

基于区块链的虚拟电厂模型研究

邵炜晖¹ 许维胜^{1,2} 徐志宇¹ 王宁¹ 农静³

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)¹ (同济大学信息化办公室 上海 200092)²

(贵州电网有限责任公司电网规划研究中心 贵阳 550003)³

摘要 新能源技术和互联网技术推动了电力系统由智能电网向能源互联网进化,未来能源互联网将以分布式能源作为主要的一次能源。虚拟电厂技术能够聚合分布式能源并建立虚拟电力资源交易,逐步成为分布式能源高渗透情况下的核心并网技术。针对以实时电价为驱动的未来能源互联网,结合区块链这一安全、透明、去中心化的分布式计算范式,建立基于区块链的虚拟电厂模型,通过区块链的激励机制将虚拟电厂协调控制手段和分布式能源独立并网行为有机联动,从而实现高效的分布式调度计算。仿真实验表明,所提模型满足能源互联网中分布式能源高渗透率、高自由度、高交易频率、高响应速度的并网需求。

关键词 区块链,能源互联网,虚拟电厂,实时电价,分布式计算

中图分类号 TM734 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.02.005

Study on Virtual Power Plant Model Based on Blockchain

SHAO Wei-hui¹ XU Wei-sheng^{1,2} XU Zhi-yu¹ WANG Ning¹ NONG Jing³

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)¹

(Informatization Office, Tongji University, Shanghai 200092, China)²

(Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China)³

Abstract The power system is evolving from Smart Grid to Energy Internet with the development of new energy technologies and Internet technologies. Distributed energy resources will become the main primary energy in the future Energy Internet. In this situation, virtual power plant technology plays an important role in the convergence of distributed power generation resources and the establishment of virtual power resource transactions. As a new distributed computing paradigm, blockchain has the characteristics of security, transparency and decentralization. This paper proposed a blockchain based virtual power plant model for the future Energy Internet driven by real-time electricity price. The coordinated control method of virtual power plant and the independent grid connected behavior of distributed energy resources are organically linked by the incentive mechanism of blockchain, so as to realize the distributed dispatching calculation of virtual power plant. Simulation results show that the proposed model meets the grid-connected requirements of high penetration, high freedom, high frequency and high speed of distributed energy resources in the future Energy Internet.

Keywords Blockchain, Energy Internet, Virtual power plant, Real-time pricing, Distributed computation

1 引言

以新能源技术和互联网技术为代表的第三次工业革命正在兴起,其推动了电网由智能电网向能源互联网进化^[1]。未来能源互联网以分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)为主要的二次能源^[2]。DER是针对传统集中式供电系统,将冷、热、电系统以小规模、小容量、模块化、分散式的方式

直接安装在用户端,既可独立运行,也可并网运行的能源供应方式。它主要包括分布式电源(Distributed Generation, DG)、分布式储能(Distributed Energy Storage, DES)、可控负荷(Dispatchable Load, DL)、电动汽车(Electric Vehicle, EV)、冷热电三联供(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)等^[3]。DER具有能效高、损耗小、污染少、运行灵活、经济性好等特点,其并网有助于促进能源系统可持续、多样化发展,

到稿日期:2017-11-01 返修日期:2018-01-09 本文受国家自然科学基金项目(71401125,71540022,61773292),高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130072110045),中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20160635)资助。

邵炜晖(1988—),男,博士生,主要研究方向为能源互联网下需求侧响应、虚拟电厂等,E-mail:shaoweihui@126.com;许维胜(1966—),男,教授,主要研究方向为应急管理、智能电网、大数据应用等,E-mail:xuweisheng@tongji.edu.cn(通信作者);徐志宇(1982—),男,高级工程师,主要研究方向为先进控制策略在电力市场中的应用、信息融合理论等;王宁(1992—),男,博士生,主要研究方向为能源互联网架构、超网络理论等;农静(1973—),女,高级工程师,主要研究方向为电力系统新技术和电网规划等。

但同时也给电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战:分布式能源对当前电力系统通常是“不可见”或“不可控”的,当配电网中的分布式能源容量达到较高比例(高渗透率)时,要实现配电网的功率平衡与安全运行并保证供电可靠性和电能质量具有很大难度^[4-5]。

