

## 适应分布式发电交易的分散式电力市场探讨

肖 谦<sup>1</sup>, 陈 政<sup>1</sup>, 朱宗耀<sup>2</sup>, 王秀丽<sup>2</sup>, 匡 熠<sup>2</sup>, 陈先龙<sup>2</sup>

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东省广州市 510080;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

**摘要:** 随着可再生能源发电技术的成熟及安装运行成本的不断降低, 分布式发电得到了快速的发展, 并由此产生了大量的电力产消者。然而分布式发电由于容量小、波动性大、分布零散等特点, 并不适合参与现行的电力市场。针对此问题, 文中结合国外电力零售市场研究和中国分布式电力交易的实际情况提出了一种配电网层面下的分散式电力市场模式, 并分别从市场定义、参与主体、交易方式、时间尺度、出清方式等方面进行了分散式电力市场的框架设计。然后, 针对分散式电力市场交易平台难以建立的问题, 研究了将区块链技术应用于分散式电力市场构建的可行性及交易实现流程。最后, 分别从政策法规和市场建设要点2个方面分析了构建分散式电力市场需要注意的问题。

**关键词:** 分布式发电; 电力产消者; 零售市场; 分散式电力市场; 区块链技术

### 0 引言

随着电力系统向低碳化转型, 未来将逐步实现高比例可再生能源供电的目标, 而随着可再生能源发电技术的成熟及安装成本的不断降低, 小规模分布式发电(distributed generation, DG)也将发挥重要作用<sup>[1-2]</sup>。与此同时, 一些传统的电力用户也变成了具有发电和用电2种行为的电力产消者(Prosumers)<sup>[3-4]</sup>。然而, 当前大部分用户仍不能自主选择供电商或直接参与现有的电力市场。同时, 相比于批发市场, 零售市场相关的市场模式及交易机制研究也相对较少。合理的市场机制应在保证电力系统安全稳定运行的基础上具备充分整合利用终端用户额外电力及需求侧响应的能力<sup>[5-6]</sup>。

相比集中式可再生能源发电, 分布式发电具有数量多、容量小、电压等级低、出力波动性更大、分布零散等特点<sup>[7]</sup>, 不适合参与传统的电力批发市场<sup>[8]</sup>。因此, 建立配电网层面下适应高渗透率分布式发电交易的电力市场对于促进可再生能源就近消纳具有重要的意义<sup>[9-10]</sup>。但目前国内对于适合分布式发电交易的电力市场研究仍非常有限, 国外针对配电网层面下需求侧响应资源与分布式发电交易提出了多种全新的零售市场模式。文献[11]提出了一

种电能与输电服务相互独立交易的电力分布式交易远景模式。文献[12]以居民住宅为主要研究对象提出了“虚拟配电网”的概念并作为一种配电网管理的新模式。文献[13-14]设计了一种点对点(peer-to-peer, P2P)对等交易的地方性电力市场模式, 并研究了市场成员报价策略对出清结果的影响。本文结合国外研究与国内分布式电力交易情况提出了一种配电网下具有区域自治性的分散式电力市场(decentralized electricity market, DEM)概念, 详述了其框架设计及其对分布式电力交易的意义。但由于分布式发电容量小、利润低微、分布零散的特点, 造成了DEM交易平台构建成本高并且盈利低的问题。

区块链技术具有去中心化、交易透明、时间可溯等特点, 近年来其在电力行业的应用研究也逐渐兴起。文献[15]分析了异构区块链在多能交易体系中的适用性及关键技术。文献[16-17]从不同维度与视角分析了区块链技术和能源互联网理念的兼容性。文献[18]利用区块链技术管理微电网内能量与需求侧响应交易, 以减小交易成本并提高交易的安全性。但由于区块链仍属于一个快速发展且却尚未成熟的新兴技术, 目前其在电力零售市场方面的应用研究仍然较少。

本文首先分析总结了当前分布式发电参与市场交易的方式, 然后从市场定义、市场参与主体、交易方式、时间尺度、优化目标及出清方式等方面提出了

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-08-05。

上网日期: 2019-11-12。

南方电网公司科技项目(ZBKJXM20170075)。

DEM的框架设计,并研究了建立DEM的必要性。接着针对DEM交易平台难以建立的问题,研究了将区块链技术应用与DEM交易平台构建的可行性及交易实现流程,并分析了区块链网络类型的部署及应用于DEM的挑战。最后,分别从政策法规和市场建设要点2个方面分析了构建DEM需要重点关注和解决的问题。

## 1 分布式发电交易机制

分布式发电已经成为一种重要的发展趋势。图1为当前分布式发电参与市场交易的4种主要模式,其中M代表电力市场。图1(a)中,分布式发电通过配电商或售电公司参与交易。图1(b)中,用户间可以灵活地就近进行P2P对等交易,是未来能源交易的一种全新的市场模式<sup>[19]</sup>。图1(c)中,各分布式单元通过微电网参与交易,微电网作为一个独立的电力生态系统既可以并网运行也可孤岛运行<sup>[20]</sup>。图1(d)中每个虚线圈代表一个虚拟电厂,相比微电网,虚拟电厂强调对外呈现的功能和效果,主要通过通信技术来整合各分布式电源及需求侧响应资源等来对上层电网提供快速响应的辅助服务,并通过市

场交易获得规模经济效益<sup>[21]</sup>。表1为4种市场模式的分析对比。

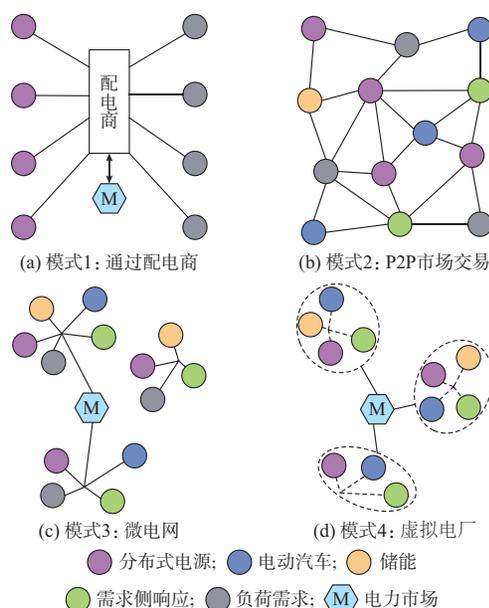


图1 促进分布式发电消纳的市场机制  
Fig. 1 Market mechanism for promoting the accommodation of distributed generation

