

DOI: 10.7667/PSPC171855

基于区块链的配电网电力交易方法

朱文广, 熊宁, 钟士元, 唐玮, 舒娇, 李玉婷

(国网江西省电力公司经济技术研究院, 江西 南昌 330043)

摘要: 为了实现高效、公平、透明的配电网电力交易, 提出了基于区块链的配电网电力交易方法。针对当前含新能源的配电网电力交易的难点, 结合区块链的技术特点, 提出了配电网电力交易的区块链结构。介绍了基于区块链的配电网电力交易的具体实现步骤和交易过程, 深入研究基于 XML 组织区块链主体内容, 并将国产安全算法 SM2 和 SM3 引入到区块链应用中。最后设计了基于区块链的配电网电力交易情景, 证明了基于区块链的配电网电力交易方法的有效性。

关键词: 区块链; 配电网; 新能源; 电力交易; 交易安全

Power trading method for distribution network based on block chain

ZHU Wenguang, XIONG Ning, ZHONG Shiyuan, TANG Wei, SHU Jiao, LI Yuting

(Economic Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330043, China)

Abstract: In order to achieve efficient, fair and transparent distribution of power distribution network, a distribution network power transaction method based on block chain is proposed. The technical characteristics of block chain are introduced. The block chain structure of power distribution in distribution network is put forward in view of the difficulties of current power distribution network containing new energy. This paper introduces the concrete steps and transaction process of power distribution network based on block chain and studies the main content of the block chain based on the XML organization. The domestic security algorithms, SM2 and SM3 are introduced into block chain applications. Finally, the situation of power transaction in distribution network based on block chain is designed. The results prove the effectiveness of the power transaction method based on block chain in distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807116).

Key words: block chain; distribution network; new energy; power transaction; transaction security

0 引言

随着新能源广泛生产与应用, 光伏、风电、生物质能等新能源以微电网形式高渗透率地接入配电网中, 配电网的能源结构发生了深刻变化。配电网可能向微电网的负荷提供电能, 也可能从微电网的新能源中接收电能, 配电网由原先的单向潮流变为双向潮流, 能源结构更加复杂。同时, 风能和光伏受地理、气候等客观因素影响, 发电具有随机性、间歇性和不稳定性特点, 配电网的能源分布具有更大的不确定性^[1]。

配电网能源供应侧接入大量分散的新能源, 从能源利用的角度, 希望新能源能最大程度发电, 避免当前困扰新能源发展的弃风、弃光等现象, 这有

赖于良好的新能源交易和管理机制, 以充分实现分布式能源的有效消纳^[2]。

当前已从政策层面陆续出台了鼓励新能源发电和消纳的政策, 但促进新能源发电和消纳的政策在具体落实上还存在诸多亟需解决的问题, 如何建立有效的新能源交易机制便成为了关键^[3]。

含新能源的配电网电力交易过程中, 在遵循电力市场“统一、开放、竞争、有序”基础上^[4], 应尊重各个电力市场主体的自主性和选择性, 避免电力市场主体之间、电力市场主体与电力调度交易机构之间因电力市场交易发生矛盾。

我国现有的电力交易主要通过集中式交易中心完成, 并通常由特定的机构主导整个交易, 这虽然有利于保障电力交易的安全性, 但集中式电力交易中心在市场机制、交易清算、阻塞管理等诸多领域还有待进一步发展成熟。另外, 集中式电力交易中

心, 当前主要开展年度、季度、月度等中长期电力交易, 几乎并不承担分时电力交易; 而新能源由于自身发电的不确定性, 更关注于短期电力交易, 这在当前集中式电力交易中心难以实现^[5]。

随着配电网电力市场的开放步伐加快, 更多的交易实体参与电力交易, 电力服务的利益分配机制、交易方式和定价机制更加复杂, 采用有效的配电网电力交易技术, 确保交易安全、降低信用成本和交易成本, 促进配电网新能源中的消纳, 具有重要意义。

区块链作为一种新兴的交易技术, 采用总账分散式的记账方式, 以链式结构记录各个交易参与方的互动信息, 并以区块方式妥善保存交易信息。整个交易信息采用现代密码学算法, 保障交易信息的完整性、不可篡改性和不可抵赖性^[6], 区块链有望解决配电网电力交易主体多、交易安全等难题。

