

# 基于多链式能源区块链的P2P微网电能交易研究

周强<sup>1</sup>, 张良<sup>2</sup>

(1. 绵阳职业技术学院 信息工程系, 四川 绵阳 621000;  
2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 随着社会发展对新能源电力需求的日益增加, 发展与之相适应多主体、分时段的电能交易模式可促进电力能源结构的优化。在分析能源区块链结构和运行机理的基础上, 针对微网P2P电能交易特征设计了一种多链式能源区块链工作模式, 可保证整个过程完整、可监督和真实, 进而针对该工作模式提出了动态分区算法优化电能交易过程。设置四组算例仿真实验, 由实验结果可知, 通过设置初始分区数、依据电能交易频率调整分区能够优化微网P2P电能交易过程, 并给出区块大小和节点数目对单个区块链传播时间的影响。

**关键词:** 微网; 端到端; 电能交易; 区块链; 动态分区

**中图分类号:** TM727 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21263

## Research on P2P Microgrid Electricity Trading Based on Multi-chain Energy Blockchain

ZHOU Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering, Mianyang Polytechnic, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2. Information Engineering School, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China)

**Abstract:** With the development of social economy, the demand for new energy power is increasing day by day. The development of multi-agent and time-segment power trading mode can promote the structure optimization of power energy. Based on the analysis of energy block chain structure and operation mechanism, a multi-chain energy block chain operation mode was designed for the characteristics of peer to peer (P2P) power transaction in micro grid, which could ensure the integrity, supervision and authenticity of the whole process. Then a dynamic partition algorithm was proposed to optimize the electric energy trading process. Four sets of simulation experiments were set up. The experimental results show that the initial partition number can be set and the partition can be adjusted according to the power trading frequency to optimize the P2P power trading process of microgrid. And the influence of block sizes and node numbers on the propagation time of a single block chain is also given.

**Key words:** microgrid; peer to peer (P2P); energy trading; blockchain; dynamic partitioning

伴随经济飞速发展, 各类电气化应用在各行各业不断丰富和普及, 用电的需求量随之加剧。微电网<sup>[1]</sup>能够有效解决单纯拓张电网规模的方式所带来的运维难度高、成本开销大的难题, 并将环保、高效、可靠和灵活的分布化可再生能源融入大电网。此外, 微电网作为集分布化的负荷与发电为一体的小型发配电体系, 能够有效地规避集中供电运维开销大、受到黑客攻击或出现故障

时所带来的大面积系统瘫痪、信息透明度和能源利用率低的问题。

传统的电力交易模式采用集中化<sup>[2]</sup>的方式, 即设定单一的机构完成交易的过程, 这种电力交易模式往往存在交易压力大、管理机制缺乏监督等问题。此外, 新能源供电不同于传统长期发电交易固定的特点, 存在发电的不确定性和分时交易的特点。而随着微电网的大力发展, 国家鼓励

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61601382)

**作者简介:** 周强 (1982—), 男, 工程硕士, 讲师, Email: Qiangzhou1982@163.com

端到端(peer to peer, P2P)的微网用户内部交易模式,即采用电力交易的主体和电力交易机制多元化交易模式能够最大程度地削减电能的损失,从而实现降低成本的目的,并减弱对大电网存在的依赖性。区块链<sup>[3]</sup>具有去中心化、开放性、透明性和对等性的特点,该技术存在特殊的链式存储结构,并具备智能合约等应用,可保障电力交易各主体的信任度,并最大程度地减少重建或维持信任的成本。在电力交易过程中选用密码学原理,可保证交易数据的完整度、难篡改性和契约度。国内外学者对区块链技术融入电能交易展开了探索, Aitzhan<sup>[4]</sup>提出采用区块链技术解决分布式电力交易的安全性问题,并完成了模拟评估; Munsing<sup>[5]</sup>则结合智能合约策略设计了P2P微电网能源交易架构;国内学者王辉<sup>[6]</sup>在配电网电能交易中引入了去中心化思想,构建了去中心化交易方式;王健<sup>[7]</sup>则具体研究了区块链科技在电能交易进程中的数据流程。

本文针对微网P2P电能的交易特征提出了一种多链式能源区块链工作模式,并基于该工作模式设计了一种多链式能源区块链结构下的动态分区算法,对优化微网P2P电能交易具有重要的意义。