表1 不同市场机制对比  
Table 1 Comparison of different market mechanisms

市场模式	市场参与主体	获利方式	主要难点、挑战	典型工程
1	分布式发电	通过向配电商或售电公司出售电能获益	消纳问题,弃风弃光问题严重	目前常见的分布式发电消纳模式,如重庆的居民分布式光伏并网项目
2	电力消费者及电力生产者	用户间通过相互就近交易达到盈利及减小用电成本的目的,同时也可与批发市场进行交易	①P2P市场交易平台的建立; ②交易监管及问责机制	Brooklyn社区微电网 <sup>[19]</sup> ,通过区块链技术搭建的一个DEM的交易平台,社区内部用户可以相互间交易电能
3	微电网:分布式发电、储能、用户等	优化利用微电网内各分布式单元,整体参与批发市场,寻求整体效益的最大化	①电压及频率的控制策略; ②大量分布式资源的优化协调	张北风光储微电网 <sup>[20]</sup> ,负责张北基地研究实验楼办公及生活供电,实现了离并网自动无缝切换
4	虚拟电厂:分布式发电、具有需求侧响应能力的用户	整合分布式发电及具有需求侧响应的用户,通过向电网提供辅助服务来获益	①先进的调控、计量及通信技术; ②各分布式发电及用户的合理整合	Eneco Group公司建立的虚拟发电厂软件平台 <sup>[21]</sup> ,允许调用分布式发电及需求侧响应资源,并负责为荷兰和比利时的200万客户供电

分布式可再生能源发电由于容量小,功率波动大等原因并不具备直接参与目前电力市场交易的能力<sup>[22-23]</sup>,其盈利模式只能是利用政策补贴或通过第三方整合代理后进行交易。但第三方所提供的价格是要低于实际的市场价格,而长期的政策补贴也不利于分布式可再生能源的技术进步及可持续发展<sup>[24]</sup>。因此,有必要建立配电网层面下的适合分布式电力自由交易的市场模式,通过市场化的手段来整合协调大量分散的分布式电源及具备需求侧响应的用户等。

## 2 DEM

如图2所示,传统的电力系统通过中心化的分层结构将电能分别通过输电网及配电网进行单向传输,而电力终端用户作为价格接受者购买电能<sup>[25]</sup>。交易的电能主要来源于少数的集中式大规模电厂,并不具备整合数量众多且分布零散的小规模分布式发电的能力<sup>[26-27]</sup>。随着配电网层面下大量具有分布式发电及需求侧响应能力用户的不断出现,如光伏发电、风力发电、电动汽车、储能装置等,传统的电力用户逐步转变为电力生产者,将在市场中扮演更加

主动的角色,功率流动也由单向流动变为双向流动<sup>[28-29]</sup>。此时,传统单一的分布式发电交易机制难以充分整合利用不同类型、不同区域的分布式电力及需求侧响应,同时完全中心化的管理也难以实现大规模分布式单元的优化调度。因此,构建一个相对去管制的DEM,因地制宜地制定灵活多样的市场交易机制,使市场中的主体可以积极主动地寻求交易,通过市场化的手段达到不同资源优化配置的目的具有重要意义。

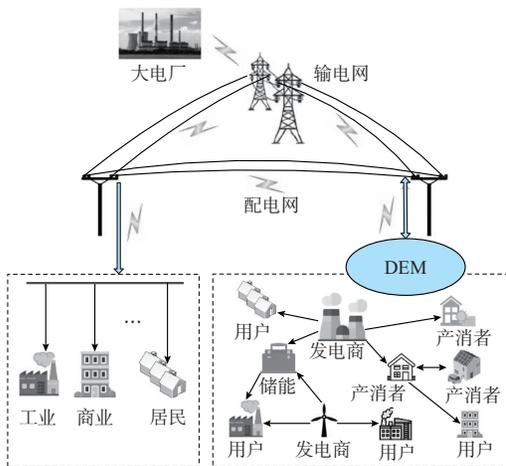


图2 DEM示意图  
Fig.2 Schematic diagram of DEM

### 2.1 DEM定义

DEM是一个全新的市场模式,是配电网层面下一个相对去管制的、自由交易的电力市场。通过为一定地理范围内的电力消费者与电力产消者提供一个交易平台,促进本地供需用户间的电力交易,实现能源共享,分布式发电就近消纳的目的。DEM市场模式应具有P2P交易、可协商性、共享能源、公平竞争、以用户为中心等特点<sup>[30-31]</sup>,可促进用户更加积极主动地参与市场。

如图3所示,批发市场及零售市场均为DEM的上层市场,DEM运营于零售市场下,而对于市场内部大容量的分布式发电或虚拟电厂等聚合商也允许其参与批发市场。DEM在满足内部供需平衡的基础上,还可与上层电网交互电能以达到削峰填谷、提高整个系统稳定性和经济性的目的。DEM的市场规模应根据具体区域的电力供需情况、用户特点等进行建设,其运营管理可设立DEM交易平台,平台内包含交易系统及调度系统2个系统模块,分别负责市场交易机制的制定执行和系统调度的安全校核。本文研究重点在于市场框架及交易机制设计,暂未考虑网架结构,因此未对安全校核问题进行分析。