1 区块链技术

区块链来源于比特币, 作为比特币的底层支撑技术, 于 2010 年左右开始兴起, 并逐步演化成为一种为各种复杂交易提供安全可靠交互的技术。

尽管当前比特币等货币形式存在合理性争议和法律风险, 但区块链作为一种解决交易公平性和安全性的有效手段, 受到了包括配电网新能源交易在内的电力市场关注^[7]。区块链借助密码学算法, 采用去中心化方式, 由所有的参与方共同维护一个开放、透明的区块链数据库, 有助于实现交易的公开性和公平性。

具体实现上, 区块链由多个包含交易信息的区块按序逐级连接成为数据链, 如图 1 所示。随着交

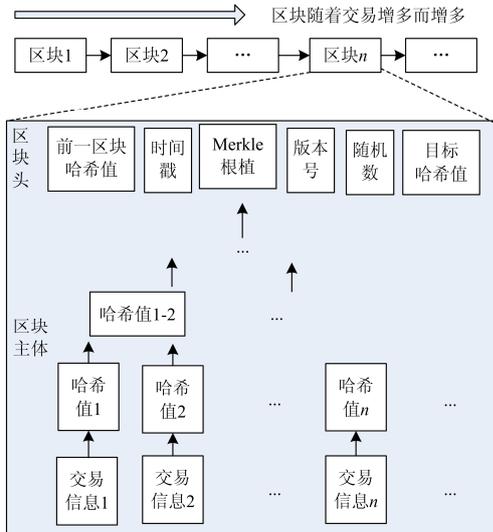


图 1 区块链结构

Fig. 1 Block chain structure

易信息的增加, 区块数量不断增加, 各个区块起着“承上启下”的功能, 既承接上一个区块的信息, 又将本次交易的内容添加到本区块, 而且以密码技术保障所添加内容的完整性。

每个区块由区块头和区块主体两部分组成: 1) 区块头包含整个区块链的简易信息, 主要包含前一区块哈希值、时间戳、Merkle 根植、版本号、随机数和目标哈希值等内容。2) 区块主体包含本区块详细的交易信息, 这些信息和前一区块的哈希值以及随机数通过哈希算法获得本区块的哈希散列值。

2 配电网电力交易的区块链应用

2.1 配电网信息结构

含分布式能源的配电网中, 新能源通常因地制宜地分散于整个配电网, 各种类型的新能源接入到配电网, 并与配电网原有的电源和负荷连接一起实现电能供需平衡。同时, 配电网各个组成单元通过通信网络实现信息交互, 从而获知其他单元的发电和用电情况, 也将自身的电能情况实时地告知配电网其他组成单元, 如图 2 所示。

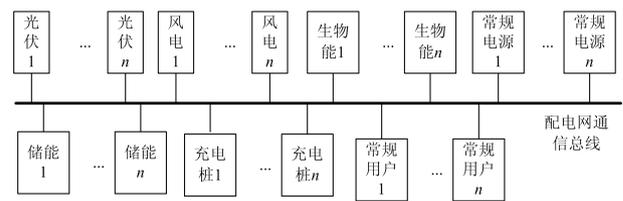


图 2 配电网信息总线系统

Fig. 2 Distribution network information bus system

由于配电网分布广泛, 现场情况复杂多样, 配电网的通信网络可以因地制宜, 采用当前电力通信领域普遍采用的通信方式: 1) RS485/422 等串行网络; 2) CAN、Profibus 等现场总线; 3) GPRS、2G/3G/4G 等无线网络; 4) 光纤以太网等高效能网络。配电网通信可以选择上述一种或是多种网络混合组成灵活的配电网通信网络。

依托配电网通信网络, 配电网将原先处于“信息孤岛状态”的电力发电容量和用电需求等分散信息汇集起来。配电网电力供求信息通过通信网络, 以区块链的形式知会配电网各个组成单元。发电方很容易便通过区块链这种公开渠道获知其他发电方以及用电需求量, 或以区块链方式公布自身的发电情况和寻求电量接收方。用电方也可以通过区块链方式公布自身的用电需求, 并获取发电方的发电容量和价格。

2.2 配电网电力交易区块链结构

参照通信协议 ISO 七层结构的特点, 区块链结

构也建立了数据层、网络层、共识层、激励层、合约层和应用层的分层结构。当区块链应用于不同场合时, 区块链的层次结构会根据具体应用场合的不同有所微调, 但区块链的应用结构基本稳定, 配电网电力交易的区块链结构图如 3 所示。