## 1 能源区块链结构和运行机理

### 1.1 区块链的基本结构

区块链的基本层如图1所示,包含了数据、网络、共识、激励与应用五层。其中,数据层位于区块链的最底端,并采用Merkel树的架构保存了全部数据,在区块构建的进程中加入了数字加密与时间戳策略。网络层包含了各连通节点与交互的P2P网络。共识层则实现达成节点的共识。应用层给该技术的各类实际运用场景提供操作系统,尤其是在智能合约拓展功能后,为编码运用提供了设计体系。



图1 区块链的基本层

Fig.1 The basic layer of the blockchain

### 1.2 区块链的运行机理

微电网系统的各个节点均保存在一个完整的区块链中,其数据架构存在高分散与冗余度,当系统被少量节点所攻击时,系统可以保持稳定。区块链中的各个区块均记载了某时间中所有节点的交易数据,这些数据都通过Hash计算<sup>[8]</sup>并采用Merkle树的形式构成新的区块,并在数据的区头加入时间戳,依据先后顺序连接,使得数据能够溯源,从而提升信息伪造难度水平,保证数据可信程度。并将不对称加密策略融入区块链中,使得数据无法篡改,用户隐私得以保障。区块链架构与连接模式如图2、图3所示。

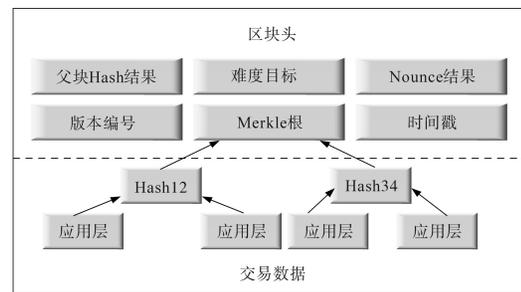


图2 区块链的架构

Fig.2 The architecture of blockchain

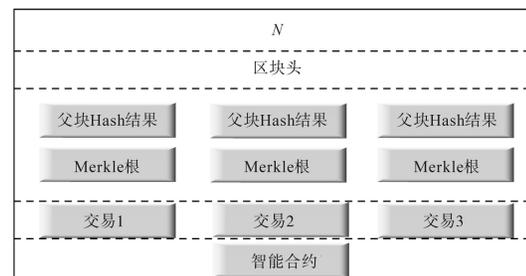


图3 区块链的连接模式

Fig.3 The connection mode of blockchain

### 1.3 能源区块链机制

发用电量权益机制(proof of power generation consumption, PPGC)是一种与能源区块链相适应的机制。在实际的电力系统中所流通的电能,被利用后即会写入到能源区块链之中,并且无法篡改,并作为使用者的权益证明。

本文将电力系统中所流通的电能视为隐形代币,并假设电网的各方均占用了大部分隐形代币。

PPGC机制应满足三点假设:1)维持微电网稳定运行的要求,与实际流通电能成正比;2)分布式电能应在局部电力交易中被消费;3)局部电力交易中的各节点应实现弱同步。

## 2 多链式能源区块链结构下的动态分区算法

相同的供电网络中,若分区数目增多,所包含的能源区块链<sup>[9]</sup>数目也相应增加。而区块链仅需要在小范围内完成传播,单个区块所包含的交易数目并不能满足需求,随着交易数量的增加,需要设置更多区块才能够完成交易,而这又将消耗更多的时间,从而减慢交易速度。采用多链式能源区块链结构下的动态分区算法可保证每秒所完成的交易数目,从而实现去中心化。

### 2.1 约束条件

#### 2.1.1 能源区块链的去中心化约束

为减弱去中心化带来的风险,本文引入基尼参数 $K$ 完成PPGC机制下的能源区块链去中心化状态分析。基尼参数 $K$ 能够估测各个节点占据该机制比值的均衡水平,如下式所示:

$$K = \frac{1}{2m^2\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |u_i - u_j| \quad (1)$$

式中: $m$ 为能源区块链中的待选记账员总数目; $\eta$ 为待选记账员PPGC机制的均值; $u_i, u_j$ 分别为能源区块链中的待选记账员所拥有的PPGC机制的总权益和权益。

