

基于DPoA共识机制的分布式电力交易信用激励

路尧¹, 胡健¹, 张晓杰², 焦提操¹, 于娣¹, 王云鹏¹, 刘尚奇¹

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东理工大学 经济学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 分布式能源发电容量较小, 不适合参与传统的电力交易, 且其出力的不确定性易造成交易违约。通过区块链技术中的联盟链构建了适合分布式源、荷进行点对点交易的社区型电力交易平台, 提出一种委托权威证明(DPoA)共识机制对区块链节点进行信用评价与激励。构造了履约信用函数和验证奖励函数对链上节点的交易履约与交易验证情况进行量化评价, 并依据节点信用评价结果建立了信用奖惩激励机制。通过分析10个分布式源、荷节点参与的电力交易过程表明: 基于区块链技术构建的社区型电力交易平台, 可发挥电力市场促进分布式清洁能源消纳的作用; 基于DPoA的信用激励机制可激励分布式电力交易节点提高履约度, 维护自身信用。

关键词: 分布式能源; 电力交易; 联盟链; DPoA共识机制; 信用管理

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202109031

0 引言

随着电力系统向低碳化、清洁化转型, 清洁可再生能源供电比例逐步提高, 风能、太阳能等分布式能源大量并网^[1-3]。分布式能源具有规模小、分布分散、靠近分布式负荷等特点, 比较适合通过一种点对点P2P(Peer to Peer)式的、社区化的零售市场, 与分布式用户进行电力交易。P2P电力交易具有自发进行、交易自治等特征, 对交易可信性、公平性、公正性有较高的要求, 而分布式能源的随机性可能导致交易执行的不确定性^[4-6]。近年来随着能源互联网的发展, 区块链技术在分布式能源交易领域的应用受到关注^[7]。文献[8-9]提出了基于区块链技术的分布式能源交易总体框架, 提升了分布式能源的利用水平和经济收益。区块链技术可分为公有链、私有链和联盟链技术。文献[10]归纳了不同技术类型的区块链对电网的适应性, 指出联盟链技术的部分去中心化特征更符合我国分布式电力交易的实际情况。

基于区块链技术建立的交易平台, 为各类型的小型分布式源、荷参与电力市场提供了可能, 且可通过收益的提高对链上节点维护交易平台运行产生正向激励作用。文献[11]在电力交易区块链中建立了基于博弈论的交易定价模型, 提高了卖家的利润, 增强了产消者在区块链交易平台中的交易的积极性; 文献[12]提出了基于区块链技术的电力交易机制来模拟小型社区的P2P电力交易, 显著提高了用户收益,

激励用户参与社区型电力交易。文献[13]基于区块链技术改进了用户用电效用模型并构建了供需双方主从博弈模型, 实现了有效的电力平衡, 增加了供需两侧的福利, 提高了可再生能源的利用率。

信用管理机制是基于区块链的电力交易平台和交易模型设计中的重要环节。如何准确评价电力交易各方的信用水平, 有效激励各方提高对合约的主动履约度, 是信用管理机制设计的关键。目前, 电力市场信用管理还不够完善, 信用评级存在市场成员履约意识淡薄、寡头垄断、缺乏合理机制等问题^[14]。文献[15]提出基于直觉模糊分析的信用风险评估模型, 提高了电力零售企业抗风险能力。文献[16-17]提出了基于风能发电场景下的信用评估模型, 在提升电力系统可靠性的同时, 保证了一定的经济效益。文献[18]提出应建立以保障金支撑的信用体系。文献[19]结合对广东电力现货市场的分析, 提出了现货市场的信用风险管理机制。这些信用管理机制主要是以激励为主, 但都依托于第三方进行信用评级。如何在交易体系内部, 基于交易数据建立信用激励机制, 促使成员主动减少违约行为, 维护自身的信用, 是值得深入研究的问题。目前, 国内学者提出依托区块链技术制定合理的信用评价体系^[20], 通过区块链技术的共识机制建立信用管理模型^[21-22]。但上述方法对于参与区块链交易用户的信用激励作用体现较少。因此, 可以将区块链作为技术基础, 建立合理的信用评价体系与激励惩罚机制。

综上所述, 本文针对分布式电力交易平台系统架构和交易流程, 基于联盟链技术, 提出一种委托权威证明DPoA(Delegated Proof of Authority)共识机制, 并利用该机制建立分布式电力交易区块链的节点信用评价体系与激励机制。

收稿日期: 2021-05-13; **修回日期:** 2021-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073200); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MG037)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(62073200) and the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2020MG037)

1 分布式电力交易平台设计

1.1 分布式电力交易平台系统架构

基于信用的分布式电力交易平台系统架构见附录A图A1,其主要分为基础层、应用数据层、应用支撑层、区块链层、应用管理层和展现层。

1)基础层主要包括网络系统和计算机、存储设备、安全设备,保证了系统的良好运行。

2)应用数据层存放了系统中的各种数据,包括用户信息、交易信息、交易模型、信用模型等非结构化数据和系统数据库、数据备份、共享数据等结构化数据。

3)应用支撑层是整体架构运行的保障,采用以太坊支撑平台运行。

4)区块链层是整体架构的核心内容,包括网络层、合约层和共识层。其中,网络层与系统的基础层统一,将区块链中所用的P2P技术建设统一在基础层中。

5)应用管理层整合相关系统应用,主要包括交易管理、账户注册、信用审查、信用计算、信用评估等功能。

6)展现层实现整个平台功能的对外展示。

1.2 分布式电力交易流程

1)注册账户。

发、用双方成员加入区块链、参加电能交易时需注册账户,成为交易平台用户。用户在区块链中称为节点,节点在参与区块链交易时需要被赋予账户信息。账户信息 X_j 包含节点的基本地址信息、账户余额信息、交易信息和信用信息,如式(1)所示。

$$X_j = \{A_j, B_j, C_j, D_j\} \quad (1)$$

式中: A_j 、 B_j 、 D_j 分别为节点 j 的基本地址信息、账户余额信息、交易信息; C_j 为节点 j 的信用信息,包括节点的履约信用信息、验证奖励信用信息和信用累计次数信息,如式(2)所示。

$$C_j = \{C_j^z, C_j^{\text{verification}}, e_j\} \quad (2)$$

式中: C_j^z 为节点 j 在第 z 次交易后产生的履约信用值; $C_j^{\text{verification}}$ 为节点 j 的验证奖励信用值; e_j 为节点 j 的信用累计次数信息。