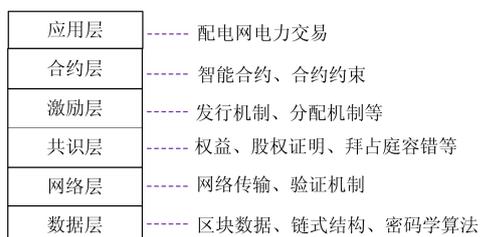


图 3 电力交易区块链结构

Fig. 3 Power trading block chain structure

1) 区块链结构的底层是数据层。数据层作为区块链的基础, 包含了区块数据、链式结构和密码学算法等具体数据内容。区块数据承载了配电网电力交易的详细信息, 并采用链式结构组成完整的配电网电力交易链, 通过非对称加密等密码学算法保障信息安全, 并采用数字签名方式实现电力交易信息的不可否认性。

2) 数据层的上一层是网络层, 网络层主要实现区块链数据的网络传输和验证功能。配电网的通信网络虽然较为复杂多样, 但普遍都能满足单点向多点发送的类多播传播方式, 而且不同网络通常采用网关转换等方式实现异构网络的互通互连。

配电网电力交易涉及发电和用电的多个参与方, 有交易需求的参与方, 经通信网络向其他参与方广播交易信息, 有交易信息意向的参与方接收到信息后, 也经网络层向其他参与方广播回应信息。

需要注意的是, 上述的配电网电力交易过程, 并不采用交易双方私下进行的方式, 而是采用交易信息可以在配电网通信网络上公开获得的方式, 这也是区块链技术的开放性和公开性特点。

3) 共识层表征了配电网电力交易的权益和股权证明等内容, 同时采用拜占庭容错等措施, 使得整个区块链能够容忍少于三分之一的参与方恶意作弊或被黑客攻击, 确保电力交易顺利完成。

4) 激励层主要用于鼓励参与方积极地参与区块链的发展, 在比特币等应用场合通常采用奖励比特币的方式给积极“挖矿”的参与方。而配电网电力交易参与方则具有天然的参与意向, 都希望能够达成自身利益最大化的电力交易。

5) 合约层包括智能合约和合约约束等内容。对于基于区块链的配电网电力交易, 由于区块链包含

的交易信息不可撤销和不可篡改, 交易信息可为违约的交易合同提供法律证据, 另外, 配电网电力交易内容由交易双方协商订立, 交易双方可补充违约责任以保障交易完成。

进一步, 配电网的所有参与方, 可以从区块链内容获悉整个配电网电力交易过程, 很容易便可认定电力交易违约方, 同时还可以从区块链的历史交易内容查找交易方的信用记录, 这将对违约起到很大的约束作用。

6) 应用层作为区块链的最高层, 提供针对各种应用场景的程序和接口, 直接体现了具体的应用场合。基于配电网的电力交易, 参与方只需通过应用层接口, 直接调用区块链对应的应用程序, 而无需关心区块链底层的技术细节。

3 具体实现

3.1 区块链实现步骤

配电网的各个发电和用电参与方, 构成电力交易的主体, 参与方首先准备好自己的身份信息、公钥和对应的私钥, 身份信息包括参与方的工商和营业账号、税号、对公银行账号和公司地址、电话等公司的公开信息, 公司的公开信息表征了公司的身份, 其真实性可以通过政府相关部门等权威渠道确认。同时采用加入审查制度和保证金机制, 由配电网电力交易联盟对新加入的成员进行身份认证, 防止假冒身份者进入配电网电力交易中。

参与方同时产生配对的公钥和私钥, 公钥跟随参与者身份发送给其他参与方, 其他参与方可以采用该公钥来确认信息的真实性及其来源真实性; 私钥只由密钥拥有者管理, 私钥表征了电力交易区块链的真实来源, 因为其他参与者不能推算出该密钥, 无法伪造其他参与方的电力交易区块链。

参与方加入配电网电力交易时, 如图 4 所示, 参与方首先将身份信息和公钥作为参与电力交易的初始化区块链, 发送到配电网通信总线供其他参与方使用。一方面, 参与方发送的身份信息和公钥以区块链的方式记录下来, 由于区块链的不可更改特性, 该信息将为后续的交易作“背书”功能; 另

