real-time and security of the electric spot market transactions, and constraints about electricity price in different time within a day are analyzed. Based on the blockchain, they are designed to electricity spot real-time dispatch transaction and regulatory model. Further, it also expounds the transaction flow and operation mechanism of this model and the impact of electricity spot price. A mechanism was designed to broadcast from the dispatch chain to the transaction chain and negotiate the trading information that are allowed in the electricity spot market such as the amount of electricity, geographic area, etc. It solves the problem of how the physical constraint conditions on the dispatch side affect the power spot market, and forms the trust mechanism among the source-sell-load nodes, which improves the customer satisfaction with electricity purchase.

Through the smart contract, the optimization algorithm of multi-objective search based on particle swarm optimization that use multi-objective search is run by a programmatic script. Taking the purchase and sale of electricity between multi-energy power plants and a province's electricity sales companies as an example, through the analysis of electricity, electricity prices, transmission and distribution costs, this algorithm is used

to simulate electricity sales companies under open electricity to choose the optimal power purchase program. The main formulas are as follows:

$$\min P_e = \sum_{i=1}^5 P_i * X \quad (1)$$

$$\max R_x = \sum_{i=1}^5 R_i * X \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad [\sum_{i=1}^5 (P_i + P_{d_i}) * R_i] / (\sum_{i=1}^5 R_i) \leq 0.50 \quad (3)$$

When the simulation achieves an optimal solution, the participation rate of clean energy power plants is still low, so it is necessary to adjust the clean energy feed-in tariff. Then they are compared under the same simulation algorithm, as shown in Fig. 1.

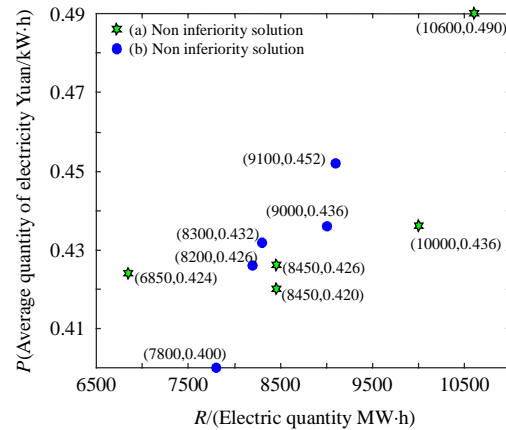


Fig. 1 Chart of MATLAB simulation results

Group (a) shows the optimal solution distribution before the price adjustment, and group (b) shows the optimal solution distribution after reducing the on-grid price of clean energy. Through comparison, it can be analyzed that adjusting the price of clean energy power plants is an effective way to increase the competitiveness of clean energy online.

In ETI, the nodes of the power sales company conduct the interaction of information on the optimal way of power purchase to ensure the real-time nature of transaction information, improve transaction efficiency and provide data reference for future price adjustment of clean energy power plants.