2)发布交易信息。

注册成功的节点可在系统中向全体节点广播自身的交易信息。用电侧节点发布自身的需求信息,包括用电规划、用电量、用电时间等;发电侧节点发布自身的供电信息,包括发电规划、发电价格以及发电量等。双方根据自身的需要在区块链中找到合适的交易方,在双方商定好交易的价格、时间和交易量等交易细节后,任何一方都可以发起交易申请。

3)生成智能合约。

交易双方商定好交易细节并发起交易后,生成

交易清单,包括交易发起者、交易双方的基本信息、交易时间、交易电量、交易价格等信息。交易清单通过审核后,交易双方将交易清单的内容生成智能合约提交电力交易中心存储,并支付给电力交易中心相应的手续费。

4)物理交易及信用计算。

生成智能合约后,交易节点将从电力交易中心同步审核信息,等待交易双方同时确认审核信息后,交易开始。交易双方按照智能合约协定的交易时间、交易电量,通过配电网进行电能传输,在达到智能合约协定的交易时间后停止电能传输。电力交易中心通过智能电表读取双方实际交易电量,根据输电情况向双方收取过网费。承担验证任务的节点对本次交易中实际交易电量与智能合约中协定电量进行验证,将验证后的信息提交至电力交易中心。电力交易中心根据交易双方的违约情况,更新双方的信用信息。

5)交易金与惩罚金的计算与交割。

在完成电能传输和节点信用计算后,应按合同协定的电量与电价计算交易金并完成最后的交割。如果出现违约情况,则违约方需要赔付惩罚金。由于电网的安全和交易平台的运行需要参与区块链的全部节点共同维护,因此惩罚金由被违约节点与链上其余节点按照一定比例共同获得。如果交易中一方出现违约行为,则违约方赔付的惩罚金由电力交易中心按规定比例分配给被违约节点和链上其余节点;如果双方均出现违约行为,则惩罚金由电力交易中心按规定比例分配给除违约节点以外的链上节点。

以区块链为技术支撑的交易模型,交易数据在区块链中存储不可篡改,在保障交易公开透明的前提下,又能保障交易的隐私。区块链会自动生成智能合约内容,且不受其他因素干扰。提高节点信用水平,是以信用为核心的分布式电力交易平台健康运行的关键。因此,为了减少节点违约行为,提高节点在实时电力市场交易中的履约度和合理性,应设计合理的信用评估体系和激励机制。

2 基于DPoA共识机制的节点信用管理

2.1 联盟链与共识机制

区块链分为公有链、私有链和联盟链。公有链为完全去中心化的区块链,任何人都可以参与其中,对于加入的成员没有要求。私有链不具有去中心化的特点,所有参与者必须服从中心节点调度。联盟链是部分去中心化的区块链,需要预先选出多个节点为记账人,其他参与人只参与交易而不参与记账。在电力市场交易中,交易主体是全体电力用户而不是单独的实体或个人,而私有链通常仅对单独的实

体或个人开放,因此,私有链不适用于电力市场交易。同时,我国电力市场建设不适合采取完全脱离电力交易中心的模式,故公有链也不适用于电力市场交易。联盟链可以完成不同节点之间的交易,且联盟链部分去中心化的特征更适合我国电力改革的现状。因此,可选用联盟链为基于区块链的分布式电力交易平台的技术内核。

在联盟链技术中,共识机制是指所有链上节点参与区块链应遵循的交易规则。现有的共识机制有工作量证明 PoW (Proof of Work)、权益证明 PoS (Proof of Stake)、权威证明 PoA (Proof of Authority) 等。PoW 共识机制通过工作量来获得记账权利。由于分布式交易中可能存在节点不活跃的情况,因此恶意节点很可能通过购买算力来攻击区块链,安全性较低。PoS 共识机制通过节点权益获得记账权利。相比于 PoW 共识机制节省了部分算力,但仍然是一个开放性的共识机制,安全性较差。PoW 和 PoS 共识机制的去中心化程度较高,在应用于电力交易时,更适合以公有链为核心的交易模型,而 PoA 共识机制更适用于联盟链。PoA 共识机制是一种优先选出权威代表验证交易的共识机制,具有部分去中心化的特点,与联盟链技术特点和我国电力市场改革方向相符。但在 PoA 共识机制中权威节点的作用过大,其不仅可以确定节点是否能够参与区块链系统,且节点交易全部由权威节点验证。因此,为了保障联盟链交易的公平性,释放权威节点算力,提高联盟链效率,本文提出一种 DPoA 共识机制。

2.2 DPoA 共识机制

DPoA 共识机制具有部分去中心化的特点,其基本原理图如附录 A 图 A2 所示。在构建联盟链时,首先选定中心节点作为初始节点。中心节点通常由电力交易中心承担,负责创建、广播、管理区块,接收上链用户。联盟链启动时,由中心节点选择和广播获得验证资格的节点,承担区块链交易的验证工作。在交易开始前,验证节点对交易信息进行投票验证,最后一个验证节点将投票信息打包后提交至中心节点,由中心节点统计投票情况,审核交易信息。在交易完成后,仍然由验证节点负责验证交易完成情况,并提交至中心节点,中心节点存储交易信息,其余的节点从中心节点处同步数据。中心节点根据验证情况更新节点信用等信息,交易节点根据电力交易中心提供的交易密钥更新自身的信用等信息。

DPoA 共识机制保留了 PoA 共识机制^[23]高效性的优点,用户只需通过身份验证就可以获取节点地址上链工作。相比于其他共识机制,DPoA 共识机制工作效率较高,可以满足电网实时交易的需要。DPoA 共识机制既保留了电力交易中心对区块链交易系统的控制力,与联盟链相适应,又使交易环节由