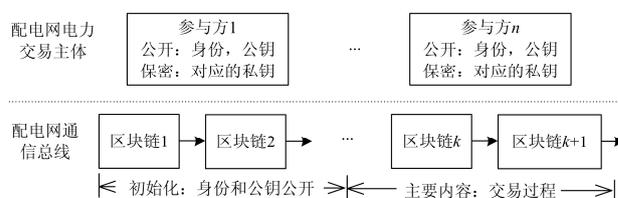


图 4 电力交易区块链实现步骤

Fig. 4 Power trading block chain implementation steps

一方面，其他参与方以安全、可靠的方式获得了新加入的参与方的公钥等信息，实质上完成了密码技术中的密钥分配难题。

其他参与方通过新加入参与方的初始化区块链，获得对应的身份和公钥，便能与包括新加入参与方在内的所有参与方进行配电网电力交易。而新加入的参与者，也可以查阅之前区块链的内容，从而找到其他参与方的身份信息和公钥，甚至可以查阅以前配电网电力交易的记录。也就是说，基于区块链的电力交易方式，具有向前追溯的功能。

3.2 交易过程

与比特币交易过程侧重于比特币挖掘和计算不同，配电网电力交易的区块链交易过程，侧重于利用区块链包含的内容具有不可篡改和不可否认的特性，以区块链的方式促成并完整地记录下电力交易过程，主要包括“提出电力交易需求、达成交易意向、完成交易合同并最终履行合同”等内容，如图5所示，核心步骤有：

1) 所有配电网电力交易参与方，时刻监听配电网通信网络的区块链信息。有电力交易需求的参与

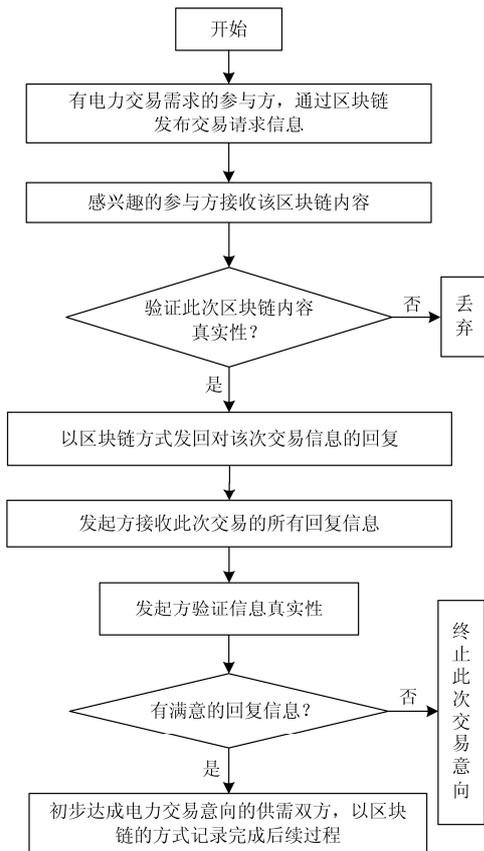


图5 基于区块链的电力交易过程

Fig. 5 Block chain based power trading process

方，用自己的私钥加密经哈希算法产生的电力交易需求信息摘要后，将加密的摘要跟随电力交易需求信息加入到区块链，并通过配电网通信网络，向全配电网的所有参与方广播包含该电力交易需求的区块链信息。

2) 每个参与方接收包含最新交易意向的区块链信息，根据发布电力交易需求信息的参与方公钥，解密发布方的哈希摘要，并与收到的电力交易需求信息的哈希计算值做比较。当两个信息摘要的数值一致时，则可判断该区块链信息没有被伪造或被篡改，该区块链内容是发布方发出的真实电力交易请求。

3) 参与方根据自身的发电或用电情况，判断是否接受该电力交易，如不接受则忽略该交易；否则接受该电力交易意向或在该电力交易意向基础上与发布方协商，提出新的电力交易意向，并用自身的私钥加密所发布有交易意向的区块链信息，区块链的实现过程与步骤1)和2)所述的发布方完成区块链内容一样。

4) 发起此次电力交易需求的发布方，接收有交易意向参与方的电力要价或谈判信息；并从所有的回复的交易意向信息中，筛选出最可能达成电力交易的参与方，达成电力交易协议或继续就该电力交易谈判。若对所有的电力交易返回信息不满意或是根本没有收到对该次交易的返回信息，则终止该次所发起的电力交易。