#### 2.1.2 能源区块链的可延展约束

能源区块链在端到端网络中的传播进程为具备记账权限的节点对其他能源区块广播生成新的区块,各个节点不断校验内容并完成转发,如图4所示。

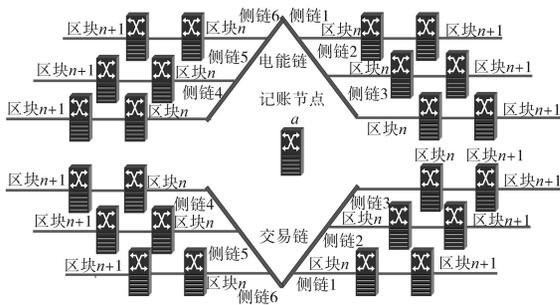


图4 多链式能源区块链P2P传播模型

Fig.4 Propagation model of multi-chain energy blockchain P2P

记账节点 $a$ 朝周边节点传送区块所需要的时间 $t_{a1}$ 如下式所示:

$$t_{a1} = \frac{nV}{D} \quad (2)$$

式中: $n$ 为发送节点所构建P2P网络的周边节点数目; $V$ 为区块容量; $D$ 为带宽。

利用节点校验后,让区块第二次转发,则校验所花费的时长如下所示:

$$t_{a2} = gV \quad (3)$$

式中: $g$ 为校验所花费的比例参数。

因此,记账节点 $a$ 朝周边节点传送单独区块所花费的时间 $t_a$ 如下所示:

$$t_a = \frac{nV}{D} + gV \quad (4)$$

$t(n+1)$ 表示记账节点 $a$ 向周边 $n+1$ 节点传送单独区块所花费的时间,记账节点 $a$ 朝P2P网络中 $n+1$ 区块传播所需要的总时长 $t_{sum}$ 如下所示:

$$t_{sum} = t_a + \max \{t(n+1)\} \quad (5)$$

网络拓扑关联往往对区块传播时长的影响很大,所以应利用仿真测算传播时间与节点数目关联完成近似解析,从而估测单个区块传播网络所需要的时长。通常而言,衡量区块链的延展性采用单位时间完成交易数 $O_s$ 进行评估,如下式:

$$O_s = \frac{P}{t} \quad (6)$$

而侧链交易应满足多个区块。

假设实现侧链交易的区块数目为 $e$ ,则可利用计算 $e$ 个区块内所实现的交易数目 $P$ ,并结合所求得时间 $t$ 获得 $O_s$ 来衡量区块的可拓展性。

$$P = \frac{R \sum_{u \in \Omega_e} (1 - B_u) + R \sum_{u \in \Omega_e} (B_u \frac{e_{min} - u}{e_{min}})}{r_a} \quad (7)$$

式中: $\Omega_e$ 为某侧链区块链中的记账候选者的组合; $r_a$ 为单次交易的字节大小; $R$ 为某个区块的字节大小; $B_u$ 为侧链交易占据总交易的比值; $e_{min}$ 为进行侧链交易的最小区块数目。

### 2.2 多链式能源区块链结构下的动态分区算法

本文提出的多链式能源区块链结构下的动态分区算法应满足去中心化标准<sup>[10]</sup>即基尼参数小于给定值的条件,此外也应满足可延展性指标。该算法依据区块链节点的电网电气关联、电能交易频率和各个区块链节点的PPGC机制,实现分区优化。即将供电网络的终端使用者视为叶子节点,进而针对叶子节点完成划分。本文算法可完成空间内组合的遍历,找到不同电能交易频率的节点分配区域区块链的最优解。

多链式能源区块链结构下的动态分区算法的目标解析式为最大化单位时间完成交易总数 $O'_s$ :

$$O'_s = \max \left( \sum_{x \in \Omega_e} O_{sx} \right) \quad (8)$$

式中: $\Omega_e$ 为某配电网中的区块链的组合; $O_{sx}$ 为第 $x$ 个侧链上的交易均值。

算法还应当满足基尼参数约束条件:

$$K_i < K_{max} \quad \forall i \in \Omega_e \quad (9)$$

式中: $K_i$ 为某侧链区块链的基尼参数; $K_{max}$ 为基尼参数的上限结果。

多链式能源区块链结构下的动态分区算法的整体思路即设定两个矩阵分别保存电力交易的相关数据和区块链节点间的连接模式,并采用多链式能源区块链结构下的动态分区算法将不同电能交易频率的节点分配到不同的区域区块链内,在满足去中心化约束和可延展性约束的基础上,可实现最大化单位时间完成交易总数 $O'_t$ 。