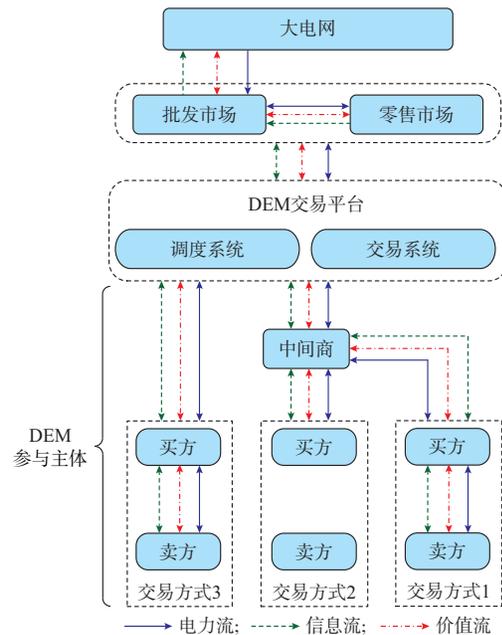


图3 DEM交易示意图  
Fig.3 Schematic diagram of DEM transaction

### 2.2 市场参与者

如图3所示,DEM中的市场参与者主要可分为以下3类。

1)卖方:具有额外电力出售的产消者,包括具有分布式发电、储能及需求侧响应能力的用户等<sup>[32-33]</sup>。此外,电动汽车、微电网等也可作为卖方出售电能<sup>[34-35]</sup>。

2)买方:买方即为DEM中具有电力需求的消费者,包括普通居民用户及工商业用户<sup>[36]</sup>。买方和卖方并没有严格的限定,如当产消者在满足自身需求还有多余发电能力时可以向其他用户卖电盈利,而当其具有电力需求时可直接向其他产消者购电。

3)中间商:DEM中除了买方和卖方,还有不同类型的中间商,其代理买卖双方的交易需求并收取一定费用。如售电公司、综合能源服务商、虚拟电厂、微电网等均可充当中间商的角色<sup>[29,37-38]</sup>。

在DEM中,电力需求者具有自主选择供电主体的权利,而供电者具有不需要第三方直接参与市场的权利。同样,供需双方也可选择中间商代理,间接地参与市场,实现交易匹配。

### 2.3 DEM交易方式

DEM可制定灵活多样的交易机制,不同用户根据自身发用电特征自主选择不同的交易机制以实现利润最大化或用电费用最小化。如图3所示,DEM中各市场主体参与交易的方式可分为以下3种。

1)对等的直接交易:在DEM中,供需双方不需要中间商,可直接进行双边协商交易<sup>[39-41]</sup>。双边协

议可保护市场参与者免受市场价格波动的影响,制定的双边协议包括交易电力的价格、数量、交付时间和合约期限。对于未能成功交易或未能履约的电力可通过与上层配电商签订保底供电协议解决。

2)通过中间商:供需方委托中间商负责其电力买卖交易<sup>[42-43]</sup>,但与传统电力市场不同的是,用户可自主决定是否通过中间商或通过哪家中间商来进行代理交易,如一些用户不愿费时地寻求合适的交易对象则委托中间商进行交易。中间商可通过双向拍卖机制以统一的内部出清价格进行匹配出清<sup>[44-45]</sup>,同时中间商也可与上层电网进行交易以寻求利润最大化。

3)两者的结合:用户根据自身的需求特点既可以自己寻求匹配交易,也可通过中间商进行代理交易。

#### 2.4 DEM 时间尺度

DEM的时间尺度可参考电力批发市场分别设置日前市场、日内市场和实时市场。而报价交易等环节的具体时间段设置需要与上层市场衔接。

在日前市场,各发用电用户根据对未来一天发电及需求的预测进行报价,DEM对未来一天各小时的电力交易进行预出清。由于DEM的电力平衡也依赖于上层大电网,因此DEM的日前出清过程应提前于批发市场的日前报价及出清时间,从而通过参与批发市场来消除DEM日前出清的不平衡电量。

类似于批发市场的日内市场,DEM的日内市场用于调整消除各市场参与者当日供需情况与日前市场报价的偏差。同时DEM也可制定一些激励机制来促进需求侧响应资源参与交易消除偏差,从而减小批发市场对DEM的日前出清未能真正履约造成的偏差惩罚。

DEM的电力平衡仍依靠上层电网,其实时市场可通过制定合理的市场机制尽量在市场内部进行平衡,从而减小批发市场的实时市场平衡压力。

#### 2.5 DEM 优化目标及出清方式

DEM的出清方法按照优化目标进行分类可分为社会福利最大化<sup>[46]</sup>和运行成本最小<sup>[47]</sup>2种。

出清算法主要有分解优化<sup>[48]</sup>、网络优化<sup>[49-50]</sup>、博弈论<sup>[51-52]</sup>、基于代理模拟<sup>[53-54]</sup>等分布式优化类方法,这些算法也可用于DEM的出清。由于DEM是一个存在多个买家与卖家的市场,因此双向拍卖机制非常适用于DEM。如文献<sup>[55]</sup>设计了一个连续的双向拍卖机制,允许市场参与者在交易周期内的任何时间提交报价,市场连续出清,不同的成交对有不

同的出清价格。西班牙的NOBEL工程参考证券交易模型设计了一个离散的市场交易机制,买卖双方根据订单簿排序进行高低匹配出清,同时订单簿表向市场参与者公开,允许其参考以修改报价<sup>[56]</sup>。此外,还有一些其他的出清机制,如文献<sup>[57]</sup>的随机匿名匹配方式。文献<sup>[58]</sup>为解决分布式发电可能无法成功匹配交易的问题,提出了一种去中心化的NRGcoin货币。

DEM的出清方式应根据具体的市场结构、市场规则、优化目标及政策法规等因素进行选择,也可结合多种出清方式的特点进行设计。而对于DEM内的交易结算应采取弱平衡的方式,由市场运营商收取一定比例的利润以维持市场的运营管理。

此外,对于DEM市场机制的研究除了需要考虑出清算法、市场成员的博弈行为等因素外,还需要特别关注电力用户对用电需求量的预测及电力产消者对发电量的预测准确性问题<sup>[59]</sup>。由于DEM中的市场成员多为小的电力用户和小规模的分布式可再生能源发电,负荷需求及发电能力均相对较小且变化较大,这给预测带来了很大的困难。因此,在市场机制的设计中应促使用户进行真实报价并提高自身的发用电预测能力和需求管理能力,同时需要设立与上层电网合理的交易及结算机制。

