

# 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型

余维, 胡跃, 杨晓宇, 高山, 刘炜

(郑州大学, 河南省 郑州市 450000)

## Virtual Power Plant Operation and Scheduling Model Based on Energy Blockchain Network

SHE Wei, HU Yue, YANG Xiaoyu, GAO Shan, LIU Wei

(Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Henan Province, China)

**ABSTRACT:** Block chain is a new decentralized framework and a distributed computing paradigm, which integrates and innovates a variety of computer technologies. Virtual power plant is an important branch of the energy internet. It plays an important role in the convergence of distributed power generation resources and the establishment of virtual power resource transactions. In this paper, it proposed a kind of energy block chain network model and a virtual power plant operation and scheduling of the improved model to solve the existing problems in the VPP model. The simulation results show that the proposed model can reflect the real-time information of the demand, conducive to the virtual power plant environmental friendly and transparent stable scheduling, and improve the data and storage security.

**KEY WORDS:** block chain; virtual power plant (VPP); VPP model; stable operation; data security

**摘要:** 区块链作为一种全新的去中心化基础构架和分布式计算范式, 融合并创新了多种计算机技术。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)是能源互联网中的一个重要分支, 在聚合分布式发电资源和建立虚拟电力资源交易等方面发挥着重要的作用。该文针对现有的 VPP 模型中存在的问题, 将区块链技术引入 VPP, 提出一种能源区块链网络模型, 进而提出一种改进的 VPP 运行与调度模型。通过仿真实验, 对比了该模型与原有的 VPP 运行模式在煤炭消耗、温室气体排放和经济成本等方面的数据。仿真结果表明, 该模型可更好地反映需求侧实时信息, 更有利于 VPP 进行环境友好、信息透明的稳定调度, 也提高了系统的数据安全性和存储安全性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61602422); 河南省科技攻关计划项目(162102310536); 河南省基础与前沿技术研究项目基金(152300410047);

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61602422); The Key Science and Technology Program of Henan Province (162102310536); Natural Science Foundation of Henan Province (152300410047).

**关键词:** 区块链; 虚拟电厂; VPP 模型; 稳定调度; 数据安全

## 0 引言

随着分布式可再生能源的快速发展, 需求侧管理和虚拟电厂(virtual power plant, VPP)已经成为由智能电网向能源互联网迈进的关键因素<sup>[1]</sup>, 其中虚拟电厂是最为重要的技术。虚拟电厂技术是指通过虚拟控制中心将可控负荷、分布式电源(distributed electric resource, DER)和储能系统有机结合起来, 让它们在电网中以特殊电厂的身份参与运行。VPP的每一部分均与控制中心相连, 通过智能电网实现信息双向传送, 对机端潮流、负载端负荷以及储能系统进行统一调度, 以达到降低发电损耗和电网峰值负荷, 优化资源利用, 减少温室气体排放及提高供电可靠性的目的。虚拟发电厂技术可以实现家庭或个体负载将多余电量反哺电网的可能, 并且合理分配周期性分布式电源与可分派分布式电源的工作时间, 有效协调地区电能需求和电力批发市场的电力需求。

就目前来看, 对于虚拟电厂的研究和使用主要集中在欧洲和北美地区, 而各地对于虚拟电厂的定义和运营模式的理解也不尽相同。文献[2]中, 为了允许分布式发电厂(distributed generator, DG)作为虚拟电厂运行, 提出了一种协调控制器技术, 使得无论在任何工作条件下都可以进行电压调节; 在文献[3]中提到了“微网”的概念, 由分布式能源和多个负载组成集成能量系统, 作为与现有公网并联或“孤立”的单个自主电网运行。这与虚拟电厂的概念较为相似, 都是管理和部署分布式能源的一个选择。文献[4]通过提供系统组件间接口来提高 DER

的可见度并使用最优功率流算法来描述虚拟电厂。文献[5]强调了 VPP 在加强分布式发电技术方面的重要性,基于可再生能源,放大了其在电力市场上所具有的价值。文献[6]认为,虚拟电厂可以通过控制和参与需求响应的过程,并借助能量存储系统来保护电力系统,以维持电网的平稳运行。文献[7]将虚拟电厂按功能不同分为两个模块——商业性虚拟电厂(commercial VPP, CVPP)和技术性虚拟电厂(technical VPP, TVPP),其中 CVPP 规划发电计划、负荷预测、实现市场交易等,TVPP 则整合 DER 的输入、提供发电管理、在线优化和协调 DER 等,其运行调度模型如图 1。