根据电能交易频率对能源区块链进行分区调整的方式如下,设定分区数为 $e$ ,采用阵列 $V$ 表示叶子节点间的电气连接模式,节点之间在周期 $T$ 的电能交易量表示为 $V_p$ ,周期 $T$ 内的各叶子节点的电能交易总量为 $P$ 。

本文算法的具体步骤如下:

- 1)首先输入叶子节点间的电气连接模式阵列 $V$ ;
- 2)采用随机函数初始化分区数 $e$ 和阵列 $V_p, P$ ;
- 3)采用多链式能源区块链结构下的动态分区算法完成配电网的各个叶子节点的分区优化,即采用多链式能源区块链结构下的动态分区算法将不同电能交易频率的节点分配到不同的区域区块链内,判断是否满足去中心化约束和可延展性约束,若满足约束条件则可获得最佳分区模式;
- 4)如果时间到达下个周期 $T$ ,则重复2)与3)。

### 3 多链式能源区块链结构下的动态分区微网P2P电能交易实现

#### 3.1 整体架构

多链式能源区块链结构下的动态分区微网P2P电能交易模型如图5所示。分布式的发电模式与微网P2P电能交易都具有完全化分布和无等级的特征,任意节点的加入与脱离具有独立性,而且具有随机分布特征。多链式架构分成物理层,网络层,协议层与虚拟层几个部分。其中,物理层作为能源节点的连接,去中心化网络的生成是区块链网络层作为能源节点的映射,协议层则包含了智能合约<sup>[11]</sup>、共识机制<sup>[12]</sup>与激励机制<sup>[13]</sup>等,实际的电力运用、电力交易、市场机制则处于应用层。

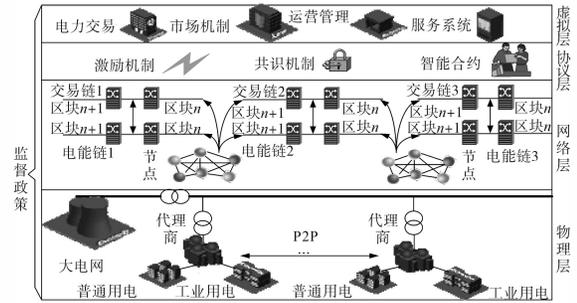


图5 电能交易模型

Fig.5 Electric energy trading model

#### 3.2 多链式能源区块链工作模式

采用多侧链的工作模式,不仅能分别管理设备数据、发电数据与电能交易数据,而且能最大程度地提升安全性,避免大量各类数据混杂而出现的数据泄露问题。

##### 3.2.1 交易链工作模式

交易链作为微网电力交易的共有链,保存并记载了全部交易数据和智能合约,并且完成不同时间节点的交易合约确认,图6为交易侧链的结构图。由于参与微网电能交易的主体多,如发电方、用电方和代理商等,需应用股份授权证明机制,并让区块链网络中的全部成员推选记账者,令其监管权力。记账者校验电能数据,完成向交易链的打包上传,智能合约再依据电能信息测算交易信息,再由记账者打包上传,各个记账者间互相认知,保障数据准确性并传播。

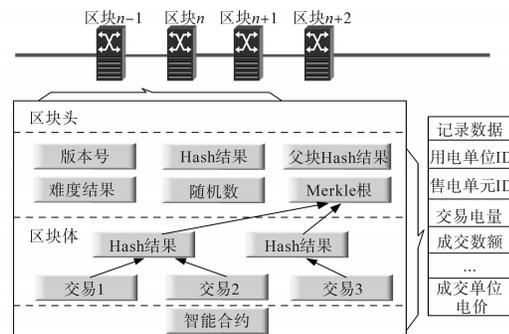


图6 交易链的结构

Fig.6 Structure of the transaction chain

##### 3.2.2 电能链工作模式

电能链作为自建的私有区块链,只服务区域内同一电压级下的用户,保存节点与能源数据,并完成交易,从而保证节点数据的真实度、完整度与隐私度。通过获取交易侧链的交易状况,检验是否满足PPGC机制,采用多链式能源区块链动态分区算法调整节点的分区。交易与电能多侧链的多向互动可实现多区域的微网电能交易,