5) 初步达成电力交易意向的电力交易供需双方，以区块链的方式记录整个电力交易完成过程，包括：可以根据电力交易需要进行多次谈判协商；达成配电网电力交易意向、签订合同、缴纳保证金和电力交易过程中的完成步骤及其证明等。需要注意的是，在双方约定好的交易信息保密范围内，电力交易双方可以将己方完成交易的证明，尽可能地记录到区块链中，这样一旦出现交易纠纷，以往区块链所记录的内容，将为己方尽力履行电力交易提供证据。

3.3 区块链内容

区块链的主体内容包含了配电网电力交易信息，交易信息需以统一、高效的方法组织起来，各个参与方能方便地理解交易信息，而且不产生交易信息理解的歧义。

考虑基于区块链的电力交易信息，本质上是区块链内容以通信报文的形式在配电网通信网络上传送。因此，本文将可扩展的标识语言(eXtensible Markup Language, XML)应用于区块链主体内容的组织。

XML 属于标准通用标记语言的子集, 是一种用于标记电子文件使其具有结构性的标记语言, 通过此种标记, 计算机之间可以处理包含的各种信息比如文章等。它可以用来标记数据、定义数据类型, 是一种允许用户对自己的标记语言进行定义的源语言。XML 非常适合万维网传输, 它提供统一的方法来描述和交换独立于应用程序或供应商的结构化数据, 是 Internet 环境中跨平台的、依赖于内容的技术, 也是当今处理分布式结构信息的有效工具。早在 1998 年 W3C 就发布了 XML1.0 规范, 使用它来简化 Internet 的文档信息传输^[8]。

采用 XML 组织区块链的主体内容, 可以清楚地罗列交易信息的属性及其对应的内容。以文献[9]所列举的区块链交易记录为例, 该区块链主体内容的其中一条交易记录, 包含了发电单元、发电额度、能源类型、地理位置和电力价格等内容, 则用 XML 语言表述为:

```
<cim:Trade rdf:ID="20171212000001">
<cim:Naming.name>1</cim:Naming.name>
<cim:Trade.发电单元 ID>0001</cim:Trade.发电单元>
<cim:Trade.发电额度>50 MW</cim:Trade.发电额度>
<cim:Trade.能源类型>风电</cim:Trade.发电单元>
<cim:Trade.地理位置>新丰发电厂</cim:Trade.地理位置>
<cim:Trade.电力价格>1.2 元千瓦时</cim:Trade.电力价格>
</cim:Trade>
```

由于 XML 语言采用接近自然人理解和表述的方式组织, 各个参与方可以较容易就交易内容达成共识, 当交易信息理解存在分歧时, 可以通过多次协商的方式确认分歧。当然, 对于需要以较多文字组织的电力交易信息, 也可以采用纯文本形式组织区块链主体内容。

3.4 区块链安全

配电网电力交易中信息安全处于重要的位置。区块链采用数字签名方法, 保证该区块链信息的签发方不能否认自身的电力交易行为, 因为只有私钥的拥有者, 才能产生与私钥对应的公钥能验证通过的内容, 区块链的数字签名方法如图 6 所示。

区块链的发起方将所产生的区块链信息, 经哈希算法后生成哈希摘要, 发起方用自身的私钥对哈希摘要采用非对称加密算法, 得到数字签名, 该数字签名附加在区块链, 发送到配电网通信总线。

接收方接收数字签名后, 用发起方对应的公钥对该数字签名采用非对称解密算法, 得到验证用的数字摘要。同时, 接收方对所接收的区块链信息进行哈希算法, 得到哈希摘要, 并与解密得到的数字摘要进行一致性比较。若两者数值一致, 则可确定