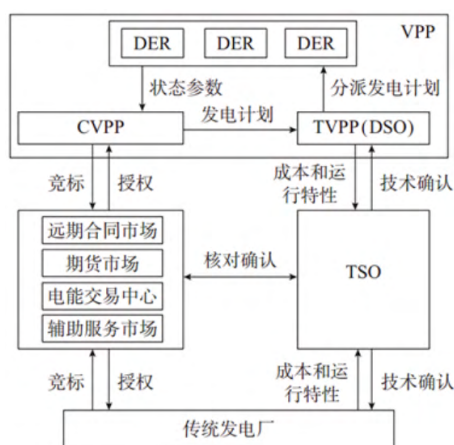


图1 虚拟电厂运行的基本框架

Fig. 1 Basic operating structure of VPP

上述文献对于虚拟电厂的研究和探索有很好的借鉴意义,但也存在的一些的共性问题:

1) 虚拟电厂需要聚合不同区域的分布式能源,因此需要应对绿色能源的随机性、波动性、间歇性的特点,并且由于电力作为一种特殊的商品,它不可储存,必须即产即用,因此在虚拟电厂进行分布式能源的动态组合时很难达到理想的利用率和整体效益。

2) 虚拟电厂作为电力市场的重要组成部分,在参与电力市场交易的过程中有着积极的作用。但目前虚拟电厂中的利益分配机制是不对外界公开的,并且分布式能源和虚拟电厂之间无法形成信息对称的双向选择,使得在电力交易过程中信用成本增加,交易成本较高。

3) 在现有的体系中,虚拟电厂通过双向通信技术来实现发电侧、需求侧、电力交易市场等各个部分的信息与数据的调度。但是缺乏一套针对虚拟电厂信息安全的保障体系,存在关键数据的非授权

获取和恶意篡改风险。

针对以上问题,本文提出一种能源区块链网络模型,并将其引入虚拟电厂的运行调度过程,使得DER可以有效地参与到电力市场交易中,在提高虚拟电厂整体运行效率的同时,也借由区块链自身的密码学特点使虚拟电厂获得了更大程度的信息安全保障。

## 1 区块链技术与虚拟电厂

### 1.1 区块链基本原理

区块链本质上是分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等计算机技术的融合与创新<sup>[8]</sup>。简单来说,区块链是一种由任意多的节点通过密码学方式,以去中心化、去信任化的方式,来集体维护一个可靠数据库的技术方案。区块链的数据结构主要分为两个部分<sup>[9]</sup>: 1) 区块头,主要包含上一个区块的哈希散列值,用来连接前一区块,保证区块链的完整性; 2) 区块主体,包含本区块的主要信息(例如交易信息),这些信息和上一个区块的哈希散列值以及随机数共同构成本区块的哈希散列值。区块链结构如图2所示。

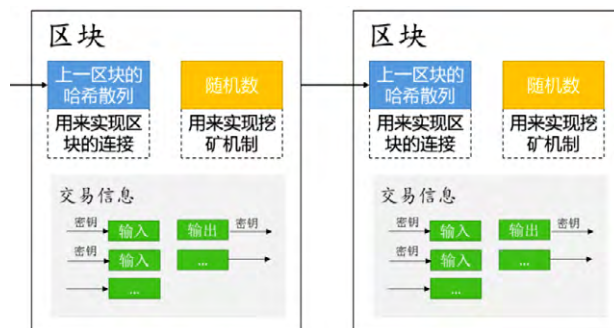


图2 区块链数据结构

Fig. 2 Block chain data structure

区块链的数据结构使得链上每个区块的信息都可以由前驱节点追溯,并影响后继节点的信息构成,由密码学方法保证了恶意攻击无法篡改信息,确保数据的安全性和完整性。

### 1.2 区块链应用于虚拟电厂的可能性分析

由于区块链呈现出的诸多特性,如去中心化、集体维护性、智能合约、安全可信等<sup>[10]</sup>,为分布式能源并网的数据互操作和信息安全问题提供了新的解决方案,也使得区块链技术在虚拟电厂中的应用成为了可能。

1) 去中心化: 在区块链系统中不存在集权的中央控制,所有节点都可以部分或全部地备份区块

链中的信息，任意节点的数据丢失不会影响到系统的正常运行，因此在数据存储上有很强的鲁棒性和可靠性。未来各种分布式能源和分布式电源会越来越多，虚拟电厂以及相关发电资源的交易会变得更加频繁，自适应、去中心化的能源调度将成为主流，与之同构的区块链也将为分布式能源提供强鲁棒性的数据交互基础。

2) 集体维护：区块链系统由网络中所有的节点共同运行和维护，并使用特定的激励机制来保证分布式系统中所有节点均参与信息交换过程。这种运作模式，为同样由众多分布式能源构成的虚拟电厂的运行调度提供了有益参考。