经过数十年的探索研究,逐渐形成了微电网(Micro Grid, MG)和虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)两种不同的 DER 并网技术体系^[6]。MG 是通过电力电子技术将分布式电源、储能设备、能量转换设备、控制与保护设备及负荷组成小型发电系统,其优点在于能够保证重要用户的电力供应不间断,提高供电可靠性,减少馈线损耗,但存在一定的物理局限性。而 VPP 则不受地理位置的约束,其通过网络通信、智能计量、数据处理、智能决策等先进技术协调管理所辖区域内的集中式、分布式能源参与电力市场和电力系统的运行。研究报告显示,2014 年全球 VPP 总容量已达 4.8GW,预计 2023 年将达到 28GW^[7];而全球 VPP 市场预计从 2016 年的 1.915 亿美元增至 2023 年的 11.875 亿美元,年复合增长率达到 30.3%^[8]。可见,无论是装机容量还是市场总量,VPP 均已进入飞速发展阶段,成为分布式能源高渗透情况下智能电网的核心并网技术体系,未来有望促进智能电网向能源互联网深化发展。

VPP 聚合多样化的 DER 进行协调控制并调度,以满足电力系统的电能需求。其中,协调控制技术是 VPP 的关键技术。现阶段在电力市场环境, VPP 协调控制 DER 的约束力源自事先协议, DER 被动接受调度指令。而未来能源互联网以 DER 为主要的二次能源,在实时电价的驱动下, DER 并网行为高度渗透且高度自由。在这种情境下, VPP 既要满足海量的 DER 实时参与电力市场逐利,又要有效控制 DER 并网行为以确保电力系统安全、可靠地运行,其协调控制技术从机制设计到技术实现均具有较大难度。区块链技术的飞速发展及其在经济、金融和社会系统中的成功应用为解决上述问题提供了新的研究思路。

区块链技术(Blockchain)起源于 2008 年由化名“中本聪”的学者发表的奠基性论文《Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system》^[9],它是一种利用块链式数据结构来验证与存储数据,利用分布式节点共识算法来生成和更新数据,利用密码学的方式保证数据传输和访问的安全,利用由自动化脚本代码组成的智能合约来编程和操作数据的全新分布式基础架构与计算范式^[10]。区块链技术凭借其透明性、去中心化、安全性等特点将被广泛应用于经济、金融和社会系统中,同时在能源互联网领域亦有广阔的应用前景,少数国外研究机构已开始进行探索与实践。例如,欧盟 Scanergy 项目拟基于区块链技术实现小用户绿色能源的直接交易^[11];美国能源公司 LO3 Energy 与比特币开发公司 Consensus Systems 合作建立不依赖于电能生产者和消费者外第三方的自由能源交易平台^[12]等。

综合上述研究背景及现状,本文基于区块链技术设计了一种虚拟电厂模型,该模型通过区块链激励机制将 VPP 协调控制手段和 DER 独立并网行为有机联动,在确保电力系统安全、可靠地运行的基础上,实现 DER 的高渗透、高自由、高频率、高速度并网,为能源互联网大规模利用分布式能源提供了

理论支持。本文第 2 节从区块链、DER 并网、VPP 优化调度等方面详细阐述了所提模型;第 3 节介绍了该模型最优调度计划求解算法和基于区块链的分布式计算算法;第 4 节基于 IEEE-118 标准测试系统进行仿真实验,验证所提模型及算法的有效性;最后总结全文。

2 系统模型

基于区块链的 VPP 模型的架构如图 1 所示。对于 VPP 所辖区域内的用户级小规模分布式能源(Small Scale Distributed Energy Resources, SS DER),以地理位置为约束,通过电力电子技术构成区域微电网(Regional Micro Grid, RMG)统一参与并网;对于 VPP 所辖区域内的 RMG 和大规模分布式能源(Large Scale Distributed Energy Resources, LS DER),通过 VPP 协调控制并网。该 VPP 模型的并网规则为:VPP 基于区块链诱导 DER 参与分布式计算并予以激励, RMG 和 LS DER 通过所得激励优化自身并网行为, SS DER 通过所得激励获取并网资源。下文将从区块链模型、DER 并网模型、VPP 优化调度模型等方面详细阐述基于区块链的 VPP 系统。