节点自发进行,并将验证权交付于普通节点,保证了交易的公平性和自治性。验证节点由信用达标的普通节点承担。当节点信用值达标后,根据节点曾经正确验证的记录,按一定比例从整体节点中加权随机选取一定数量的节点承担验证工作。节点验证工作质量越高,继续担任验证节点的概率越大。为了保证节点验证工作的客观性和可靠性,验证节点数量不宜过少;为了保证交易的时效性,验证节点的数量也不宜过多。因此,验证节点可取全部节点数量的 10%~20%。验证节点可通过参与验证工作获益,激励节点在保证自身信用的同时提升验证工作效率。由此可见,信用是节点参与验证工作和保障自身权益的基础。

2.3 基于 DPoA 共识机制的信用评价

在 DPoA 共识机制中,信用是保障节点权益的关键因素。基于联盟链的分布式电力交易,节点可能在以下 2 种场景中出现失信行为:当节点进行电力交易时,达到物理传输的规定时间后,没有实现合同约定的发(用)电量;当节点参与交易验证时,对不合理的交易行为进行验证投票或错误验证节点履约情况。下面分别对这 2 种场景下的失信行为进行信用评价。

1) 交易节点履约信用评价。

履约信用是指交易双方在进行电能交易所产生的信用。作为发电侧节点,在规定时间内未按照智能合约中所规定的电量完成发电,导致用电侧节点需要从电网购买电量,以填补发电侧节点违约电量的空缺,从而导致用电侧节点产生损失。作为用电侧节点,在规定的时间内,未按照智能合约规定的用电量购入电量,导致发电侧节点需要将剩余电量出售给电网或其他电力节点,从而导致发电侧节点产生损失。

设定所有上链节点的履约信用初值为 C_j^{initial} ,为了方便计算,本文取 $C_j^{\text{initial}} = 100$ 。对于交易节点,当产生违约情况时,节点信用扣除如式(3)所示。

$$U_i = \begin{cases} U_{i-1} + U_{i-2} & i > 2 \\ 1 & i \leq 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_i 为节点在第 i 次违约交易中的信用扣除值。式(3)采用斐波那契数列,即:当节点产生第 1 次和第 2 次违约行为时,扣除 1 分信用分;违约次数 $i > 2$ 时,扣除的信用值为第 $i-1$ 和第 $i-2$ 次信用扣除值之和,具体情况如表 1 所示。节点在第 z 次交易中如果出现交易违约的情况,其信用扣除值 U_z 根据违约次数确定,否则信用扣除值为 0,如式(4)所示。

$$U_z = \begin{cases} U_i & Q_{\text{treaty}} \neq Q_{\text{deal}} \\ 0 & Q_{\text{treaty}} = Q_{\text{deal}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q_{treaty} 为智能合约中双方协定的交易量; Q_{deal} 为节点的实际交易电量。

表 1 违约行为信用扣除情况

Table 1 Credit deduction for breach of contract

i	U_i	i	U_i
1	1	4	3
2	1	5	5
3	2	$\vdots$	$\vdots$

对于参与交易的节点,节点履约信用值如式(5)所示。

$$C_j^z = C_j^{z-1} - U_z \quad (5)$$

式中: C_j^z 、 C_j^{z-1} 分别为第 z 、 $z-1$ 次交易后产生的节点履约信用值。

2) 验证节点奖励信用评价。

验证奖励信用是指参与验证的节点合规完成验证工作时产生的信用。担任验证工作的节点可能存在一定的违规验证行为,即对不合理的交易行为进行验证投票或错误验证节点履约情况。为了减少违规验证行为,将验证工作与惩罚电价挂钩,激励节点完成验证工作。利用 Sigmoid 函数改进后的验证奖励信用值如式(6)所示。

$$C_j^{\text{verification}} = k_1 \left(\frac{1}{1 + e^{-\frac{1}{2}n}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: n 为验证节点 j 连续成功验证的次数; k_1 为控制系数,其值越大,验证奖励信用值越大,信用惩罚电价会越低,如附录 A 图 A3 所示。由图可以看出,当节点连续成功验证时,系统会予以一定的信用奖励,验证奖励信用随连续成功验证次数的增加而增大。当节点连续成功验证次数超过一定次数时,验证奖励信用收敛于某值,收敛值与控制系数 k_1 相关。由此可见,采用这种信用奖励函数,既可以促进验证节点积极合规完成验证工作,又可通过合理设置 k_1 ,防止发生虽然节点履约信用差,但因担任验证工作而导致惩罚金很低的情况。

3 基于违约惩罚的信用激励机制

3.1 信用激励机制流程

基于违约惩罚的信用激励机制流程图见附录 A 图 A4,具体步骤如下。

1) 系统运行后,承担验证工作的节点会验证交易节点提交的交易信息。当交易信息验证通过后,双方交易开始,电力交易中心负责电能的物理传输。

2) 在达到交易协定时间后,由验证节点验证本次交易双方是否出现违约行为。

3) 定义 D 为节点连续未违约次数,初始值设为 0。为激励节点连续履约,设置一个履约补偿控制因子 c 。当节点连续未违约次数 $D > c$ 时,可对节点履约信用值进行补偿。为了保证违约惩罚的效力,履约补偿控制因子 c 不宜过小;同时,为激励节点连续

履约, c 也不宜过大。所以,本文将履约补偿控制因子 c 取为 10。

(1) 如果节点未出现违约行为,则 D 值加 1。若此时 $D > c$ 且节点履约信用值小于 100,则将节点履约信用值加 1, D 清零,然后按照合约完成交易。若 $D > c$ 且节点履约信用值大于 100 或 $D < c$,则直接按合约完成交易。