3) 智能合约：区块链系统中交易双方的权利和义务和合约执行的判定是由智能合约保障的。一旦条件满足，交易将自动执行，无需人为的推动以及第三方的监督，这使得交易执行的效率非常高<sup>[8]</sup>。智能合约的可编程特点使得交易双方可以约定各种交易条款，适用于各种程序化规则情境，有着极为广泛的应用场景。在虚拟电厂的运行中，通过智能合约可以保障各节点的交易自动、安全地执行。

4) 信息安全：区块链基于密码学中的椭圆曲线数字签名算法(elliptic curve digital signature algorithm, ECDSA)对数据进行加密，并由全网所有节点共同认证。这种特点可以为虚拟电厂各分布式主体的信息安全提供强有力的保障。

## 2 能源区块链网络

根据 1.2 节的分析和虚拟电厂典型结构，本文提出一种能源区块链网络模型，图形示例如图 3。

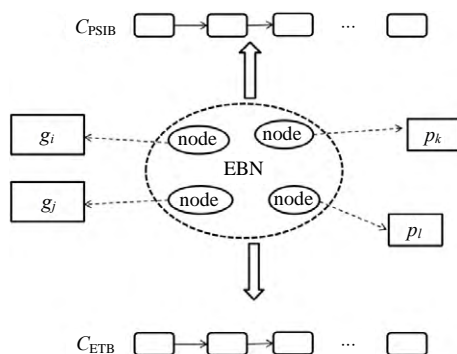


图 3 能源区块链网络(EBN)

Fig. 3 Energy blockchain network

定义 1 能源区块链网络(energy blockchain network, EBN)

EBN 为一个八元组：

$$EBN = (G, P, C_{PSIB}, C_{ETB}, IC, T, \alpha, \beta) \quad (1)$$

式中： $G = \{g_i | i \in N^+\}$  为发电单元的有限集； $P = \{p_j | j \in N^+\}$  为用电单元的有限集； $C_{PSIB}$  为供电索引区块链，见定义 2； $C_{ETB}$  为电力交易区块链，见定义 3； $IC$  为智能合约，见定义 4； $T = \{t_k | t_k \in G \times P, k \in N^+\}$  为电力交易集，其中  $G \times P$  为  $G$  和  $P$  的笛卡尔集； $\alpha: G \rightarrow C_{PSIB}$  为  $G$  到  $C_{PSIB}$  的映射； $\beta: T \rightarrow C_{ETB}$  为  $T$  到  $C_{ETB}$  的映射。

在 EBN 中，所有发电单元(generating unit, GU)和用电单元(power unit, PU)构成 EBN 的节点集，每一个  $g_i$  和  $p_j$  在加入 EBN 时提交自身相关信息，如身份 ID、账户、最大发电额度、能源类型<sup>[11]</sup>(新能源/传统能源)、地理位置等，用于 EBN 的认证并获得特定 ID 作为唯一的身份标识，参与到 EBN 和虚拟电厂运行与调度的协作中，其中供电索引区块链  $C_{PSIB}$  和电力交易区块链  $C_{ETB}$  是全网数据互操作的核心。

定义 2 供电索引区块链(power supply index blockchain, PSIB)

$$C_{PSIB} = (C; PSCA) \quad (2)$$

式中： $C$  为原始区块链； $PSCA$  为供电共识算法(power supply consensus algorithm, PSCA)。PSIB 的数据结构如图 4。

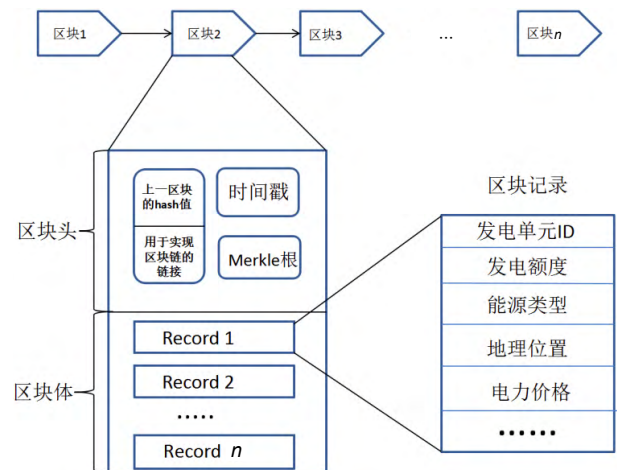


图 4 供电索引区块链

Fig. 4 Power supply index blockchain

由于区块链数据的防篡改性和可追溯性，PU 可根据 PSIB 最新区块中的信息进行搜索，寻找适合的 GU。在构造 PSIB 区块时，本文基于 POS 权益证明方法<sup>[12-14]</sup>提出 PSCA 算法，步骤如下。