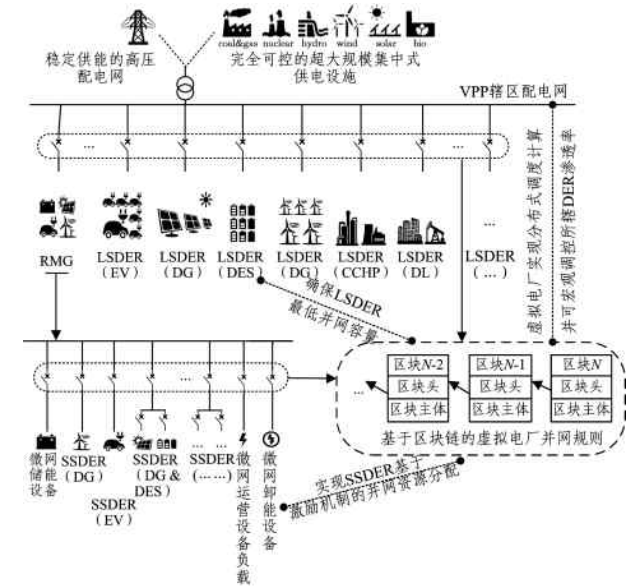


图 1 基于区块链的 VPP 模型

Fig. 1 VPP model based on blockchain

2.1 区块链模型

区块链可分为公有区块链(Public Block Chain)、行业区块链(Consortium Block Chain)和私有区块链(Private Block Chain) 3 类^[13]。其中:公有区块链是开放生态的交易网络,所有节点互不信任,任何节点都可以发送交易,参与共识过程,获得区块链确认;私有区块链是封闭生态的存储网络,所有节点均可信任,使用区块链总账技术进行记账,由某一节点独享该区块链的写入权限。VPP 在协调控制 DER 并网时,为保障电力系统安全、可靠地运行,需要足够的权限协调、诱导、控制各 DER 的并网行为,具有中心化的节点特性;各 DER 参与分布式计算并获取激励时, DER 之间、VPP 与 DER 间均存在信任问题,此时又需要一个去中心化平台来确保公平。针对该问题的特殊性,本文设计的区块链是一种兼具私有链和公有链特性的半中心化区块链。

该区块链的私有链特性体现在 VPP 作为中心节点独自

享有区块链的发布权和记账权。区块链的发布权包括新区块计算任务及相应激励的发布权。新区块的计算任务由 VPP 根据最优调度计划求解算法的计算需求向 DER 发布,相应激励为 VPP 发行的虚拟货币(Virtual Power Plant Coin, VPP-Coin)。VPP-Coin 的单位价值设计为额定的强制并网容量,DER 可通过 VPP-Coin 兑换强制并网容量来优化并网策略,并最大化自身收益。VPP-Coin 的发行数量由 VPP 根据当前市场保有量决定,VPP 以此诱导 DER 并网行为,以保证电力系统安全、经济地运行。区块链的记账权包括 VPP-Coin 交易数据和区块技术数据的记账权。交易数据记账是指分布式计算开始前,DER 以 VPP-Coin 向 VPP 兑换强制并网容量所产生的交易数据并由 VPP 记入区块链。区块技术数据记账是指分布式计算开始后,发现新区块的共识过程所产生的技术数据并由 VPP 记入区块链,作为该区块的激励分配依据。为降低区块链的复杂程度,本文设计的区块链只支持 VPP 与 DER 间的 VPP-Coin 交易,禁止 DER 间的自发交易。

该区块链的公有链特性体现为所有 DER 按 POW 共识机制享有新区块相应的激励,中心节点 VPP 无权干涉。DER 通过完成 VPP 发布的计算任务而贡献算力来发现新区块,经过 POW 共识机制确认其工作量后,获得该区块所包含的 VPP-Coin 激励。

区块链的形成过程如图 2 所示。第 N 电价周期开始前,VPP 根据前序区块链及其回购 VPP-Coin 的交易信息生成新的区块,并实时发布后序区块链的计算任务(下一电价周期的

调度计算);DER 通过 POW 共识机制发现新区块并获得该区块的初始记账权;当前电价周期内的分布式计算完成后,VPP 根据当前 VPP-Coin 的市场保有量向区块链中获得初始记账权的 DER 发布相应的 VPP-Coin 作为激励。第 N 电价周期开始后,VPP 根据分布式计算所得的最优调度计划协调控制各 DER 并网。