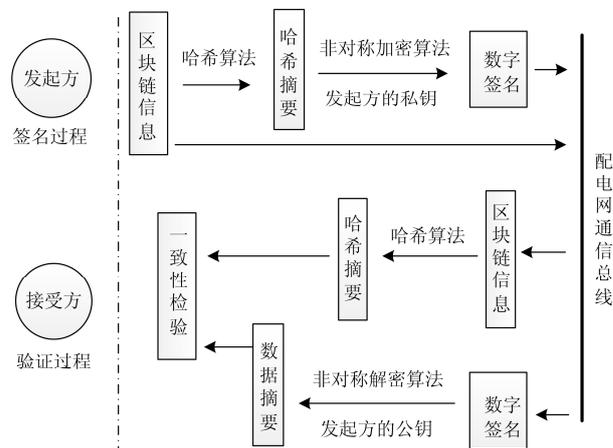


图 6 区块链的数字签名方法

Fig. 6 Digital signature method of block chain

该区块链发起者身份的真实性。

区块链的数字签名方法, 涉及到哈希算法和非对称加密算法这两种常见的密码学技术。哈希算法通过单向数学函数, 将任意长度的输入值压缩映射为固定长度的输出值, 经典的哈希算法主要有 MD5、SHA1 和 SHA256^[10]。相较于对称加密算法, 非对称加密算法较好解决密钥管理的难题^[11]。经典的非对称密钥算法主要有 RSA、Elgamal 和 ECC 等算法^[12]。

尽管上述的哈希算法和非对称算法得到了普遍的应用, 但这些算法是否存在后门隐患等问题还不甚清楚, 因此我国提出了自主研发的国家商用密码算法, 包括非对称加密算法 SM2 和哈希算法 SM3。由于配电网电力交易的安全性至关重要, 本文的区块链设计中采用国密算法 SM2 和 SM3^[13-14]。

以发起方为例, 讨论配电网电力交易区块链的算法实现, 如图 7 所示。首先, 对区块链主体的交易信息进行 SM3 哈希运算, 生成固定长度的哈希值, 进一步对该哈希值采用 SM2 非对称加密算法, 所生成加密结果作为 Merkle 根值。将 Merkle 根值和前一区块哈希值、版本号、时间戳、随机数等其他区块链报头内容进行 SM3 运算, 得到目标哈希值, 一同放置于区块链报头。

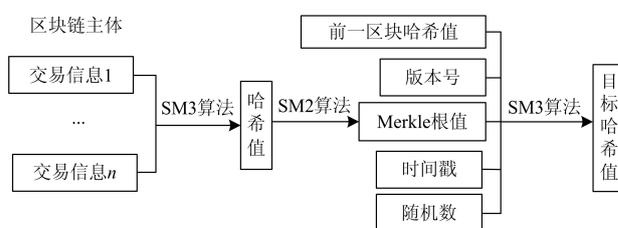


图 7 算法实现过程

Fig. 7 Algorithm implementation process

接收方的算法过程与发起方类似，也采用 SM3 作为哈希算法，并基于发起方的公钥采用 SM2 非对称解密算法，算法过程不再累述。

4 应用情景

在实验室环境中搭建配电网电力交易平台，如图 8 所示，包含 5 个发电参与者和 5 个用户参与者，发电情况模拟 1 个传统发电、2 个光伏发电和 3 个风力发电。结合现在配电网的实际供电情况，以传统发电模式为主，光伏和风力等新能源作为配电网供电补充^[15-17]。由于新能源具有供电波动性和不稳定性的特点，重点考虑配电网电力短期交易中使用权区块链技术，实现新能源能够实时接入到配电网中，避免新能源弃电。

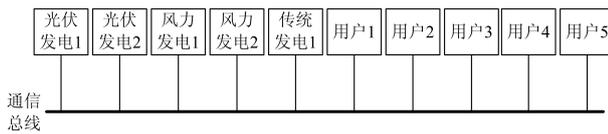


图 8 情景模拟平台

Fig. 8 Scene simulation platform

所有参与者接入以太网通信总线，实现基于区块链的电力交易信息交互，各个参与方具有平等参与的机会，无需依赖第三方交易平台。用户配备智能电表和家庭能量管理系统，具备了解自身电力需求的能力。光伏和风电等新能源配备一定数量的储能设备后接入配电网供电系统中，光伏和风电也配备能量管理系统，具有一定的发电预测能力。

4.1 交易过程

描述一种由发电方发起的电力交易情景，交易过程采用本文所设计的区块链方式传递交易信息。假设光伏发电 1 通过能量管理系统和电力供应计划安排，得到某个时段的电力供应量，并计划出售该电量^[18-19]。因此，光伏发电 1 将电量的供应时段、数量和预期价格等主要电力交易信息，以区块链方式组织后，发送给所有参与者，寻求购买方，交易过程如图 9 所示。