1) 所有供电节点向 EBN 全网持续广播供电信息数据，并附上发送者的 ID；

- 2) 所有的节点均独立监听 EBN 全网数据并记录;
- 3) 经过时间间隔  $t$  后,各节点均将自己的信息:  $\langle \text{PerpareRequest}, \text{ID}, m, g, r, s \rangle$ , 发送到 EBN, 其中  $m$  为发电能力,  $g$  表示是否为可再生能源,  $r$  为售电价格,  $s$  为发电稳定程度;
- 4) 各节点根据表 1 自动计算各节点的权值, 并选择出权重最大的节点, 向 EBN 发送该节点的信息:  $\langle \text{PerpareResponse}, \text{ID}, m, g, r, s, w \rangle$ , 其中  $w$  为各特征项的权值累加;

表 1 供电共识权值  
Tab. 1 Weight coefficient of PSCA

特征项	权重	参考值
发电能力 $m$	$w_m$	0.8
绿色能源 $g$	$w_g$	0.6
售电价格 $c$	$w_c$	0.4
发电稳定程度 $s$	$w_s$	0.5

- 5) 任意节点收到超过  $n$  个( $n$  与节点总数有关, 根据系统的容错能力而定)相同的回应信息后, 共识达成并发布新区块;
- 6) 新区块完成后, 各节点将之前的信息删除, 并开始下一轮共识。

在实际应用中, 上述共识算法的特征项和权重可以根据情况而调整。如可以提高绿色能源的权重, 使得更多的电力供应商倾向于向绿色能源方面转型; 或者提高损耗量的权重, 使用户在选择供能单元时尽可能少地使用价格低但消耗大的单元。

定义 3 电力交易区块链 (electricity trading blockchain, ETB)

$$C_{\text{ETB}} = (C; \text{ETCA}) \tag{3}$$

式中:  $C$  为原始区块链;  $\text{ETCA}$  为电力交易共识算法 (electricity trading consensus algorithm, ETCA)。ETB 的数据结构如图 5。

电力交易是虚拟电厂运行过程中非常重要的部分。当 PU 从 PSIB 中获得 GU 信息并形成交易后, 每一笔交易信息都将发送到 EBN, 并在每隔一段时间后将全部交易信息汇总为一个区块, 连接在 ETB 上。在构造 ETB 区块时, 同样基于 POS 权益证明方法<sup>[12-14]</sup>, 提出 ETCA 算法, 步骤如下。

- 1) 参与交易的节点向 EBN 全网持续广播交易信息数据, 并附上发送者的 ID;
- 2) 所有的节点均独立监听 EBN 全网数据并记录;

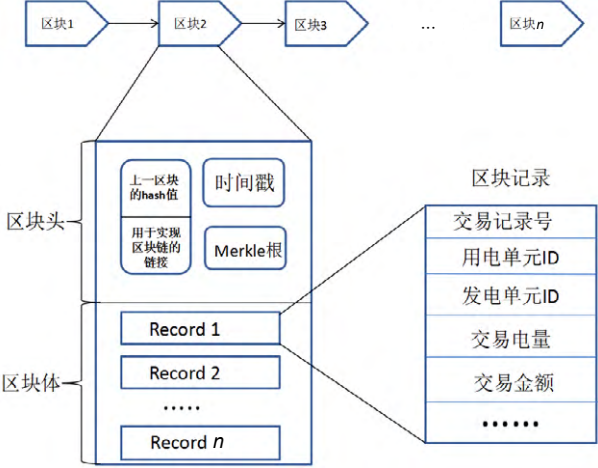


图 5 电力交易区块链

Fig. 5 Electricity trading blockchain

- 3) 经过时间间隔  $t$  后,各节点均将自己的信息:  $\langle \text{PerpareRequest}, \text{PID}, \text{DID}, m, s, l, c \rangle$ , 发送到 EBN 中, 其中 PID 为用电单元 PU 的 ID, DID 为发电单元 GU 的 ID,  $p$  为用电量,  $s$  为负载稳定程度,  $l$  为损耗量,  $c$  为交易价格;

- 4) 各节点根据表 2 自动计算各节点的权值, 并选择出权重最大的节点, 并向 EBN 发送该节点的信息:  $\langle \text{PerpareResponse}, \text{PID}, \text{DID}, m, s, l, c, w \rangle$ ;

表 2 电力交易共识权值  
Tab. 2 Weight coefficient of ETCA

特征项	权重	参考值
用电量 $m$	$w_m$	0.5
负载稳定程度 $s$	$w_s$	0.6
损耗量 $l$	$w_l$	0.4
交易价格 $c$	$w_c$	0.8

- 5) 任意节点收到超过  $n$  个( $n$  与节点总数有关, 根据系统的容错能力而定)相同的回应信息后, 共识达成并发布新区块。
- 6) 新区块完成后, 各节点将之前的信息删除, 并开始下一轮共识。

定义 4 智能合约 (intelligent contract, IC)