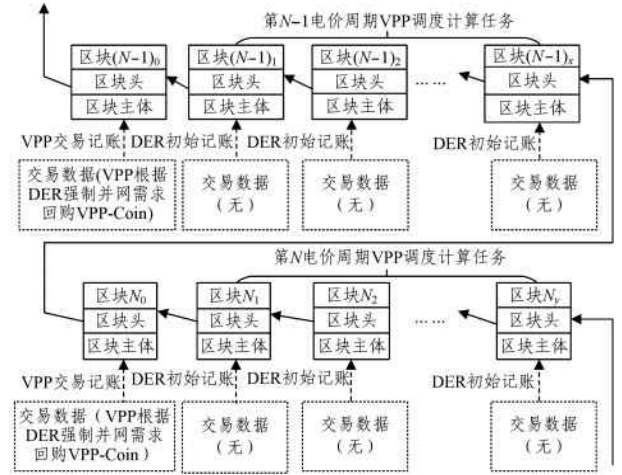


图 2 区块链的形成过程

Fig. 2 Construction process of blockchain

综合本文所设计的区块链模型,将其与比特币进行对比,比较结果如表 1 所列。

表 1 Bitcoin 与 VPP-Coin 的对比

Table1 Comparison of Bitcoin and VPP-Coin

项目	Bitcoin	VPP-Coin
设计目的	实现从中心机构信用背书机制向去中心化的算法信用机制的货币体系变革	实现分布式计算,优化 DER 并网行为,提高分布式能源利用率
价值属性	世界范围内流通,可购买商品或服务,可兑换法定货币,具有货币属性	VPP 所辖区域内流通,仅可兑换强制并网容量,无货币属性
交易情况	无交易限制,具有金融衍生品涨跌机制	DER 间禁止交易以降低区块链的复杂度
算力计算	分布式节点算力相互竞争,共同解决一个求解复杂、验证容易的 SHA256 数学难题,保证数据一致性和共识安全性,但造成了计算资源的极大浪费	分布式节点算力独自解决一个随机的潮流计算问题,求解和验证的复杂度相同,分布式节点信任中心节点,可避免大量计算资源的浪费
数据传播	全网广播,确保区块链的透明性	VPP 记账时全网广播,其余过程点对点单播,分布式节点信任中心节点
共识机制	POW 机制,全网验证工作量证明,安全性高但共识过程的代价较高	改进的 POW 机制,灵活验证工作量证明,最大程度地节约计算资源
激励机制	发币数量递减,交易过程产生手续费作为激励奖励给记账者	发币数量由 VPP 根据市场保有量决定,有助于宏观调控 DER 并网行为

2.2 DER 并网模型

假设电力市场发布的实时电价周期为 T ,电价更新间隔为 Δt 。 t_k 时刻开始前,电力市场发布了实时电价序列 $price(t_k, n)$,其中 t_k 至 $t_k + \Delta t$ 时段内的并网参考电价 $p_o(t_k, 1)$ 为该区域内无 DER 并网时的成本电价。各 DER 根据 $p_o(t_k, 1)$ 制定相应的并网策略。

1)SSDER

SSDER 根据 $p_o(t_k, 1)$ 和当前 RMG 储能设备容量决策 t_k 至 $t_k + \Delta t$ 时段内的并网容量同,并与其所属的 RMG 签订并网合约。合约约定:SSDER j 在 t_k 至 $t_k + \Delta t$ 时段由 RMG 代理并网,并网容量上限为 $p(j, t_k)$;SSDER 认可 RMG 的并网策略,结算时根据 VPP 发布的最优调度计划按 SSDER 贡献 VPP-Coin 的比例进行结算。