各个用户可以根据自身需求返回交易意向，包括用户拟购买电量的数量和价格等己方条件。光伏发电 1 从所返回的购买方中，挑选出最优的潜在购买方。由于电力交易通常涉及价格、数量、时间和违约责任等较多内容，通常需要就细节进行多轮谈判。因此，光伏发电 1 选择最符合条件的用户 1 最为初步交易对象，展开电力交易细节谈判。

交易细节经过多轮谈判达成一致后，则达成电力交易合同，可由光伏发电 1 签署合同和发给用户

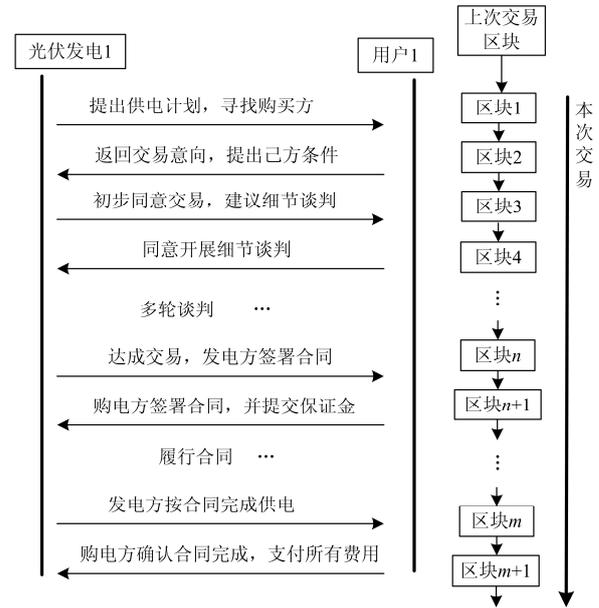


图 9 发电方发起的电力交易情景

Fig. 9 Power trading scenarios initiated by the power generation

1，用户 1 作为购电方也签署该合同，并提供保证金。双方履行合同，并尽量将履行合同的证明以区块链的方式记录下来。需要注意的是，由于配电网新能源发电具有局限性和波动性等特点，一旦光伏发电 1 履行合同困难，也可以通过区块链电力交易方式，请求其他发电支援并协商给予合适补偿。

当光伏发电 1 按合同完成供电任务后，便可发合同完成的请求给用户 1 确认，用户 1 确认合同完成，并支付所有费用，完成该次配电网电力交易过程。

上述的配电网电力交易过程，都以区块链的方式“记录”下来，区块链为交易双方提供了不可篡改和不可否认的技术手段，实现一种去中心化、平等、公开的交易过程。

当用户端有电力需求时，也可以通过区块链方式，主动提出电力需求并寻求供电方，交易过程和实现方法也类似。

4.2 效果与分析

以一天的配电网供用电为例，分析基于区块链的短时电力交易情况。假设传统能源保持稳定的发电 250 MW，如图 10 的虚线所示。新能源发电作为补充，受自然条件限制具有一定的波动性，以新能源最大发电为仿真目标^[20]。

0:00—6:00 时段，光伏和风力受时段影响，出力有限，新能源发电交易不活跃，较少有电力交易或按事先约定的交易价格进行交易。从 7:00 开始，用电需求开始增加，而此时新能源发电增长缓慢，相当于电力的卖方市场阶段，新能源发电可以通过

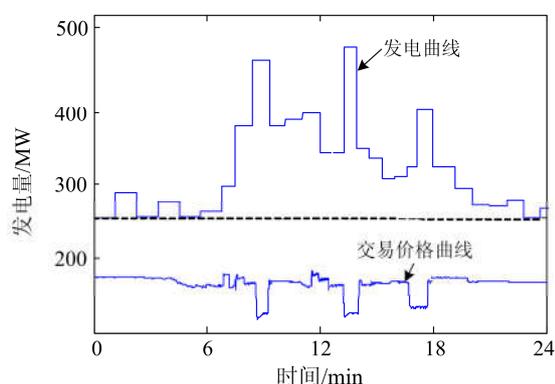


图 10 电量交易分析

Fig. 10 Analysis of electricity trading

区块链技术发布较高的价格并促成交易, 电力交易价格上涨。

仿真过程中, 新能源发电采用随机方式出力, 假设在 8:00 左右时段, 出现了新能源的较大出力, 能够产生较大的用电供给。此时, 基于区块链的电力交易实时提示用电供需情况, 新能源发电及时降低当前的实时用电价格, 以吸引用户多用电, 避免出现弃风弃光情况。之后, 随着新能源发电恢复到正常水平, 电力交易也几乎恢复正常价格, 只是随着新能源发电量的大小, 电力交易价格有较小幅度的波动。