EBN 的智能合约 IC 蕴含以下数量关系:

$$I = \text{Min}[(M \cdot P) \cdot PS \cdot (1 - G)] \tag{4}$$

式中:  $I$  为为了使模型达到环境友好的发电计划, 综合权衡各方面的因素之后得到的最优值;  $M$  为某种能源类型 (如风电、水电) 的发电量;  $P$  为该能源类型发电的价格;  $PS$  为该能源类型发电的稳定程度;  $G$  为对应的环保指数。在这项智能合约中, 发电侧的稳定性  $PS$  不得小于用电稳定性需求  $LS$ , 否则应排除该发电类型。该合约可根据具体的环境和



社会需求不同而调整。

### 3 基于 EBN 的 VPP 运行调度改进模型

根据 EBN 网络及相应算法,本文在文献[7]基础上,提出一种改进的虚拟电厂运行与调度模型(EBN based virtual power plant,EBN-VPP),如图 6。

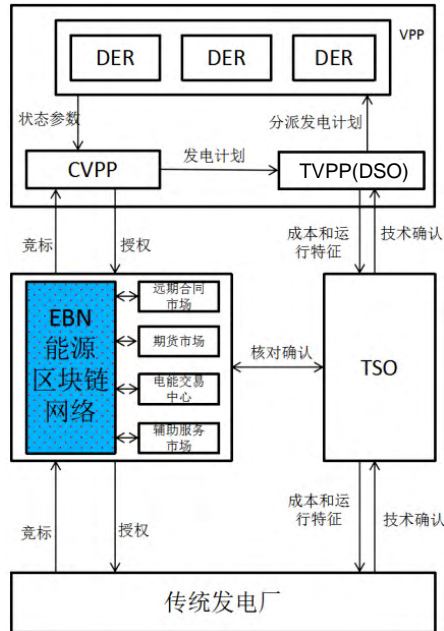


图 6 改进的虚拟电厂模型

Fig. 6 Improved mode of VPP

EBN-VPP 模型在 CVPP 与传统发电厂的竞标和授权过程中,融入了能源区块链网络 EBN,使得 EBN 成为整个虚拟电厂的信息交互和数据存储中心,有效地将区块链在数据存储、信息安全、数据互操作性中的优势引入到虚拟电厂中。此外,通过 EBN 中 PSIB 和 ETB 的区块信息进行虚拟电厂的自适应调度和运行,可以有效弥补文献[7]中虚拟电厂模型在整体运行效率和信息安全保障方面的不足。

EBN-VPP 的运行过程主要分为 4 部分,如图 7 所示。具体说明如下:

1) 首先参与到 VPP 系统的各个 PU 将各自的用电需求信息提交到交易市场;或者通过智能电表将该 PU 之前的用电信息自动上传,通过交易市场的辅助服务将用电信息经过计算而形成科学的用电需求,再提交到交易市场。进而形成一个初步的发电计划。

2) 各交易市场中的供电单元 GU 将自己的信息发布至 EBN 网络,通过 PSCA 算法形成供电索引区块链 PSIB,使得发电计划中的各个 PU 都可以根据 PSIB 中的区块信息寻找适合自己的供电单元

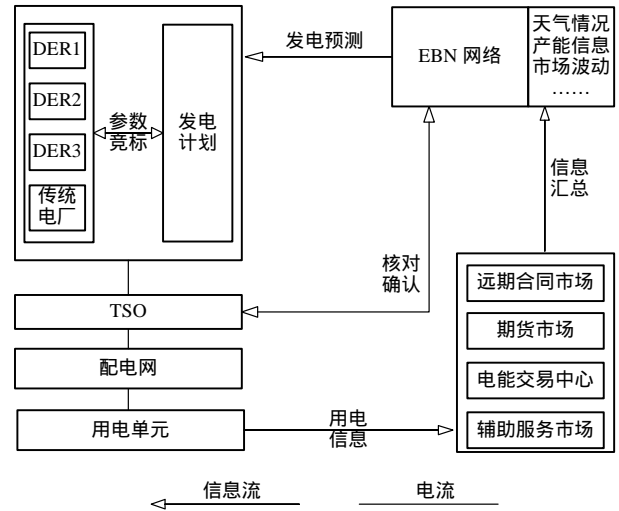


图 7 EBN-VPP 运行过程

Fig. 7 EBN-VPP operational process

GU。为了提高 PSIB 和发电计划的准确性,需要不断丰富发电计划中包含的信息(天气状况、用电单位性质、市场波动等),同时不断优化和改善 PSCA 算法。

3) 在生成了 PSIB 形成之后,发电计划中的各 PU 开始进行选择。在选择过程中综合考虑具体的用电场景以及各发电单元的性质和参数,制定一个智能合约,通过智能合约可以根据不同的情形确定各个 PU 的供电子集,从而达到不同的交易结果。具体内容见第 4 节的算例。