2)RMG 和 LSDER

RMG 和 LSDER 的并网策略包括强制并网和竞标并网两部分。

强制并网(Forced)是指 DER k 以 VPP-Coin 兑换强制并网容量,VPP 确保满足其强制并网需求的并网模式。强制并网容量的交易电价约定为 t_k 至 $t_k + \Delta t$ 时段 VPP 的实际成本电价,记为 $\bar{\lambda}$ 。DER k 的强制并网容量 FQ_k 如式(1)所示,DER k 的强制并网收益 $\phi_k(FQ_k)$ 如式(2)所示,其中 $Q_{VPP-Coin}$ 为单位 VPP-Coin 的等值并网容量, $VPP-Coin_k$ 为 DER k 的当前兑换数量。

$$FQ_k = Q_{VPP-Coin} \cdot VPP-Coin_k \quad (1)$$

$$\phi_k(FQ_k) = \bar{\lambda} \cdot FQ_k \cdot \Delta t \quad (2)$$

竞标并网(Bidding)是指 DER k 提出价格-出力竞标曲线, VPP 以此决策其并网容量及电价的并网模式, 竞标并网容量与强制并网容量独立。DER k 竞标并网曲线一般可表示为式(3), 其中 BQ_k 为竞标并网容量, $\varphi_k(BQ_k)$ 为 LSDER k 的收益, $BQ_{k \min}$ 为并网容量下限, $BQ_{k \max}$ 为并网容量上限, m_k 和 n_k 为 DER k 的竞标参数。

$$\varphi_k(BQ_k) = \begin{cases} m_k \cdot BQ_k \cdot \Delta t + n_k, & BQ_k \in [BQ_{k \min}, BQ_{k \max}] \\ 0, & BQ_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.3 VPP 优化调度模型

VPP 根据当前所辖区域内的电能需求、各 DER 并网竞标策略来建立最优调度计划求解模型。本文参考商业型 VPP(Commercial VPP, CVPP) 和技术型 VPP(Technical VPP, TVPP) 中常用的优化目标来建立最优调度计划求解模型, 如式(4)~式(6)所示。

$$Cost_1 = \varphi_0(Q_0) + C + \sum_k \varphi_k(BQ_k) \quad (4)$$

$$Cost_2 = \frac{1}{2} \sum \frac{(U_i - U_i')^2}{R_{ii'}} \quad (5)$$

$$Cost_3 = \sqrt{\sum \frac{(U_i - U_0)^2}{n}} \quad (6)$$

式(4)为 CVPP 较关注的运营成本函数。其中, Q_0 为集中式供电设施向 VPP 供能的容量; $\varphi_0(Q_0)$ 为相应成本; $\sum_k \varphi_k(BQ_k)$ 为各 DER 参与并网的收益之和; C 为 VPP 通信、计算等固定运营成本, 等效为常数。式(5)为 CVPP 和 TVPP 均较关注的 VPP 辖区电网有功网络损耗函数。其中, $U_i - U_i'$ 为支路电压差, $R_{ii'}$ 为支路阻抗。式(6)为 TVPP 较关注的电压偏离程度函数。其中, U_i 为节点电压, U_0 为参考节点电压, 该函数可用于描述稳态电能质量。上述公式中的 Q_0, U_i, U_0 等参数均可通过 VPP 辖区内的电力系统潮流计算求得。

基于模糊隶属度理论对上述多个目标进行归一化。各目标函数 $Cost_i$ 的隶属度函数 $A(Cost_i)$ 如式(7)所示, $A(Cost_i)$ 越趋近于 0, $Cost_i$ 越接近最优值(最小值)。归一化后的目标函数 $Cost$ 为各目标隶属度函数的最大值, 如式(8)所示。求解 $Cost$ 的最小值可使 $Cost_1, Cost_2, Cost_3$ 都均衡地接近最优值。

$$A(Cost_i) = \frac{Cost_i - Cost_{i \min}}{Cost_{i \max} - Cost_{i \min}} \quad (7)$$

$$Cost = \max(A(Cost_1), A(Cost_2), A(Cost_3)) \quad (8)$$

VPP 求解最优调度计划时还需满足物理条件约束。式(9)为供需平衡约束, 其中 $\sum LQ$ 为电力系统总负载容量(Load); 式(10)为支路容量约束, 其中, $p_{k \max}$ 为 LSDER k 并网支路容量的上限。

$$Q_0 + \sum_k BQ_k > \sum LQ \quad (9)$$

$$BQ_k \leq p_{k \max} \quad (10)$$

3 算法设计

3.1 VPP 最优调度计划求解算法

求解 VPP 最优调度计划属于 NP-hard 问题, 本文针对模型采用多起始点变邻域下降法(Multi Start and Variable Neighborhood Descent, MS-VND)与局部搜索(Local Search, LS)相结合的算法进行求解。采用整数编码(0~100)表征 RMG 及 LSDER 并网出力百分比, 随机生成若干组初始解作