(2) 如果节点出现违约行为,则调用节点当前的履约信用值。若节点履约信用值为 100,则按规定扣除相应的信用值, D 清零,本次交易按照合约进行交割,不予惩罚。若节点履约信用值小于 100,则根据 D 执行相应惩罚电价和惩罚金后, D 清零。此时,若 $D > c$,即连续 c 次交易时段内均正常履约,为激励节点的连续履约,节点履约信用值增加 1,并将违约次数 i 置 1 后按规定方式计算惩罚电价;若 $D < c$,则按规定方式计算惩罚电价。

4) 计算完成后将惩罚金提交至电力交易中心,由电力交易中心根据规定比例完成惩罚金的分配。最后,交易双方按合约电价和电量进行交割。

3.2 节点信用值对惩罚电价的影响

1) 惩罚电价的计算。

智能合约电价是交易双方经过协商敲定,并提交区块链经过验证后的最终价格。如果一方违约,则另一方需要承担一定的损失。为了减少被违约节点的损失,提出一种通过节点信用值影响的惩罚电价。当达到合同协定的交易时间后,由验证节点判定交易双方是否执行合同电量。如果发生违约行为,则按式(7)计算惩罚电价 P 。

$$P = \sqrt{1 - \left[\frac{C_j^z}{C_j^{\text{initial}}} + \frac{0.01k_2(C_j^{\text{initial}} - C_j^z)\beta}{C_j^{\text{initial}}} \right]^2} P_{\text{treaty}} \quad (7)$$

$$\beta = C_j^{\text{verification}} + g \quad (8)$$

式中: P_{treaty} 为交易合约电价; k_2 为信用恢复系数; g 为信用补充常数; β 为信用成本影响因子。

式(7)表明,节点履约信用可控制惩罚电价的高低,同时验证奖励信用可对节点被扣除的履约信用值进行一定的恢复。因此,通过这种方式可以有效激励链上节点履约和参与验证工作的积极性。

2) 惩罚金的计算与分配规则。

惩罚金是对节点未完成智能合约协定部分电量的惩罚。当节点履约信用小于 100 时,节点需要对自己未履约部分电量进行惩罚。惩罚金 T 的确定方式、分配方式分别如式(9)、(10)所示。

$$T = P(Q_{\text{treaty}} - Q_{\text{deal}}) C_j^z < 100 \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_a = \mu T \\ T_{\text{pun},k}^z = (1 - \mu) T \frac{C_k^z}{\sum_{k=1}^{N-2} C_k^z} \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_a 为被违约方获赔的惩罚金; μ 为赔偿控制系数, $\mu \in [0, 1]$; $T_{pun,k}^z$ 为参与分配的 $N-2$ 个节点按信用分配的惩罚金; C_k^z 为参与分配的各节点的履约信用值; N 为区块链上参与交易的节点总数。如果交易中出现一方违约的行为, 为保障被违约方的权益, 将惩罚金按比例 μ 分割后对其进行补偿。同时, 考虑到链上所有节点对维护交易平台的运行均承担相同的责任和义务, 将分割后剩余惩罚金按信用值加权分配给链上的其余节点, 使参与区块链安全维护与交易工作的所有节点从中获得一定的激励补偿。如果交易中双方都产生违约行为, 则取 $\mu=0$, 将惩罚金分配给链上的其余节点, 违约双方不参与分配。

4 算例仿真验证

4.1 惩罚电价函数模型仿真验证

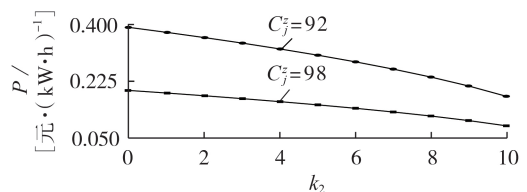
惩罚电价函数设计的核心思路, 是通过节点的履约信用主导惩罚电价, 通过验证奖励信用对惩罚电价起一定恢复或补偿作用。因此, 首先验证节点的履约信用和验证奖励信用对惩罚电价的影响, 仿真情景设定为: $P_{treaty}=1$ 元 / (kW·h), $k_1=5$, $k_2=5$, $g=3$ 。通过 MATLAB 仿真, 得到验证节点的履约信用值和验证奖励信用与惩罚电价关系见附录 A 图 A5。由图可得出 2 个结论: ①惩罚电价随着履约信用和验证奖励信用的增加而减小; ②节点验证奖励信用对惩罚电价所起的恢复作用没有超过节点履约信用对惩罚电价的影响, 履约信用仍然为惩罚电价的主导因素。

上述结论表明惩罚电价与预期结果相符, 因此该种惩罚电价模型合理。惩罚电价函数模型中的信用恢复系数 k_2 和信用补充常数 g 可以用来控制验证奖励信用对惩罚电价恢复或补偿力度。为了验证 k_2 和 g 与惩罚电价的关系, 进行 2 组仿真验证: ①第 1 组, 设置 $P_{treaty}=1$ 元 / (kW·h)、 $n=10$ 、 $g=3$, 分别仿真在 C_j^z 为 92 和 98 这 2 种情况下, k_2 与 P 的关系; 第 2 组, 设置 $P_{treaty}=1$ 元 / (kW·h)、 $n=10$ 、 $k_2=5$, 分别仿真在 C_j^z 为 92 和 98 这 2 种情况下, g 与 P 的关系。2 组仿真验证的结果如图 1 所示。由图可见, k_2 与 g 的值越大, P 越小。因此, 可以通过设置 k_2 与 g 的取值控制验证奖励信用对于惩罚电价所起的恢复作用。

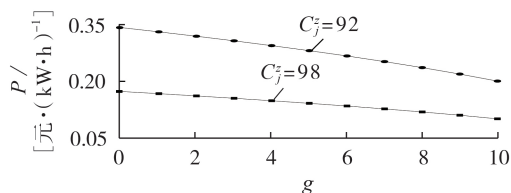
通过上述验证分析可知构造的惩罚电价函数具有一定的合理性, 可以很好地反映节点信用与惩罚电价的关系, 与预期的结果相符。

4.2 信用激励机制仿真验证

为验证信用激励机制的合理性, 采用 MATLAB 仿真交易流程, 并模拟发电节点与用电节点连续 15 个交易时段内的交易情况。其中, $k_1=5$, $k_2=5$, $g=3$, 发电节点和用电节点进行交易前的履约信用值分别