#### 2.6 建立 DEM 的必要性

针对传统电力市场难以整合数量庞大且地域分布零散的分布式发电问题,目前很多国家都计划在配电网层面建立灵活自治的区域市场模式<sup>[60]</sup>。建立DEM的必要性分析如下。

1)由于分布式可再生能源发电容量小、数量多、波动性大且分布分散,难以参与批发市场,通过DEM可以有效地促进可再生能源消纳。

2)通过DEM交易平台,分布式可再生能源与本地用户就近交易,实现了地方平衡,减小了输电通道建设及扩容成本,同时也减小了远距离电力传输的损耗。

3)改善电源结构与负荷分布不协调的情况。通过DEM,产消者的额外能源在本地优先与周边用户进行交易,充分利用分布式发电与负荷分布的互补性。

4)降低用户电价,增加产消者盈利,提升地方经济,进而反过来激励地方分布式电源的投资,促进可再生能源发展。

5)DEM的建立使分布式可再生能源可以通过自由的市场规则获利,从而无需依赖补贴,减轻国家对新能源的政策补贴负担。

### 3 区块链技术简介

2008年中本聪在文献[61]中首次提出了“比特币”这一概念,而随着比特币多年的成功运行,其底层的记账系统区块链技术逐渐受到越来越多的关注。区块链的核心优势是去中心化,可以实现基于去中心化信用的P2P交易、协调与协作,从而为中心化机构普遍存在的高成本、低效率和数据存储不安

全等问题提供解决方案。

在实际的研究及应用中,根据是否完全去中心化的特征,区块链可分为公有链与许可链2种不同的网络类型<sup>[62]</sup>。公有链是完全去中心化的治理模式。而联盟链和私有链是晚于公有区块链产生的,统称许可链,其网络中的每个节点都经过许可,它们仍具有中心化的信任机制。表2为公有链、联盟链和私有链的特点对比。

表2 公有链、联盟链和私有链特点对比  
Table 2 Comparison of public blockchain, consortium blockchain and private blockchain

类型	可信权威	中心化程度	共识参与	代币机制	每秒数据写入次数	交易成本
公有链	无(依赖代码)	完全去中心化	任何人(开源)	激励节点记账	3~20	高
许可链	联盟链	特定联盟	授权节点	不需要	1 000以上	低
	私有链	指定团体	权威节点	不需要	1 000以上	最低

伴随着能源革命和环保运动,能源行业正在向清洁化、分布式转型。自下而上的分布式电力交易体系将成为传统能源体系的有力补充,而在这一过程中,区块链有望成为实现能源交易信息高效通信的重要手段。

区块链的分布式账本特性将使一系列新的市场模式及交易机制成为可能。区块链技术在为市场交易提供安全保障的同时还可降低沟通成本,提高市场交易的互操作性,从而使小型能源供应商及用户能够快速轻松地进行网络交易及结算,增加能源行业的弱中心化程度,提高交易的效率及安全性并降低能源消费价格。

### 4 基于区块链技术的DEM交易平台

DEM引入了一种新的电力市场模式,并具有诸多优势。但DEM的实现需要建立一个市场交易平台,交易平台是DEM的核心。在这个平台上不同类型的市场成员发布和接受报价信息来进行电能的买卖交易,并实现交易的自动化。市场运营商依据交易平台上的信息以及由计量通信设备传递的数据开展相应的工作,同时平台负责市场主体的准入、记录报价、数据管理、出清结算等功能。

但由于市场中分布式主体数量众多,而容量一般较小且分布零散,造成了交易组织困难、实体交易平台构建成本高但盈利低的问题。而区块链作为一种具有去中心化、自治性、可溯源等特点的新兴信息通信技术,非常适合作为DEM交易平台构建的底层支撑技术。本章首先对区块链技术应用于DEM的可行性进行分析,然后对区块链网络类型的部署及具体的交易流程进行介绍。

#### 4.1 区块链技术应用于DEM的可行性分析

本节从区块链技术的特点与DEM的契合度角度出发,对区块链技术应用于DEM的可行性进行分析,具体如下。

1) DEM中的市场参与主体繁多,而各发电主体的容量及需求却相对较小,利润低微,且地域分布零散,难以建立一个中心化的管理机构。而区块链技术的弱中心化特性可提高不同用户间的互操作性,促使所有节点共同维护管理系统,非常适合DEM交易平台的建设。

2) 区块链技术有利于提高DEM的效率及开发透明性,市场中的各个节点均保存并查看同样的一份交易信息账本,从而使信息公开透明化,对于交易竞争的公平性有很大的保障作用。同时,交易信息的分布式存储也提高了数据信息的安全性。

3) DEM可利用区块链技术的自治性将交易机制及支付结算等功能通过编程形成智能合约,当达到触发条件时,智能合约自动执行,保证了交易的执行力与安全性,避免了交易的违约纠纷等问题。

4) 通过区块链技术的公钥、私钥这种非对称数字加密技术,可以保证市场参与者交易数据的安全性及隐私性<sup>[63]</sup>。

5) 区块链技术中的数据信息具有不可篡改性,如果攻击者想要伪造篡改某个交易信息,需要将此交易之前所有的数据修改以重新形成一个主链,这在理论上几乎不可能。因此,可以保障DEM中交易信息的安全。

6) 时间戳是区块链的核心技术之一,其使区块链具有“可溯源”性。因此,市场参与者可追踪查看历史交易信息为未来的交易行为提供参考,同时也为交易的监管带来了便利。

## 4.2 区块链网络的部署

公有链和许可链2种区块链网络类型代表了2种不同的治理模式,属于2个方向。但是目前对于区块链应用于电力行业的不同场景时该采用哪种治理模式并没有深入地进行分析研究并给出原因<sup>[64-66]</sup>。