为起始点, 分别对各初始解进行变邻域搜索以求得较优解, 并对其局部搜索进行进一步优化。该算法的伪代码如图 3 所示。

```
//MS_VND+LS 算法
begin
  Generate Initial; Optimal = Initial;
  N = N_multi_start // 起始点个数
  while N != 0
    Generate Initial;
    Current = VND(Initial); // 变邻域下降算法
    if Current < Optimal
      Optimal = Current;
    Endif
    N = N - 1;
  endwhile
  Optimal = LS(Optimal); // 局部搜索算法
end
```

图 3 MS-VND+LS 算法伪代码

Fig. 3 Pseudo code of MS-VND+LS algorithm

该算法的核心部分为变邻域下降算法(Variable Neighborhood Descent, VND)。VND 算法是一种变邻域搜索算法(Variable Neighborhood Search, VNS), 由 Mladenovic 和 Hansen 提出^[14], 其主要思想是针对问题模型及编码方式设计一系列半径不同的邻域搜索算子并优化各邻域搜索顺序, 对初始解进行变邻域贪婪搜索, 其流程图如图 4 所示。其中 k 为邻域内的搜索次数, 邻域 j 的终止条件为解经过 $K_{\max}(j)$ 次搜索后无改进, $K_{\max}(j)$ 随邻域大小自适应变化且满足式(11)。其中, $N(j)$ 表示邻域 j 的可行解总数, 直接反映该邻域大小; N_{\min} 为最小邻域的可行解总数; K 为常数, 表示最小邻域 N_{\min} 的终止搜索次数。

$$K_{\max}(j) = K \cdot \frac{N_{\min}}{N(j)} \quad (11)$$

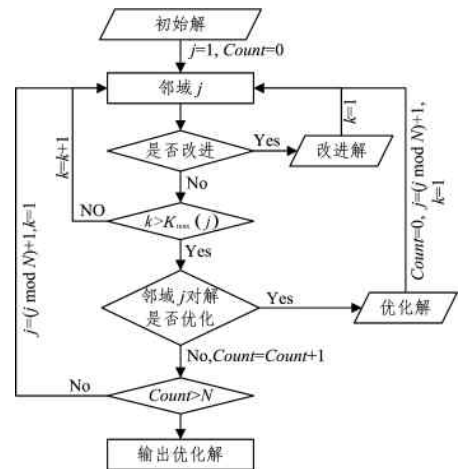


图 4 VND 算法的流程图

Fig. 4 Flowchart of VND algorithm

对初始解(即 LSDER 并网出力百分比序列)进行邻域算子迭代, 若迭代后的目标函数值优于当前最优目标函数值, 则以迭代后的序列代替当前最优序列。若在当前邻域内经过 $K_{\max}(j)$ 次迭代后无改进, 则以当前最优序列为初始解进入下一邻域搜索。当所有邻域均无法对当前最优解进行优化时,

VND 算法终止。结合 LSDER 并网可行性及计算代价评估等因素设计了包括平移算子、递增(减)算子、变异算子等的邻域算子,变邻域下降搜索的顺序按邻域大小由大至小排序,并通过局部最优跳出机制确保算法的搜索深度及广度。

当 VPP 规模较大时,VND 算法邻域半径设置偏小将导致计算成本大幅增加,而邻域半径设置偏大则容易使算法陷入局部最优。因此,对由多起始点变邻域下降法求得的较优解进行局部搜索,从而进一步优化解的质量。

3.2 基于区块链的分布式计算算法

在 3.1 节中算法根据一定的搜索策略提出可行解,通过电力系统潮流计算评价该可行解的质量。仿真发现,电力系统潮流计算作为该算法的基本计算单元,所占计算资源达 99%,因此分布式计算可通过 DER 并行计算不同可行解的潮流计算来实现,其具体流程如图 5 所示。