(a) 信用恢复系数与惩罚电价的关系



(b) 信用补充常数与惩罚电价的关系

图1 2组仿真验证的结果

Fig.1 Results of two groups of simulative verification

为 100 和 90。发电节点在各交易时段内承担验证工作, 合约交易电价和交易量由交易双方协定。模拟数据见附录 A 表 A1、A2, 由表可得出以下结论。

1) 发电节点和用电节点分别在第 2、13、15 个交易时段交易和第 1、3、4、15 个交易时段交中产生违约行为; 发电节点在第 2 和 13 个交易时段内产生违约行为, 但由于上一个交易时段的履约信用值为 100, 所以本次交易仅扣除信用值, 并未做出处罚; 用电节点在第 5—14 共 10 个交易时段均正常履约, 所以在第 14 个交易时段内信用值恢复为 1。信用激励机制能够将节点的履约与验证情况转换成信用值, 比较准确地描述节点的信用水平。

2) 在第 15 个交易时段内, 交易双方均发生违约行为, 但发电节点履约信用值为 98, 高于用电节点的履约信用值 86, 且发电节点连续 8 次完成验证工作, 因此发电节点惩罚电价小于用电节点的惩罚电价。良好的履约情况和工作质量可以为节点带来更多的经济收益。由此可见, 信用激励机制能够有效激励节点主动维护自身信用, 提高履约度, 实现节点信用的正向激励与自主管理。

3) 在表 A1、A2 所示的所有交易中未发生违约行为时, 节点均未产生惩罚电价; 当交易中出现违约行为时, 均可根据节点履约信用值和验证工作情况按规定进行惩罚。由此可见, 信用激励机制具有一定的公平性和合理性, 可以达到促使节点积极履行验证工作、提高自身的信用值的目的, 与预期相符。

4.3 分布式交易平台用户交易仿真

为了验证信用体系和激励机制在社区交易中的合理性, 仿真某个交易时段内 10 个发电节点与 10 个用电节点的交易, 设置 $k_1=5$, $k_2=5$, $g=3$, $\mu=0.8$, 发电节点上网电价为 0.5 元 / (kW·h), 用电节点从电网购入电量的价格为 0.75 元 / (kW·h), 仿真结果见表 2、3。表中, 交易节点对应的列中, “/” 区分的数据

表 2 发电节点交易情况

Table 2 Transaction status of power supplier nodes

发电节点	C_j^z	n	交易节点	可发电量 / (kW·h)	$Q_{\text{treaty}} /$ (kW·h)	$P_{\text{treaty}} /$ [元·(kW·h) ⁻¹]	违约电量 / (kW·h)	上网电量 / (kW·h)	$T /$ 元	$T_{\text{pun},k}^z /$ 元	支出 / 元
1	96	0	g / i / j	100	80 / 10 / 10	0.64 / 0.64 / 0.65	0	0	0	0.081	64.91
2	97	5	a / b	90	50 / 50	0.66 / 0.66	0 / 10	0	1.28	0.082	58.20
3	90	0	c	60	60	0.65	0	0	0	0.076	39.08
4	100	0	d	60	60	0.67	0	0	0	0.085	42.90
5	91	0	e	60	60	0.64	0	0	0	0.077	38.48
6	99	0	e(f)	70	70	0.65	0	0	0	5.430	50.93
7	92	0	f	40	40	0.65	0	0	0	0.078	26.08
8	95	0	h	30	30	0.66	0	0	0	0.080	19.88
9	93	0	h	30	30	0.66	0	0	0	0.079	19.88
10	94	0	—	10	—	—	—	10	0	0.080	5.080

表 3 用电节点交易情况

Table 3 Transaction status of power consumer nodes

用电节点	C_j^z	n	交易节点	需用电量 / (kW·h)	$Q_{\text{treaty}} /$ (kW·h)	$P_{\text{treaty}} /$ [元·(kW·h) ⁻¹]	违约电量 / (kW·h)	购入电网电量 / (kW·h)	$T /$ 元	$T_{\text{pun},k}^z /$ 元	支出 / 元
a	94	0	2	50	50	0.66	0	0	0	0.080	32.92
b	93	0	2	50	50	0.66	0	10	0	1.216	32.68
c	95	0	3	70	60	0.65	0	10	0	0.081	46.42
d	92	0	4	60	60	0.67	0	0	0	0.078	40.12
e	90	6	5 / 6	100	60 / 70	0.64 / 0.65	0 / 30	0	6.77	0.077	71.09
f	91	0	6 / 7	70	30 / 40	0.65 / 0.65	0	0	0	0.077	45.42
g	100	0	1	80	80	0.64	0	0	0	0.085	51.12
h	99	0	8 / 9	60	30 / 30	0.66 / 0.66	0	0	0	0.084	39.52
i	97	0	1	10	10	0.64	0	0	0	0.082	6.32
j	96	0	1	10	10	0.65	0	0	0	0.082	6.42

为与发电节点或用电节点交易的某几个节点,“()”中的节点为被之前节点违约后新的交易节点; Q_{treaty} 、 P_{treaty} 对应的列中,“/”表示对应于交易节点的合约电量与合约电价。

由表 2、3 易得出以下结论。

1) 发电节点 2 没有按照合约规定提供相应电量,因此获得一定的惩罚,这种违约行为使得与之签订合约的用电节点 b 需要从电网高价购买电价,产生了一定的经济损失,但是用电节点 b 从发电节点 2 处得到了一定的违约金,从而得到了弥补。这种方式可以提高用电用户在系统中交易的可靠性,使得用电用户更愿意在购入电价更低的分布式平台中交易。

2) 用电节点 e 没有按照规定使用足够电量,因此获得了一定的惩罚,但被其违约的发电节点 6 仍在平台中寻找到了用电节点 f 与其交易,使得发出的电量没有低价出售给电网,这种方式减少了发电节点的经济损失,使发电节点更愿意将生产的电量在社区消纳而不是出售给电网,是发电节点愿意在销售价格更高的分布式平台中进行交易。