本节结合DEM的特点,分析研究了其区块链类型的部署问题,具体如下。

1)市场主体的准入:DEM是为一定区域内的电力消费者及产消者提供交易平台的市场,市场需要有节点准入控制与安全标准支持特性。

2)电力商品的特殊性:不同于目前区块链应用较多的金融货币领域,电力是需要实际交割的商品。同时,电力交易与其他商品交易不同,具有很多物理约束,需要有调度机构进行安全校核及阻塞管理以保证电力系统可靠稳定运行。

3)交易速度及交易成本:DEM具有市场主体多、交易频繁的特点,这便对系统的交易处理速度提出了要求,许可链具有更快的交易处理速度<sup>[67]</sup>。

4)用户的隐私保护:此外,相比于公有链,许可链也更有利于保护用户交易数据的隐私。

虽然真正的颠覆式创新来自于公有链,实现了完全的去中心化,但是许可链的弱中心化特性仍会对传统行业的边际效应带来改善,如降低成本、提升效率、改善客户体验等。区块链的应用需要立足于DEM的实际情况,不能拘泥于完全去中心化的理想情景,完全由科技来替代制度和信任非常困难,很多区块链项目从去中心化宗旨出发,但后期为了实际落地或多或少引入了中心化成分<sup>[68]</sup>。

通过以上分析可知,许可链更适合DEM。同时,由于私有链相比联盟链在技术实现难度和交易成本上也更低,在现实场景中更容易落地实施,因此前期可选择部署私有链,当DEM发展成熟及相关政策法规逐渐完善后再向更加开放公平的联盟链过渡。

## 4.3 基于区块链技术的DEM交易流程

通过区块链技术可以实现一个分布式的弱中心化交易网络,各个用户可按照预定义的市场规则进行交易。图4为基于区块链技术的DEM交易示意图。DEM中各市场成员间具有能源流、信息流及价值流。当各节点间发生能量流动的同时,智能电表将发用电数据传输到区块链交易网络中的各个节点,信息流及交易能量的价值同样会在交易网络中传播。能量流、信息流、价值流三者高度融合,保障交易的安全可靠性及实时性。

在实际运行中各个市场主体均设有DEM交易

平台网络服务接口,交易平台通过这个接口进行信息发布,而用户通过这个接口可上传自己的报价信息。在区块链构建的交易网络下,各种不同类型的交易方式及出清机制通过编程形成智能合约。市场中各个普通节点将交易时段对应的购、售订单通过服务接口发送到网络中形成订单簿表,并根据自身需求选择相应的交易方式,然后订单簿表根据智能合约中不同交易方式对应的出清机制自动化地进行市场出清,出清结果进一步通过授权节点的确认及安全校核,最终完成交易匹配并通过服务接口向用户传递出清结果。在实际交割后由智能电表将测量到的能量流通过服务接口上传到交易平台,从而保障计量的准确性,然后进行交易结算。交易对应的价值会在匹配成功的交易用户间自动结算支付。交易记录由授权节点负责添加到一个新的区块中并打包上链,同时向相关节点公开查看权限。而对于DEM内未能成功匹配交易及实际交割中所产生的电量偏差需要由上层电网进行平衡,因此,需要设立偏差考核及保底供电机制,相应的交易合约及价格也应以智能合约的方式嵌入市场机制中。

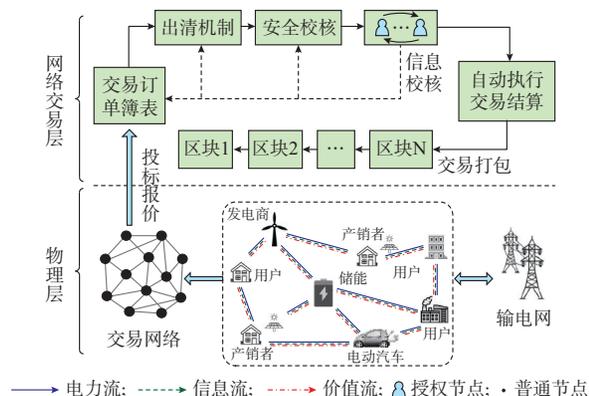


图4 基于区块链技术的DEM交易示意图  
Fig.4 Schematic diagram of DEM transaction based on blockchain technology

结算货币采用数字货币形式,可采用1:1的法定货币与数字货币兑换模式,并由交易平台负责,即各个市场主体通过交易平台存储一定量的法定货币然后转换成自己区块链账户中对应的数字货币并在实际交易中进行结算。而交易平台可对每笔交易按交易量收取一定的服务费用以维护平台运行。

虽然区块链技术可以保证链内交易与数据的可靠执行及记录。但如果区块链外信息在源头和写入环节不能保证真实准确,写入区块链内只意味着信息不可篡改,并没有提升信息的真实准确性。因此,授权节点需要制定市场准入机制,对各个普通节点进行资格审查和身份验证。授权节点清楚彼此身

份,共同维护许可链各主体间的共识,作恶会对其声誉产生影响,因此,将虚假信息写入区块链的成本比较高。但授权节点的这些保障机制主要基于现实世界约束,而非区块链本身特性。

在实际系统中,授权节点可由DEM的系统调度中心和电力交易中心组成,为了公正透明,也可通过投票机制选举市场内的电力用户代表市场参与者加入授权节点,或引入第三方机构。授权节点负责整个系统的市场机制制定、运营调度及维护追责等职能。

#### 4.4 区块链技术应用于DEM的挑战

虽然区块链技术对于DEM交易平台的构建具有很大的帮助,但仍需克服许多挑战:首先,必须解决技术问题,如可扩展性、互操作性、交易处理效率等;其次,必须调整相关市场的监管和法律框架,以充分利用区块链技术为DEM带来的潜在边际效益增益。

而对于目前广泛谈论的区块链技术带来的耗能问题,笔者持谨慎态度。虽然目前比特币区块链造成了大量的电力浪费,然而有统计表明,过去10年区块链电力消耗的成本远不及人力及部门机构建设成本的增长,因此从经济角度考虑将其应用于DEM平台构建是可行的。同时,比特币的耗能严重主要由于其采用公有链部署方式,大量节点共同参与共识过程造成无谓的电力耗费,而由前文分析可知,DEM应采取许可链的部署方式,共识过程只由授权节点参与,从而可极大地节省电力需求。