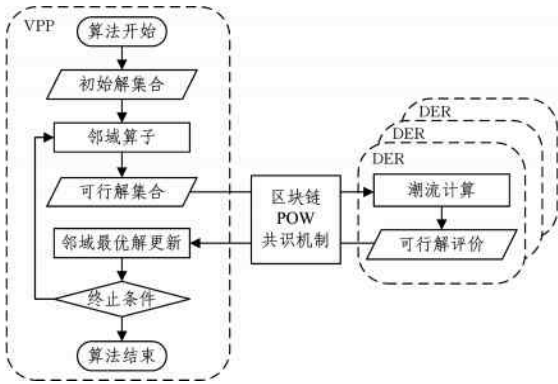


图 5 分布式计算算法的流程图

Fig. 5 Flowchart of distributed computing algorithm

本文所设计的区块链中,VPP 与 DER 间、DER 与 DER 间均存在信任问题,DER 可能为了获取更多的 VPP-Coin 而提供虚假的工作量证明,也可能因计算误差提供错误的工作量证明,因此 VPP 需对 DER 提供的工作量证明进行验证。验证方式主要有直接验证和间接验证两种。直接验证指 DER 直接将工作量证明反馈至 VPP,并由其进行验证,验证通过后获得该区块的写入权。由于电力系统潮流计算的特殊性,VPP 完全验证计算结果的准确性将耗费大量计算资源和时间,代价巨大,此时所设计的分布式计算也失去意义。间接验证指 DER 将工作量证明广播至全体 DER,并由一定数量的第三方 DER 进行验证,验证通过后获得该区块的写入权。进行第三方验证时,若预设的第三方节点数量较少,可有效提高计算速度,但出现拜占庭将军问题(Byzantine Generals Problem)的概率较高(工作量证明发布者与验证者可能串通起来欺骗 VPP 和其余 DER);当预设的第三方数量较多时,出现拜占庭将军问题的概率较低,但对过多算力进行重复验证将严重影响计算速度。针对上述问题,本文设计了一种改进 POW 共识机制,如图 6 所示。

在最优调度计划求解算法某一邻域的搜索过程中,将尚未进行潮流计算或已经进行潮流计算但未完成验证的待评价可行解集合记为 X ,集合 X 中的待评价可行解的数量记为 $Count$,DER 完成可行解 X_j 的潮流计算或验证后反馈至 VPP 的工作量证明集合记为 $F(X_j)$ 。图 6 中 DER 和 VPP 对不同激励的响应如下:

D_1 :DER i 算力空闲,向 VPP 提出潮流计算申请。

D_2 :DER i 完成对可行解 X_j 的潮流计算,向 VPP 提交该潮流计算的工作量证明,记为 $F(X_j, i)$ 。

V_1 :VPP 向所有 DER 广播该阶段分布式计算开始,算力空闲的 DER 可提出潮流计算申请。

V_2 :VPP 向申请潮流计算的 DER i 随机发布待评价可行解 X_j 进行计算或验证。 X_j 需满足条件“集合 $F(X_j)$ 中不包含 $F(X_j, i)$ ”,即 DER i 未参与过可行解 X_j 的相关计算。

V_3 :VPP 根据 DER i 提交的工作量证明 $F(X_j, i)$ 更新待评价的可行解集合 X 。当集合 $F(X_j)$ 中的工作量证明数量大于 1 且超过半数的工作量证明(潮流计算结果)在相同精确度下一致时认为该可行解 X_j 得到正确评价,并更新 X 及 $Count$ 。

V_4 :当前阶段的分布式计算完成,VPP 按 $F(X_j)$ 内容维护当前区块链并向各 DER 广播,各 DER 待命等待下一阶段 V_1 。

该 POW 共识机制采用了改进的间接验证方式验证工作量证明。与传统区块链通过向系统节点广播寻求验证工作量证明不同, V_2 中 VPP 与 DER 间的数据通信采用单播方式,由 VPP 随机分配潮流计算,使得 DER 间的信息不对等。在这种情况下,VPP 对区块链生成具有一定的导向作用,既可有效解决“拜占庭将军问题”,又可避免区块链发生分叉情况。考虑到潮流计算不易验证的特征, V_3 中 VPP 随机向多个不相关的 DER 分配同一可行解潮流计算,通过验证潮流计算结果一致性的方式来验证工作量证明,某一可行解最少仅需两次计算即可完成评价,这既确保了分布式计算的准确性,又能最大程度地节约计算资源。