综上所述,基于信用的分布式电力交易平台能够通过信用机制减少平台用户的经济损失,促进平台用户积极履行合约,具有一定的公平性和合理性,与预期相符。

5 结论

本文针对分布式电力交易平台的系统架构和交易流程,基于联盟链技术提出 DPoA 共识机制,利用该共识机制建立分布式电力交易区块链的节点信用评价体系与激励机制,并得出了以下结论。

1) 不断提高分布式能源的就地消纳水平,能有效提升清洁能源利用效率,降低社会减排成本,有助于我国能源消费结构实现绿色低碳转型升级。针对分布式能源规模小、分布分散、靠近负荷等特点,迫切需要建设社区化的分布式电力零售市场,并深度挖掘新的市场架构和商业模式,优化各种分布式资源的市场交易流程,促进分布式清洁能源的高效利用。

2) 区块链的技术特点与电力零售交易的需求高度契合,可以很好地应用于分布式电力交易。我国电力市场建设采用以区域和省级电力交易中心为核心的模式,联盟链部分去中心化的特征更适合于我国电力改革的现状。本文提出的 DPoA 共识机制,既保留了电力交易中心对区块链交易系统的控制力,与联盟链相适应,又使交易环节由节点自发进行,并将验证权交付于普通节点,保证了交易的公平性和自治性。

3) 信用管理机制是基于区块链的电力交易平台和交易模型设计中的重要环节。本文基于 DPoA 共

识机制,设计了面向分布式电力区块链交易平台的信用评价体系和激励机制。由节点交易数据自动生成的履约信用记录与节点参与合规验证工作获得的奖励信用,共同反映节点的信用水平,并影响节点违约后的惩罚金额。

4)算例仿真与分析表明,上述信用评价体系和激励机制,能够比较准确地描述区块链上节点的信用水平,有效激励节点主动维护自身信用,提高履约度,实现区块链内部交易节点信用的正向激励与自主管理,促进分布式电力市场向低碳化和清洁化发展。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):85-93.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-93.
- [2] 胡健,秦玉杰,焦提操,等. 泛在电力物联网环境下考虑碳排放权约束的VPP理性调峰模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3):49-57.
HU Jian, QIN Yujie, JIAO Ticao, et al. Rational peak shaving model of VPP considering carbon emission rights constraints in ubiquitous power Internet of Things environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 49-57.
- [3] 秦玉杰,胡健,焦提操. 基于泛在电力物联网的分布式可再生能源(DRE)理性消纳调峰模型[J]. 电力建设,2019,40(12):120-128.
QIN Yujie, HU Jian, JIAO Ticao. Rational accommodation model of DREs for peak-shaving in ubiquitous power Internet of Things[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(12): 120-128.
- [4] 陈启鑫,王克道,陈思捷,等. 面向分布式主体的可交易能源系统:体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):1-7,31.
CHEN Qixin, WANG Kedao, CHEN Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: architecture, mechanism design and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7, 31.
- [5] 杨明通,周步祥,董申,等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):155-161.
YANG Mingtong, ZHOU Buxiang, DONG Shen, et al. Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 155-161.
- [6] SABOUNCHI M, Wei Jin. Towards resilient networked microgrid: blockchain-enabled peer-to-peer electricity trading mechanism[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System(EI2). Beijing, China: IEEE, 2005: 26-28.
- [7] 徐嘉辉,马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):17-22,30.
XU Jiahui, MA Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 17-22, 30.
- [8] TSAO Yuchung, THANH V, WU Qiuwei. Sustainable microgrid design considering blockchain technology for real-time price-based demand response programs[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106418.
- [9] WANG Xian, ZHANG Ying, ZHANG Shaohua. Equilibrium analysis of multi-energy markets with microgrids bidding[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(7): 1020-1031.
- [10] 叶畅,苗世洪,刘昊,等. 联盟链框架下主动配电网电力交易主体合作演化策略[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1739-1753.
YE Chang, MIAO Shihong, LIU Hao, et al. Cooperative evolutionary game strategy for electricity trading stakeholders in active distribution network under consortium blockchain framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1739-1753.
- [11] JIANG Yanni, ZHOU Kaile, LU Xulin, et al. Electricity trading pricing among prosumers with game theory-based model in energy blockchain environment[J]. Applied Energy, 2020, 271: 115239.
- [12] OPREA S V, BÂRA A. Devising a trading mechanism with a joint price adjustment for local electricity markets using blockchain. Insights for policy makers[J]. Energy Policy, 2021, 152: 112237.
- [13] 李军祥,周继儒,何建佳. 基于区块链的电网实时定价混合博弈研究[J]. 电网技术,2020,44(11):4183-4191.
LI Junxiang, ZHOU Jiru, HE Jianjia. Mixed game of real-time pricing based on block chain for power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4183-4191.
- [14] 夏清,陈启鑫,谢开,等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(2):我国跨区跨省电力交易市场的发展途径、交易品种与政策建议[J]. 电网技术,2020,44(8):2801-2808.
XIA Qing, CHEN Qixin, XIE Kai, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics(2): development path, trading varieties and policy recommendations for inter-regional and inter-provincial electricity markets[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2801-2808.
- [15] DE G, TAN Zhongfu, LI Menglu, et al. A credit risk evaluation based on intuitionistic fuzzy set theory for the sustainable development of electricity retailing companies in China[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(6): 2825-2841.
- [16] ROACH T. The effect of the production tax credit on wind energy production in deregulated electricity markets[J]. Economics Letters, 2015, 127: 86-88.
- [17] ZHAO J F, OH U J, CHOI J S. Power system reliability evaluation including capacity credit considering wind energy with energy storage systems in China[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(4): 348-353.
- [18] 徐宏,林新,朱策,等. 电力市场信用评级管理建设探讨[J]. 电网技术,2020,44(7):2582-2593.
XU Hong, LIN Xin, ZHU Ce, et al. Crediting management in the electricity market[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2582-2593.
- [19] 田琳,甘倍瑜,孙谦,等. 广东电力现货市场信用风险管理[J]. 南方电网技术,2019,13(6):50-56.
TIAN Lin, GAN Beiyu, SUN Qian, et al. Credit risk management in Guangdong power spot market[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 50-56.
- [20] 谢开,张显,张圣楠,等. 区块链技术在电力交易中的应用与展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):19-28.
XIE Kai, ZHANG Xian, ZHANG Shengnan, et al. Application and prospect of blockchain technology in electricity trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 19-28.
- [21] 平健,严正,陈思捷,等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7137-7145,7487.
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management

gement in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.