### 5 政策法规对DEM建设的保障

将市场模式引入局域电力系统,因地制宜地建立更加分散的、相对去管制的DEM对促进分布式发电消纳和整合需求侧响应资源具有重要意义。目前,中国电力市场改革已取得一些进展,如输配电价独立、售电行业的开放等,这为DEM的构建创造了有利条件。但DEM交易及运营方式与现有市场有很大不同,市场开放去管制化的同时也会对电力市场形态带来诸多挑战,必须依赖相关政策法规及监管制度的支持。

1)DEM的建立会对现有一些市场主体的核心业务造成影响,因此必须制定相关的政策法规,确保市场的“公平、公正、公开”,从而保障DEM的正常运营。

2)DEM中聚集了众多的电力产消者及不同类型的中间商,市场主体呈现逐步多元化的趋势。对于这些新兴市场主体参与不同市场的准入条件制定与协调必须结合其特点考虑其对市场产生的影响,

同时需要相关政策保障符合要求的市场主体无歧视地参与市场。

3)DEM中产生的交易电量偏差需要由上层电网平衡,因此需要设立合理的保底供电及偏差考核机制,从而在保障DEM中电力用户需求的同时减小对上层电网的依赖。

4)DEM是一种全新的市场模式,需要针对其设立独立的监管机制。对于输配电服务应基于成本定价并严格接受监管机构监督,而对于DEM的交易运营监管机构应关注标准与合同的执行,更少地介入市场运作。

5)区块链技术的弱中心化、智能合约自动执行等特性为电力行业提供了权利下放及提高交易效率的优势,但也会对传统市场监管、结算、追责等环节的责任主体确定带来困难。因此,需要更加明确的相关政策法规及市场细则以应对完全程序化交易带来的问题。

### 6 DEM建设要点

电力行业正逐步从集中电网向相对分层、分散化的电网结构转型,随之出现大量的电力产消者,用户不再是单纯的价格接受者,而会主动参与市场。DEM为分布式主体交易创造了有利的环境,但其作为一种全新的市场模式,除了需要相关政策法规的保障,在市场建设过程中还需重点关注解决以下问题。

1)由于分布式主体容量较小,参与市场带来的收益也相对较低,对于复杂的电力市场规则分布式用户一般不愿意花费大量的精力参与交易。因此,必须降低市场规则复杂度,简化市场交易流程,降低交易成本,从而促进分布式主体参与市场的积极性。

2)DEM在其市场规模较大时需要参与日前批发市场,其发电收益或用电成本由现货市场价格确定,但由于其在不同时段对外可能为发电或负荷2种状态,因此可分别进行报价,但如何设计合理的惩罚机制以分摊DEM的不确定性带来的调节成本是需要研究的问题。

3)DEM的部署使输配电网间的潮流由单向变为双向,对于DEM内的一些分布式主体可以向输配电网提供一些辅助服务支持。此时,输配电系统运营商之间的协调至关重要,需要协调输配电网运营商相应的角色及服务购买机制。

4)DEM的引入会产生一个新的市场运营商角色,负责交易平台的建设及市场交易的组织等。随着分布式主体的逐步增多,DEM网络交易平台需要处理大量的微小型交易,此时市场运营商有必要建

立标准的数据传输通信协议以提高交易处理效率。而对于未来DEM运营商这一角色是成立一个新的机构或是由配电网运营商负责,以及其与调度监管之间的角色关系,需要结合市场公平性、市场效率及交易成本等多方面综合考虑。

## 7 结语

近年来,中国的电力市场化改革正在积极推进,但相关研究主要集中于电力批发市场。随着可再生能源发电技术的成熟及安装运行成本的不断降低,分布式发电得到了快速的发展普及,然而中国现行的电力市场并不能很好地适应小规模分布式发电交易,需要建立与之相适应的市场模式。因此,本文立足于中国促进分布式可再生能源消纳及发展的实际需求,结合国外分布式电力交易市场模式研究,提出了DEM的概念,分别从市场定义、参与主体、交易方式、时间尺度、出清方式等方面进行了框架设计,并分析总结了建立DEM的必要性。然后,针对DEM交易平台难以建立的问题,研究了将区块链技术应用用于DEM构建的可行性及交易实现流程,并分析了区块链的网络类型部署及应用用于DEM时的挑战。最后,分别从政策法规和市场建设要点2个方面分析了建设DEM需要注意的问题。