仿真过程中, 13:00 左右和 17:00 左右两个阶段, 也出现了新能源发电随机增加的情况, 情况与 8:00 左右时段类型, 此时, 通过 4.1 节描述的区块链交易过程, 新能源通过降低价格, 促成电力交易。

由于基于区块链的电力交易可以在很短的时间内完成, 新能源发电和电力交易完成几乎能实现同步完成。

5 结语

区块链在电力交易中已显示了良好前景, 基于区块链的电力交易研究方兴未艾, 但较少涉及区块链的具体方案设计与实现。本文针对含新能源的配电网电力交易, 提出了基于区块链的配电网电力交易方法, 具体设计了区块链实现步骤和交易过程, 并采用 XML 组织区块链主体内容, 将国密算法 SM2 和 SM3 引入到区块链应用中, 保证了配电网电力交易的安全性。

参考文献

[1] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new

electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.

[2] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.

ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.

[3] MOHSENIAN-RAD A H, LEON-Garcia A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.

[4] 李晖, 马瑞, 罗阳. 基于 Stackelberg 博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 88-95.

LI Xuan, MA Rui, LUO Yang. Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 88-95.

[5] 张晓萱, 薛松, 杨素, 等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 1-8.

ZHANG Xiaoxuan, XUE Song, YANG Su, et al. International experience and lessons in power sales side market liberalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 1-8.

[6] 张小平, 李佳宁, 付灏. 配电能源互联网: 从虚拟电厂到虚拟电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3532-3539.

ZHANG Xiaoping, LI Jianing, FU Hao. Distribution power & energy Internet: from virtual power plants to virtual power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3532-3539.

[7] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.

ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.

[8] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.

HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.

[9] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on block chain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638.

[10] 王智东, 王钢, 许志恒, 等. 一种改进的 GOOSE 报文 HMAC 认证方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3627-3633.
WANG Zhidong, WANG Gang, XU Zhiheng, et al. An HMAC based authenticated method for GOOSE packets[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3627-3633.

[11] STAMP M. 信息安全原理与实践[M]. 2 版. 张戈, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013.

[12] 王智东, 王钢, 童晋方, 等. 智能变电站的密钥管理方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 121-127.
WANG Zhidong, WANG Gang, TONG Jinfang, et al. Key management method for intelligent substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 121-127.

[13] 戚宇林, 刘文颖, 杨以涵, 等. 电力信息的网络化传输是电力系统安全的重要保证[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 58-61.
QI Yulin, LIU Wenying, YANG Yihan, et al. Ensuring power security by networking transmission of electric power information[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 58-61.

[14] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-37.
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.

[15] 林顺富, 郝朝, 汤晓栋, 等. 基于数据挖掘的楼宇短期负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 83-89.
LIN Shunfu, HAO Chao, TANG Xiaodong, et al. Study of short-term load forecasting method based on data mining for buildings[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 83-89.

[16] 黄海涛, 吴洁晶, 顾丹珍, 等. 计及负荷率分档的峰谷分时电价定价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 122-129.
HUANG Haitao, WU Jiejing, GU Danzhen, et al. Pricing model of time-of-use electricity tariff considering customers classified by load factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 122-129.

[17] MORGAN S, KRARTI M. Impact of electricity rate structures on energy cost savings of pre-cooling controls for office buildings[J]. Building and Environment, 2007, 42(8): 2810-2818.

[18] BORENSTEIN S. The long-run efficiency of real-time electricity pricing[J]. The Energy Journal, 2005: 93-116.

[19] 张延宇, 曾鹏, 减传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 18-26.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. A scheduling algorithm for home energy management system in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 18-26.

[20] 刘丽燕, 邹小燕. GARCH 族模型在电力市场电价预测中的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 57-63.
LIU Liyan, ZOU Xiaoyan. Comparison of GARCH models in electricity price forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 57-63.

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-03-28

作者简介:

朱文广(1972—), 男, 高工, 硕士, 主要研究方向为电网规划;

熊宁(1975—), 男, 高工, 博士, 主要研究方向为电网规划;

钟士元(1978—), 男, 高工, 硕士, 主要研究方向为电网规划。

(编辑 张爱琴)