- [22] 秦金磊, 孙文强, 李整, 等. 适用于微电网区块链的信用共识机制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 10-18.

QIN Jinlei, SUN Wenqiang, LI Zheng, et al. Credit consensus mechanism for microgrid blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 10-18.

- [23] 夏晨益, 蔡青松, 吴杰. 基于PoA联盟链的微电网无报价交易机制[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(11): 57-65.

XIA Chenyi, CAI Qingsong, WU Jie. Microgrid no-bidding trading mechanism based on PoA consortium blockchain[J]. Com-

puter Systems & Applications, 2020, 29(11): 57-65.

作者简介:



路尧

路尧(1996—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场、区块链在电力市场的应用(E-mail: sdut2019ly@163.com);

胡健(1976—),男,山东聊城人,副教授,主要研究方向为电力市场与电力(能源)经济(E-mail: hujian@sdut.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Credit incentives of distributed power transaction based on DPoA consensus mechanism

LU Yao¹, HU Jian¹, ZHANG Xiaojie², JIAO Ticao¹, YU Di¹, WANG Yunpeng¹, LIU Shangqi¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. School of Economics, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The smaller generating capacity makes the distributed energy unsuitable for participating in traditional power trading, and the output uncertainty often leads to transaction defaults. Based on the consortium blockchain, a community-based electricity transaction platform, which is suitable for P2P (Peer-to-Peer) transactions of distributed sources and loads, is developed, and the DPoA (Delegated Proof of Authority) consensus mechanism is proposed for credit evaluation and incentive of blockchain nodes. The fulfillment function and verification reward function are constructed to quantitatively evaluate the performance and the verification of the transaction, and the function values can be used to establish an incentive mechanism by credit reward or credit punishment. The analysis of the electricity transaction process involving ten distributed source and load nodes shows that the community-based electricity transaction platform based on blockchain technology can promote the consumption of distributed clean energy, and the incentive mechanism based on DPoA can encourage the nodes of the electricity transaction platform to improve the credit initiative.

Key words: distributed energy; power transaction; consortium blockchain; DPoA consensus mechanism; credit management