DEM中各主体参与市场交易所追求的优化目标有所不同,交易产品也更具有差异性,同时用户随着用能隐私意识的提高也不愿将所有信息交由统一的机构集中调度管理,分散式交易与分布式优化是未来分布式发电交易的趋势,而区块链技术各节点协同治理的去中心化架构与分布式交易特点十分吻合。本文提出了区块链技术应用用于DEM交易的框架流程,针对具体市场进行区块链交易平台的设计实现是后续研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等.面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(3):663-674.  
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [2] ABAPOUR S, ZARE K, MOHAMMADI-IVATLOO B. Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1455-1463.
- [3] PARAG Y, SOVACOOOL B K. Electricity market design for the prosumer era[J]. Nature Energy, 2016, 1: 16032.
- [4] GREEN J, NEWMAN P. Citizen utilities: the emerging power paradigm[J]. Energy Policy, 2017, 105: 283-293.
- [5] 陈家庚,林哲敏,李永波,等.电力零售市场信息披露机制研究与探讨[J].电力系统自动化,2018,42(17):168-174.DOI: 10.7500/AEPS20170609001.
- [6] CHEN Jiageng, LIN Zhemin, LI Yongbo, et al. Information disclosure mechanism in electricity retail market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 168-174. DOI: 10.7500/AEPS20170609001.
- [7] 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. Design ideas of electricity market mechanism to improve the accommodation of clean energy in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 83-89.
- [8] 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.
- [9] RAHIMI F, IPAKCHI A, FLETCHER F. The changing electrical landscape: end-to-end power system operation under the transactive energy paradigm [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 52-62.
- [10] EID C, BOLLINGER L A, KOIRALA B, et al. Market integration of local energy systems: is local energy management compatible with European regulation for retail competition?[J]. Energy, 2016, 114: 913-922.
- [11] 国家能源局.关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. [2018-11-20]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm).  
National Energy Administration. Notice on piloting market-based trading of distributed generation[EB/OL]. [2018-11-20]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm).
- [12] 陈政.电力分布式交易:可持续的电力商业运营和监管模式[M].广州:华南理工大学出版社,2018.  
CHEN Zheng. Transactive energy: a sustainable business and regulatory model for electricity[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2018.
- [13] HORTA J, KOFMAN D, MENGA D. Novel paradigms for advanced distribution grid energy management [EB/OL]. [2018-11-20]. <https://arxiv.org/abs/1712.05841>.
- [14] TEOTIA F, BHAKAR R. Local energy markets: concept, design and operation [C]// National Power Systems Conference (NPSC), December 19-21, 2016, Bhubaneswar, India.
- [15] MENGELKAMP E, STAUDT P, GAERTTNER J A. Trading on local energy markets: a comparison of market designs and bidding strategies [C]// 14th International Conference on the European Energy Market (EEM), June 6-9, 2017, Dresden, Germany.
- [16] 李彬,曹望璋,张洁,等.基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J].电力系统自动化,2018,42(4):183-193.DOI: 10.7500/AEPS20170915012.  
LI Bin, CAO Wangzhang, ZHANG Jie, et al. Transaction system and key technologies of multi-energy system based on

- heterogeneous blockchain [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 183-193. DOI: 10.7500/AEPS20170915012.
- [16] 张宁,王毅,康重庆,等.能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J].*中国电机工程学报*,2016,36(15):4011-4023.  
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(15): 4011-4023.
- [17] 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.
- [18] NOOR S, YANG Wentao, GUO Miao, et al. Energy demand side management within micro-grid networks enhanced by blockchain[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1385-1398.
- [19] MENGELKAMP E, GAERTTNER J, ROCK K A, et al. Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn microgrid[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 870-880.
- [20] 张丹,王杰.国内微电网项目建设及发展趋势研究[J].*电网技术*,2016,40(2):451-458.  
ZHANG Dan, WANG Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 451-458.
- [21] Eneco Group . Next Kraftwerke—virtual power plant [EB/OL]. [2018-12-03]. <http://www.eneco.com/about-us/eneco-group/>.
- [22] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].*中国电机工程学报*,2014,34(29):5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [23] PINSON P, CHEVALLIER C, KARINIOTAKIS G N. Trading wind generation from short-term probabilistic forecasts of wind power [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(3): 1148-1156.
- [24] ABDMOULEH Z, ALAMMARI R A M, GASTLI A. Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 249-262.
- [25] SU W. The role of customers in the US electricity market: past, present and future [J]. *The Electricity Journal*, 2014, 27(7): 112-125.
- [26] EHSAN A, YANG Qiang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: a review of analytical techniques [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 44-59.
- [27] BERTSCH V, HALL M, WEINHARDT C A. Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: empirical insights for Germany [J]. *Energy*, 2016, 114: 465-477.
- [28] TUSHAR W, YUEN C, MOHSENIAN-RAD H, et al. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading the potential of game-theoretic approaches [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(4): 90-111.
- [29] KRISTOV L, MARTINI P D, TAFT J D. A tale of two visions: designing a decentralized transactive electric system [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2016, 14(3): 63-69.
- [30] CHEN T, SU W, CHEN Y, et al. An innovative localized retail electricity market based on energy broker and search theory [C]// North American power symposium (NAPS), September 17-19, 2017, Morgantown, USA: 1-5.
- [31] MIT CEEPR. Fair, equitable, and efficient tariffs in the presence of distributed energy resources [EB/OL]. [2018-08-12]. <http://ceepr.mit.edu/>.
- [32] RAHBARI-ASR N, OJHA U, ZHANG Z, et al. Incremental welfare consensus algorithm for cooperative distributed generation/demand response in smart grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(6): 2836-2845.
- [33] YAZDANI-DAMAVANDI M, NEYESTANI N, SHAFIE-KHAH M, et al. Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bi-level approach [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33: 397-411.
- [34] KANG Jiawen, YU Rong, HUANG Xumin, 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.
- [35] WANG H, HUANG J. Incentivizing energy trading for interconnected microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 2647-2657.
- [36] YAN X, LIN J, HU Z, et al. P2P trading strategies in an industrial park distribution network market under regulated electricity tariff [C]// IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI<sup>2</sup>), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-5.
- [37] CAI Ye, HUANG Tao, BOMPARD E, et al. Self-sustainable community of electricity prosumers in the emerging distribution system [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5): 2207-2216.
- [38] BURGER S, CHAVES-ÁVILA J P, BATLLE C, et al. A review of the value of aggregators in electricity systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 395-405.
- [39] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2026-2035.
- [40] LONG C, WU J, ZHANG C, et al. Feasibility of peer-to-peer energy trading in low voltage electrical distribution networks [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2227-2232.
- [41] PARK C, YONG T. Comparative review and discussion on P2P electricity trading [J]. *Energy Procedia*, 2017, 128: 3-9.
- [42] SIANO P, SARNO D. Assessing the benefits of residential demand response in a real time distribution energy market [J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 533-551.