并保证整个过程完整、可监督和真实。图7为电能链的结构图。

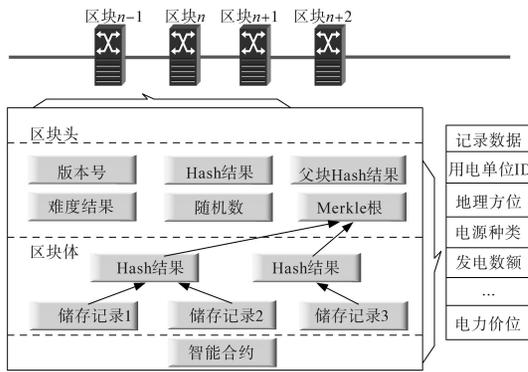


图7 电能链的结构

Fig.7 Structure of the power chain

### 3.3 多链式能源区块链结构下的动态分区微网P2P电能交易架构

多链式能源区块链结构下的动态分区微网P2P电能交易架构如图8所示,交易链包括资产数据侧链与交易数据侧链,电能链则设计了和微电网交易侧链、和用户端到端交易侧链两种。其中,资产数据侧链主要写入分布式发电装备数据、负荷需求数据和配电网数据;交易数据侧链则依据不同的交易模式写入交易完成状况。电能链的微电网交易侧链、和用户端到端交易侧链则均需要满足PPGC机制与去中心化约束、可延展约束条件,此外,还应与功率和供需平衡相适应。

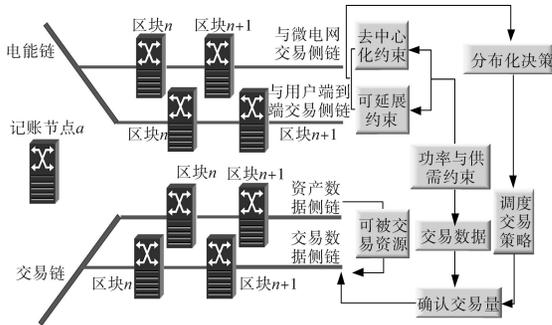


图8 电能交易架构

Fig.8 Power trading framework

多链式能源区块链结构下的动态分区微网P2P电能交易的流程如下:

1)微电网中的各主体把资本数据利用客户端传送到区块链体系中,并在全网范围广播发电装备的容量<sup>[14]</sup>、发电时段等数据。将归总后的可交易电能、交易时间段、标价数据和奖罚机制采用交易数据侧链完成全网广播;

2)通过功率与供需平衡约束校验各节点的交易数据,判断交易模式,并检验可否满足中心

化约束和可延展约束条件;

3)依据电压级别和线路的功率与供需平衡约束,采用多链式能源区块链结构下的动态分区算法调整微电网中的区块数和节点数目,指定交易决策,从而判定可交易电量与时段,并将数据回传交易链。最终依据发用电的实际状况,完成电能的交易结算。

## 4 算例仿真

本文在配置为Intel 酷睿 i7 2.6 GHz CPU,8 GB 运行内存的计算机上,采用 Matlab 2017a 调用 python 程序,ns3 网络模拟器适配 python 代码模拟多链式能源区块链动态分区下的微网P2P电能交易过程,分析多链式能源区块链结构下的动态分区算法对微网P2P电能交易过程的影响。通过随机产生节点的拓扑网络,模拟记账员和叶子节点向区块传播的进程,获得区块在微网中的传播时间。电能交易数据采用随机函数生成,并约定叶子节点<sup>[15]</sup>间的电力交易数目随关联度减弱而减弱。

### 4.1 初始分区数对微网P2P电能交易的影响

模拟节点数目为1 200的微电网端到端电能交易,采用随机函数初始化叶子节点之间在周期 $T$ 的电能交易数量,并统计在周期 $T$ 内的各叶子节点的电能交易总量。设置不同的分区,并根据多链式能源区块链结构下的动态分区算法分别完成单位时间完成交易总数 $O'_s$ 的计算,结果如图9所示,正方块为不同分区获得的 $O'_s$ 结果,并拟合曲线分析 $O'_s$ 的走向。

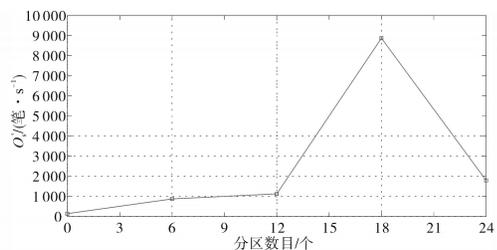


图9 初始分区数对微网P2P电能交易的影响

Fig.9 The impact of the initial number of partitions on P2P energy trading on the microgrid