附录 A

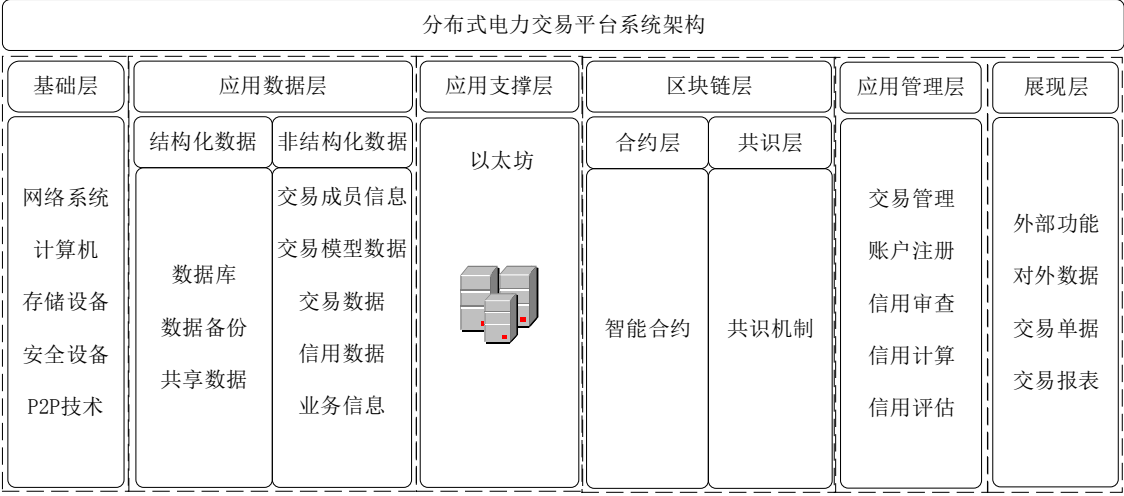


图 A1 分布式电力交易平台系统架构
Fig.A1 Architecture of distribute power trading platform

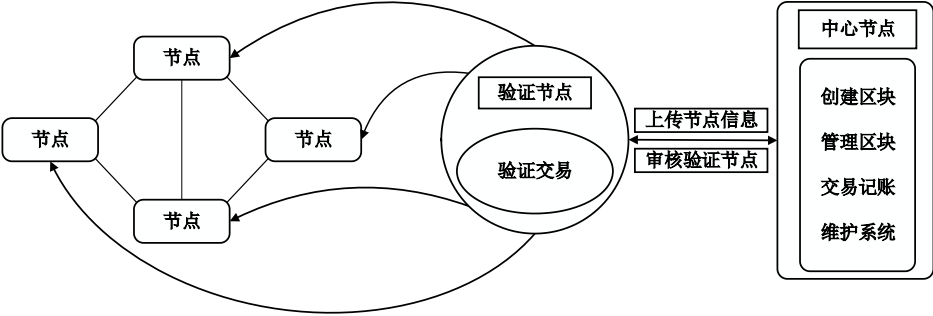


图 A2 DPoA 共识机制基本原理
Fig.A2 Basic principle of DPoA consensus mechanism

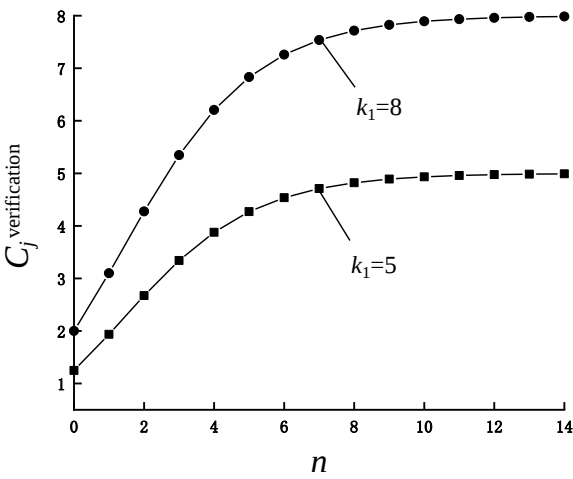


图 A3 节点验证奖励信用
Fig.A3 Node verification reward credit

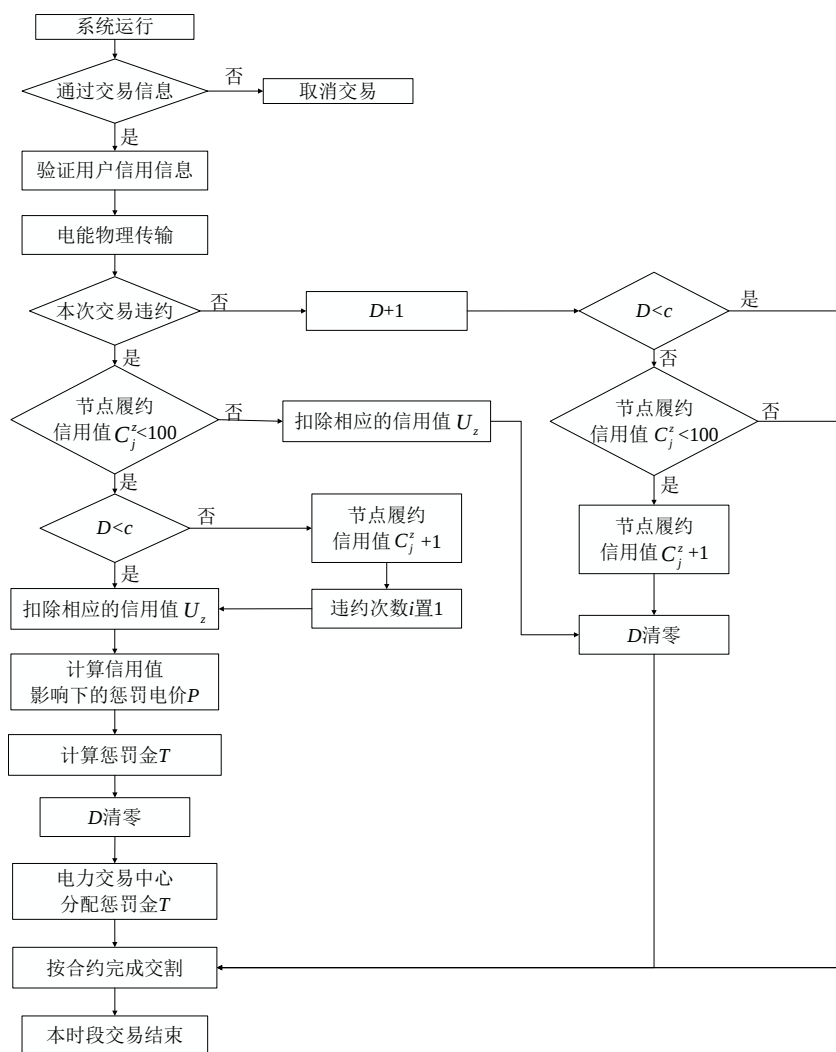


图 A4 信用激励机制流程
Fig.A4 Credit Incentive Mechanism process

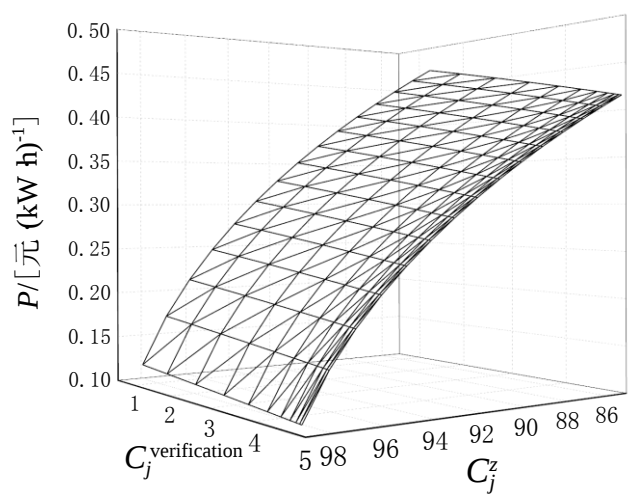


图 A5 履约信用和验证奖励信用与惩罚电价的关系
Fig.A5 Relationship among P , C_j^z and $C_j^{\text{verification}}$

Table A1 Simulative data of credit incentive mechanism

交易时段	P_{treaty} / [元 (kW h) ⁻¹]	Q_{treaty} / [kW · h]	发电用户 实际发电量 /(kW h)	用电用户 实际用电量 /(kW h)	n	P (发电节点) /[元 (kW h) ⁻¹]	T (发电节点) /元	P (用电节点) /[元 (kW h) ⁻¹]	T (发电节点) /元
1	0.64	80	80	75	1	0.00	0.00	0.27	1.35
2	0.64	80	75	80	1	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.65	80	80	75	2	0.00	0.00	0.28	1.41
4	0.64	90	90	80	2	0.00	0.00	0.30	3.03
5	0.66	100	100	100	2	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.67	110	110	110	3	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.67	120	120	120	4	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.68	120	120	120	5	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.66	110	110	110	5	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.66	100	100	100	5	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.67	100	100	100	5	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.65	90	90	90	6	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.64	90	80	90	6	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.64	90	90	90	7	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.64	80	70	75	8	0.10	1.00	0.30	1.51

Table A2 Simulative data of node credit

[illegible]