- [43] JELENKOVIC L, BUDROVIC T. Simple day-ahead bidding algorithm for a system with microgrids and a distributor[C]// 8th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), May 25-29, 2015, Opatija, Croatia.
- [44] SIOSHANSI F P. Evolution of global electricity markets[M]. New York, USA: Academic Press, 2013.
- [45] PINTO T, VALE Z, PRACA I, et al. Decision support for energy contracts negotiation with game theory and adaptive learning[J]. Energies, 2015, 8(9): 9817-9842.
- [46] POURBABAK H, LUO Jingwei, CHEN Tao, et al. A novel consensus-based distributed algorithm for economic dispatch based on local estimation of power mismatch [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5930-5942.
- [47] MARZBAND M, JAVADI M, POURMOUSAVI S A. An advanced retail electricity market for active distribution systems and home microgrid interoperability based on game theory[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 157: 187-199.
- [48] XU Zhiwei, CALLAWAY D S, HU Zechun, et al. Hierarchical coordination of heterogeneous flexible loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4206-4216.
- [49] POURBABAK H, CHEN Tao, SU Wencong. Consensus-based distributed control for economic operation of distribution grid with multiple consumers and prosumers [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, USA.
- [50] KOSHAL J, NEDIC A, SHANBHAG U V. Distributed multiuser optimization: algorithms and error analysis [C]// 55th IEEE Conference on Decision and Control, December 12-14, 2016, Las Vegas, USA.
- [51] ZHANG Ni, YAN Yu, SU Wencong. A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers [J]. Applied Energy, 2015, 154: 471-479.
- [52] EL RAHI G, ETESAMI S R, SAAD W, et al. Managing price uncertainty in Prosumer-Centric energy trading: a prospect—theoretic Stackelberg game approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 702-713.
- [53] ZHOU Zhi, CHAN W K, CHOW J H. Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools[J]. Artificial Intelligence Review, 2007, 28(4): 305-342.
- [54] DEGHANPOUR K, NEHRIR M H, SHEPPARD J W. Agent-based modeling in electrical energy markets using dynamic Bayesian networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4744-4754.
- [55] VYTELINGUM P. Trading agents for the smart electricity grid [C]// 9th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), May 10-14, 2010, Toronto, Canada: 897-904.
- [56] ILIC D, DA SILVA P D, KARNOUSKOS S, et al. An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods [C]// 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, June 18-20, 2012, Campione d'Italia, Italy.
- [57] BLOUIN M R, SERRANO R. A decentralized market with common values uncertainty: non-steady states [J]. Review of Economic Studies, 2001, 68(2): 323-346.
- [58] MIHAYLOV M, JURADO S, AVELLANA N, et al. NRGcoin: virtual currency for trading of renewable energy in smart grids [C]// 11th International Conference on the European Energy Market (EEM), May 28-30, 2014, Krakow, Poland.
- [59] DA SILVA P G, ILIC D, KARNOUSKOS S. The impact of smart grid prosumer grouping on forecasting accuracy and its benefits for local electricity market trading [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 402-410.
- [60] Powerpeers. Energie van elkaar [EB/OL]. [2018-01-16]. <https://www.powerpeers.nl>.
- [61] NAKAMOTO S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [EB/OL]. [2018-09-20]. <http://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [62] 闫莺. 以太坊技术详解与实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
YAN Ying. Ethereum technical details and actual combat [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [63] ZHUMABEKULY AITZHAN N, SVETINOVIC D. Privacy in decentralized energy trading through multi-signatures. blockchain and anonymous messaging streams [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(5): 840-852.
- [64] LIU Chao, CHAI K K, ZHANG Xiaoshuai, et al. Adaptive blockchain-based electric vehicle participation scheme in smart grid platform[J]. IEEE Access, 2018, 6: 25657-25665.
- [65] LI Zhetao, KANG Jiawen, YU Rong, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial Internet of Things [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [66] THOMAS L, LONG C, BURNAP P, et al. Automation of the supplier role in the GB power system using blockchain-based smart contracts [C]// CIRED, June 12-15, 2017, Glasgow, UK: 2619-2623.
- [67] 袁勇, 倪晓春, 曾帅, 等. 区块链共识算法的发展现状与展望 [J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2011-2022.  
YUAN Yong, NI Xiaochun, ZENG Shuai, et al. Blockchain consensus algorithms: the state of the art and future trends [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2011-2022.
- [68] 中国人民银行. 区块链能做什么、不能做什么? [EB/OL]. [2018-11-06]. <http://www.pbc.gov.cn/yanjiuju/124427/133100/3487653/3658001/index.html>.  
The People's Bank of China. What can and can't blockchain do? [EB/OL]. [2018-11-06]. <http://www.pbc.gov.cn/yanjiuju/124427/133100/3487653/3658001/index.html>.

肖 谦(1974—),男,硕士,主任编辑,主要研究方向:能源经济、电力风险管理。

陈 政(1977—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:能源经济、电力系统规划。

朱宗耀(1992—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力市场、电力系统规划。E-mail: zzy\_xjtu@163.com

(编辑 蔡静雯)

## Discussion on Decentralized Electricity Market for Distributed Generation Transactions

XIAO Qian<sup>1</sup>, CHEN Zheng<sup>1</sup>, ZHU Zongyao<sup>2</sup>, WANG Xiuli<sup>2</sup>, KUANG Yi<sup>2</sup>, CHEN Xianlong<sup>2</sup>

(1. Energy Development Research Institute, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510080, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** With the maturity of renewable energy generation technology and the reduction of installation and operation costs, the distributed generation have been rapidly developed, and a large number of electricity prosumers have been generated. However, due to the characteristics of small capacity, high volatility and scattered distribution, the distributed generation is not suitable for participating in the existing electricity market. Combined with the research of foreign electricity retail market and the current distributed generation trading situation in China, this paper proposes a decentralized electricity market (DEM) mode at the level of distribution network. The framework design of DEM is carried out from the aspects of market definition, participants, trading methods, time scale and clearing methods. Aiming at the problem that the DEM trading platform is difficult to establish, this paper studies the feasibility and transaction realization process of blockchain technology applied in DEM. Finally, from the perspectives of policies, regulations and key points of market construction, the issues to be paid attention to in the construction of DEM are analyzed.

This work is supported by China Southern Power Grid Company Limited (No. ZBKJXM20170075).

**Key words:** distributed generation; electricity prosumer; retail market; decentralized electricity market (DEM); blockchain technology