从实验结果可知,当分区数为18时,模拟节点数目为1 200的微电网端到端电能交易获得最优的 $O'_s$ ,单位时间完成交易总数 $O'_s$ 在分区数目为12以内时,伴随分区数目的增长缓慢增长;当分区数目在12~18之间, $O'_s$ 快速增长;当分区数目大于18时, $O'_s$ 快速下降。

## 4.2 电能交易频率对微网P2P电能交易的影响

针对4.1节中给出的总节点数为1200的微电网中,依据电能交易频率采用本文算法对区块链进行分区调整,即采用多链式能源区块链结构下的动态分区算法将不同电能交易频率的节点分配到不同的区域区块链内。并完成单位时间实现交易总数 $O_s'$ 的仿真计算,可优化能源区块链的可延展性能。对比分区调整之前和之后的 $O_s'$ ,并拟合曲线分析 $O_s'$ 的走向,图10为电能交易频率对微网P2P电能交易影响的实验结果图。由图10给出的实验结果可知分区数目在12以下的效果不太显著,这是因为分区数目小于12的跨侧链交易情况比较少,交易多在单个侧链内完成。

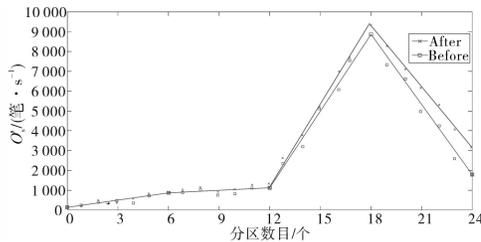


图10 电能交易频率对微网P2P电能交易的影响

Fig.10 Impact of frequency of energy trading on microgrid P2P energy trading

依据电能交易频率对能源区块链进行分区调整,优化了微网P2P单位时间完成交易总数 $O_s'$ 、各分区的 $O_s$ 和基尼系数 $K$ ,如表1所示。

表1 最优分区数目下的微网P2P电能交易参数

Tab.1 P2P energy trading parameters of microgrid under the optimal number of partitions

分区编码	节点数目	$O_s$	$K$
1	58	421.2	0.083 5
2	63	513.9	0.091 8
3	67	549.3	0.094 5
4	61	487.8	0.090 1
5	55	393.6	0.082 1
6	73	598.6	0.111 9
7	69	581.5	0.096 1
8	52	378.2	0.082 5
9	78	623.2	0.120 5
10	83	653.1	0.123 8
11	68	564.2	0.095 3
12	77	612.9	0.119 8
13	51	363.8	0.079 6
14	66	538.3	0.090 3
15	81	641.5	0.121 8
16	65	529.2	0.089 2
17	74	609.1	0.116 5
18	59	442.3	0.084 6

## 4.3 区块大小与节点数目对单个区块链的影响

### 4.3.1 区块大小对单个区块链的影响

本文将节点数目设定为120个,进一步研究了区块大小不同的情况下,当单个区块链完成20%,50%和80%的节点的区块传播时,所需要的传播时间,图11为区块大小对单个区块链影响的实验结果图。由图11的实验结果可知,随着区块大小的增大,相同数目的节点所需要的传播时间增加。

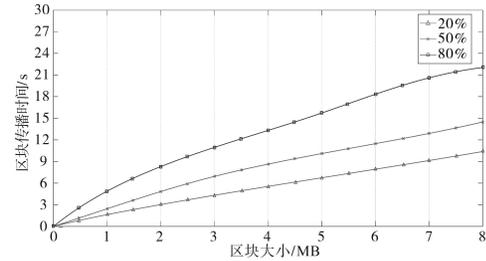


图11 区块大小对单个区块链的影响

Fig.11 Impact of block size on a single blockchain

### 4.3.2 节点数目对单个区块链的影响

本文将区块大小<sup>[16]</sup>设定为1MB,进一步研究了节点数目不同的情况下,当单个区块链完成20%,50%和80%的节点的区块传播时,所需要的传播时间,图12为节点数目对单个区块链影响的实验结果图。由图12的实验结果可知,随着节点数目的增多,相同大小的区块所需要的传播时间增加。这是由于节点数目增多,节点间的电力点对点交易数量也随着增加,在微电网中传播相同大小的区块所需要的时间增加。