4) 在发电计划匹配成功后,各 GU 完成自己的发电任务,通过 TSO 进行电力配送,最终将电能信息输送到相应的 PU。同时,TSO 与 EBN 网络不断进行信息的审核确认,以保证每一笔用电交易都准确完成。在此过程中,形成电力交易区块链 ETB。

通过上述 EBN-VPP 的运行过程可知,EBN-VPP 较之文献 7 中的 VPP 模型(如图 1),较好地解决了 1.1 节中提到的 3 个共性问题。主要体现在:

1) 可实时反映需求侧信息:电力与其他产品(包括实体产品和虚拟产品)最大的不同点是,电力是一种能量,它存在于各种能量之间的转换,即生产和消耗的电能必须守恒<sup>[15]</sup>,无法在电网中暂存。EBN-VPP 通过 EBN 中的 ETB 区块,可实时获取用电需求量,并根据该需求量制定 GU 的发电计划,并适时调整各 GU 单元,尤其是使用非可再生能源 GU 的电力生产指标,避免无效的产能。

2) 可根据海量数据进行环境友好的发电计划调整:EBN-VPP 中的能源区块链网络将在运行过程中积累大量可靠数据,并可将其用于能源需求的

预测,便于 DER 和传统发电厂进行发电调整。虽然 DER 和传统电厂都属于 GU,但由于能源类型不同,从环境保护角度则更加倾向于使用 DER 的清洁能源,EBN-VPP 通过 EBN 中的智能合约,可形成清洁能源的选择偏好,减少非可再生能源的使用。

3) 更有利于虚拟电厂的信息透明和稳定调度:由于电的瞬时交换特性和 VPP 中不同 GU 的发电特点和发电成本,其售电价格必然随时波动。除了在电力技术上需要解决的系统稳定分析、频率控制、负荷预测、需求响应等各种电网系统的问题,信息的透明、公平性、不可篡改性也将为 VPP 的稳定调度带来运筹博弈上的支持。因为,准确透明的电力交易信息必将影响 PU 的分时用电需求,在预期综合成本最低的诉求下,EBN 的融入将帮助 VPP 改善能源需求的“削峰填谷”过程,更加有利于 VPP 进行能源调度。

4) 确保数据安全和存储安全:EBN-VPP 中的数据均可通过 EBN 中的区块数据加密方法实施保护,并由全网所有节点共同认证;同时,由于去中心化机制,EBN 中的节点均部分或全部地备份了链中全部信息,杜绝了中心化数据服务的失效隐患。

5) 在 EBN-VPP 框架中,EBN 网络并不决定和影响具体的电能交易过程,而是扮演一个信息汇集整合的中转站和服务提供商的角色,将所有 GU 和 PU 之间的信息壁垒打通,使得双方可以完成去中心化的直接电能交易,从而降低了交易中的信用成本。

4 对比分析

4.1 仿真实验

为了验证 EBN-VPP 模型的相关特点,本文使用 Matlab 构建了调度仿真程序,并以两个能源调度过程为例进行仿真实验和对比分析。

设一组供电单元集和用电单元集分别如表 3 和表 4 所示。其中每个单元都作为能源区块链网络

表 3 供电侧节点

Tab. 3 Power generation side					
发电侧能源类型	单元代号	$M$	$PS$	$P$	$G$
光伏发电	$P_1-P_5$	20	0.6	3.3	0.6
风力发电	$W_1-W_6$	10	0.5	0.5	0.9
水力发电	$H_1$	800	0.8	0.4	0.7
火力发电	$T_1$	1000	0.9	0.3	0.2

表 4 用电侧节点

Tab. 4 Power consumption side		
用电侧负载类型	使用场景	$LS$
UPS 电源	医院、网络中心	0.8
普通负载	家用电器	0.6
分布式储能	电动车充电桩	0.5

EBN 的一个节点,参与到 EBN-VPP 的运行中。其中, $M$  为发电量, MW;  $PS$  为发电稳定程度;  $P$  为度电成本,元/(kW·h);  $G$  为环保程度;  $LS$  为负载稳定程度需求。

具体算例如下。

算例 1: 设用电侧节点 A 的使用场景为医疗用电,其用电总需求为 1000MW,对于发电稳定要求较高(0.8 以上),负载属于 UPS 电源。在仿真程序中,上述各发电单元将自身的各项参数指标发布至 EBN 网络,通过 PSCA 算法形成供电索引区块链 PSIB1。根据网络的智能合约 IC 确定用电节点 A 的供电子集,经 ETCA 算法形成新的电力交易区块 ETB1。算例 1 的仿真结果如表 5 所示。

表 5 算例 1 的 EBN 仿真结果

Tab. 5 Simulation Result of EBN in Sample 1		
选择的供电单元	能源类型	该类型提供电能/MW
$T_1$	火力发电	130
$H_1$	水力发电	800