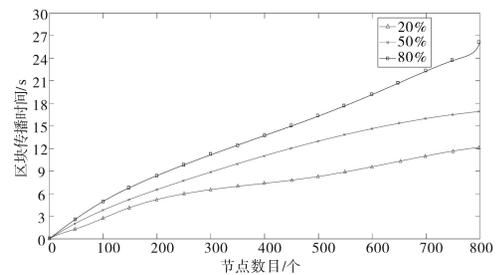


图12 节点数目对单个区块链的影响

Fig.12 The impact of the number of nodes on a single blockchain

## 5 结论

伴随我国智慧城市的建设和发展,可再生能源逐渐替代了传统电能,区块链技术与微网端到端电能交易结合,能够适应新能源多主体、分时段交易特征。

本文的创新点如下:

1)针对微网P2P电能交易特征提出了一种多链式能源区块链工作模式,采用交易链和电能链两类区块链为主链搭建微网P2P电能交易架构,并分别设置交易与电能多侧链的多向互动可实现多区域的微网电能交易,可保证整个过程完整、可监督和真实。

2)在PPGC机制下,即满足去中心化标准和可延展性指标的条件下,设计了一种多链式能源区块链结构下的动态分区算法,该算法可保证每s所完成的交易数目,从而实现去中心化。该算法依据区块链节点的电网关联、电能市场交易频率和各个区块链节点的PPGC机制,完成分区优化。

通过Matlab 2017a设置四组实验,模拟多链式能源区块链结构下的动态分区微网P2P电能交易过程,模拟初始分区数对微网P2P电能交易影响,当分区数为18,节点数目为1200的微电网端到端电能交易获得最优的 $O'_s$ ;模拟电能交易频率对微网P2P电能交易影响,仿真结果可知依据电能交易频率对能源区块链进行分区调整,可优化能源区块链的可延展性能;并模拟仿真区块大小与节点数目对单个区块链的影响,实验结果可知随着区块大小的增大,相同数目节点所需要的传播时间增加;随着节点数目的增多,相同大小的区块所需要的传播时间也随之增加。

多链式能源区块链的维护过程需要损耗一定的算力,下一步的研究主要针对采用更少的算力保障能源区块链的有效性计算。

#### 参考文献

- [1] 张弛,曾杰,曾嵘,等. 直流孤岛微电网的两级功率协同控制方法[J]. 电气传动, 2019, 49(12): 58-63.
- [2] 李振坤,何凯,路群,等. 售电市场环境下并网型微电网的电源配置及优化运行[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 41-49.
- [3] 谢红玲,郑雅男,李燕青. 基于能源区块链网络的微电网经济调度模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 17-25.
- [4] Aitzhan N Z, Svetinovic D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams[J]. IEEE Transactions on Dependable & Secure Computing, 2018, 15(5): 840-852.
- [5] Munsing E, Mather J, Moura S. Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks[C]// IEEE Conference on Control Technology and Applications, IEEE, 2017: 2164-2171.
- [6] 王辉,廖昆,陈波波,等. 低碳形势下基于区块链技术的含微电网电力市场交易出清模型[J]. 现代电力, 2019, 36(1): 14-21.
- [7] 王健,周念成,王强钢,等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072-5084, 5304.
- [8] 邹静,李斌,张利,等. 基于Hash聚合动态数据持有性方案安全性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1145-1149, 1158.
- [9] 胡伟,姚文慧. 基于区块链的能源电力供需网调度优化模型[J]. 系统管理学报, 2019, 28(6): 1134-1142.
- [10] 江秀臣,罗林根,余钟民,等. 区块链在电力设备泛在物联网应用的关键技术及方案[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3393-3400.
- [11] 王化群,张帆,李甜,等. 智能合约中的安全与隐私保护技术[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 63-71.
- [12] 刘懿中,刘建伟,张宗洋,等. 区块链共识机制研究综述[J]. 密码学报, 2019, 6(4): 395-432.
- [13] 祁兵,夏琰,李彬,等. 基于区块链激励机制的光伏交易机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 3(9): 132-139.
- [14] 张琦,刘佳昊,孙向东,等. 基于光伏集成变换器的发电系统工作机理研究[J]. 电气传动, 2019, 49(11): 57-63.
- [15] 聂雅卓,周步祥,林楠,等. 多电压等级电网可靠性递归原理及其递推算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(5): 117-122.
- [16] 张国潮,王瑞锦. 基于门限秘密共享的区块链分片存储模型[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2617-2622.

收稿日期:2019-12-16

修改稿日期:2020-01-14