算例 2: 设用电侧节点 B 的使用场景为工厂,主要业务是提供电动车充电桩服务,其用电总需求为 100MW,负载属于分布式储能类型。上述各发电单元将各项参数指标发布至 EBN 网络,通过 PSCA 算法形成供电索引区块链 PSIB2。根据网络的智能合约 IC 确定用电节点 B 的供电子集,经 ETCA 算法形成新的电力交易区块 ETB2。算例 2 的仿真结果如表 6 所示。

表 6 算例 2 的 EBN 仿真结果

Tab. 6 Simulation Result of EBN in Sample 2		
选择的供电单元	能源类型	该类型提供电能/MW
$P_1、P_2$	光伏发电	40
$W_1、W_2、W_3、W_4、W_5、W_6$	风力发电	60

算例 1、2 中的能源调度过程如图 8。其中,UPS 节点为算例 1 中的医疗用电场景,DES 节点为算例 2 中的分布式储能场景。

4.2 实验对比

根据测算,火电站每生产一度电平均消耗 400g 原煤。则在算例 1 中,根据表 3 可计算文献 7 的

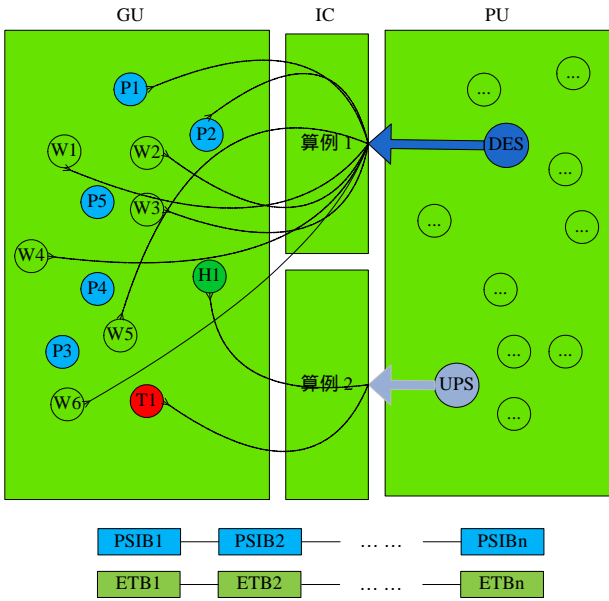


图 8 EBN-VPP 能源调度过程

Fig. 8 EBN-VPP energy schedule process

VPP 模型与 EBN-VPP 模型的各项指标对比，如表 7 所示。

表 7 能耗/价格对比

Tab. 7 The energy consumption contrast

电厂类型	发电量/MW	原煤消/kg	CO <sub>2</sub> 产生量/kg	发电成本/(元/h)
VPP	930	0~1.14×10 <sup>5</sup>	0~2.99×10 <sup>5</sup>	2.79×10 <sup>5</sup>
EBN-VPP	930	0~2.88×10 <sup>4</sup>	0~5.98×10 <sup>4</sup>	3.59×10 <sup>5</sup>

由表 7 可知，在同样满足发电量和稳定性的要求下，EBN-VPP 消耗的原煤量更少，造成的污染更小。虽然需要付出更高成本，但更符合国家能源发展“十三五”规划中提高绿色能源使用率、加快能源结构转型的要求<sup>[16]</sup>。

接下来，分析算例 2 中的情形。目前光伏发电的度电成本较高，而风力发电度电成本相对较低，根据表 3 可计算算例 2 中两种 VPP 的发电成本对比，如表 8 所示。

表 8 成本对比

Tab. 8 The cost comparison

电厂类型	发电量/MW	发电成本/(元/h)
VPP(光伏发电)	100	3.3×10 <sup>5</sup>
EBN-VPP	100	1.72×10 <sup>4</sup>

从对比结果中可以看出，在电动车充电桩的场景中，文献 7 的 VPP 模型只使用一种能源供电，在 EBN-VPP 网络中将根据智能合约优化选择策略，更加合理地选择总体成本更低的发电单元组合。

4.3 安全性分析

在本文实验中，电力交易的各方都作为分布式

的节点存在于能源区块链网络 EBN 中。根据 1.2 节中对于区块链可应用于能源互联网的特点分析可知，相比其他虚拟电厂模型，EBN-VPP 的安全性体现在如下两方面：

1) EBN-VPP 中，EBN 网络将交易信息汇集形成了动态的发电计划，该发电计划由所有的 GU 通过智能合约进行分配，使得各分布式能源对于整个系统的贡献值是公开透明的。同时，根据不同的外界环境和社会需求，可以动态调整智能合约的参数，以达到不同的竞争效果(节能、经济、稳定等)，使 EBN-VPP 可实时响应外部环境变化，各类能源可良性消纳，从而达到系统运行的安全性。

2) EBN-VPP 网络是一种去中心化的网络，所有的交易信息由全部节点进行验证和分析，并最终形成 PSIB 和 ETB 两条区块链。在此过程中，由椭圆曲线数字签名算法对数据进行加密，从而保障数据的安全交换和安全存储。同时，由于网络节点的共同维护特性，使得交易信息不会由于部分节点的失效而丢失。

5 结论

本文针对于现有的虚拟电厂模型中的 3 类共性问题，提出一种能源区块链网络模型 EBN，进而提出了一种改进的虚拟电厂运行与调度模型 EBN-VPP。仿真实验和对比分析表明，该模型可更好地实时反映需求侧信息，更有利于 VPP 进行环境友好、信息透明的稳定调度；同时，藉由区块链的自身特点，也能更好地确保数据安全和存储安全。

但该模型也存在几点需要完善之处：1) 现有的各种共识算法如 POW、POS、DPOS、Paxos、PBFT 等，大多用于金融交易，并不特别适合电力网络的运行环境，模型中的 PSCA、ETCA 算法均改写自 POS，因此也有待改进；2) EBN 与远期合同市场、期货市场的接驳及数据处理方式尚未进行测试和实验，还有待今后进一步研究。

参考文献

[1] 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(in Chinese).

- [2] Bignucolo F, Caldon R, Prandoni V, et al. The voltage control on MV distribution networks with aggregated DG units (VPP)[C]//Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference. Gateshead, UK: IEEE, 2006: 187-192.
- [3] Asmus P. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future[J]. The Electricity Journal, 2010, 23(10): 72-82.
- [4] Pudjianto D, Ramsay C, Strbac G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 10-16.
- [5] Pinto T, Vale Z A, Morais H, et al. Multi-agent based electricity market simulator with VPP: conceptual and implementation issues[C]//Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-9.
- [6] Su C L, Chung H M, Wei C Y, et al. Optimal VPP operation strategy in liberalized electricity markets[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Rome, Italy: IEEE, 2015: 478-481.
- [7] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.  
Wei Zhinong, Yu Shuang, Sun Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9(in Chinese).
- [8] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.  
Yuan Yong, Wang Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494(in Chinese).
- [9] 申万宏源研究所. 区块链: 颠覆式创新——区块链和数字货币系列报告之二[R]. 上海: 申万宏源研究所, 2016: 1-35.  
SWS Research. Block chaining technology: disruptive innovation——Block chain and digital currency series report (two)[R]. Shanghai: SWS Research, 2016: 1-35(in Chinese).
- [10] 中国区块链技术和产业发展论坛. 中国区块链技术和应用发展白皮书(2016)[R]. 中国区块链技术和产业发展论坛, 2016: 1-65.  
China Blockchain Technology and Industrial Development Forum. Chinese block chain technology and application development white paper[R]. China Blockchain Technology and Industrial Development Forum, 2016, 1-65(in Chinese).
- [11] 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): 4011-4022(in Chinese).
- 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): 4011-4022(in Chinese).
- [12] Watanabe H, Fujimura S, Nakadaira A. Blockchain contract: Securing a blockchain applied to smart contracts[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016: 467-468.
- [13] 颜拥, 赵俊华, 文福拴, 等. 能源系统中的区块链: 概念、应用与展望[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 12-20.  
Yan Yong, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Blockchain in energy systems: concept, application and prospect[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 12-20(in Chinese).
- [14] 范捷, 易乐天, 舒继武. 拜占庭系统技术研究综述[J]. 软件学报, 2013, 24(6): 1346-1360.  
Fan Jie, Yi Letian, Shu Jiwu. Research on the technologies of byzantine system[J]. Journal of Software, 2013, 24(6): 1346-1360(in Chinese).
- [15] Tang Quan, Xu Weiting, Shen Li, et al. Urban energy internet: concept and key technology[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Shanghai, China: IEEE, 2016: 318-323.
- [16] 国家能源局. 能源发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2016: 1-45.  
National Energy Board. The thirteenth five-year energy development planning[R]. Beijing: National Energy Board, 2016: 1-45(in Chinese).



余维

收稿日期: 2017-02-28。

作者简介:

余维(1977), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为复杂系统建模、Petri 网理论、软件工程, wshe@zzu.edu.cn;

胡跃(1993), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为能源互联网、信息安全, 1014491645@qq.com;

杨晓宇(1993), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为能源互联网、信息安全, 254644988@qq.com;

高山(1977), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为数据挖掘、个性化推荐, 152540513@qq.com;

刘炜(1981), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为网络性能优化、网络安全, 本文通讯作者, wliu@zzu.edu.cn。

(编辑 乔宝榆)