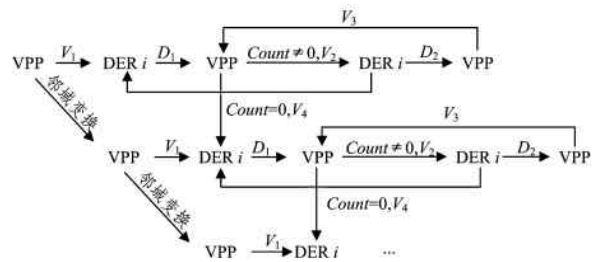


图 6 改进的 POW 共识机制

Fig. 6 Improved POW consensus mechanism

4 仿真实验

4.1 仿真条件

如图 7 所示,以 IEEE-118 标准测试系统模拟某区域电力系统,标准测试系统的节点负载参数、线路拓扑参数不做详细介绍。

仿真假设 IEEE-118 标准测试系统中节点 69(平衡节点)为某发电总容量为 1500MW 的可控火力发电厂,其 $t_k - \Delta t$ 到 t_k 时段内的实际发电容量为 594.226MW,发电成本函数请参考文献[15]。在 t_k 到 $t_k + \Delta t$ 时段,通过潮流计算可得该区域只由该火电厂集中供能时的容量 Q_0 为 1298.358 MW,发电成本为 54477 美元,因此下一时段的并网电价参考值 $p_0(t_k, 1)$ 为 41.96 美元/MW · h。

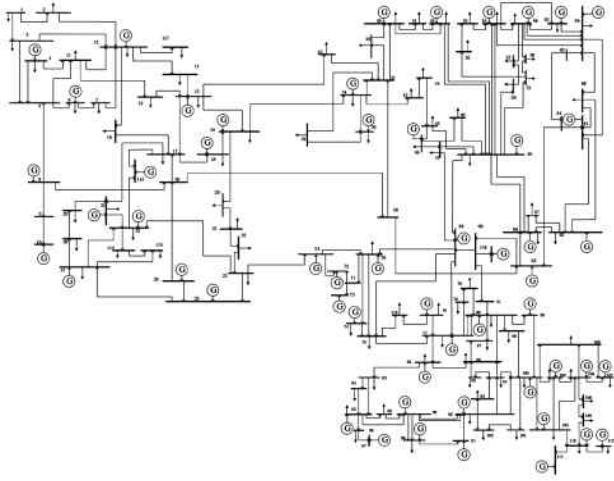


图7 IEEE-118标准测试系统的拓扑结构图

Fig.7 Topology of IEEE-118 standard test system

假设该电力系统中在 67 个节点处有 DER 参与并网,各 DER 并网策略的相关数据如表 2 所列。

表 2 DER 并网数据/MW

Table 2 DER grid-connected data/MW

DER 节点	强制并网容量	竞标并网容量下限	竞标并网容量上限	竞标策略 m	竞标策略 n
6	1.031	3.21	4.469	55.67	-57.12
8	0.748	2.89	6.482	18.04	97.32
9	1.048	2.87	5.562	34.45	50.33
10	0.851	2.82	5.209	26.62	64.89
13	0.831	3.05	3.699	57.03	-27.22
17	0.481	2.31	3.889	63.75	-49.42
20	0.676	2.58	3.364	70.97	-97.56
21	1.425	2.36	7.185	46.19	-27.52
24	0.832	2.93	6.138	52.21	-24.56
25	1.221	2.96	5.039	45.93	-17.93
28	0.773	3.22	4.257	37.12	22.84
29	0.531	2.86	4.319	63.49	-59.33
34	1.038	2.83	5.512	43.06	-4.96
37	0.958	2.03	6.612	56.97	-42.83
39	0.537	3.68	3.773	116.23	-287.80
41	0.795	1.97	4.755	60.66	-57.26
42	0.643	4.08	5.277	56.46	-54.07
45	0.744	2.67	3.266	80.92	-120.70
46	1.006	2.43	5.834	22.81	69.41
48	0.783	3.28	4.807	45.43	-11.77
49	1.376	3.66	6.534	63.92	-114.40
50	0.635	3.49	4.975	71.08	-105.30
51	0.999	3.23	5.411	42.37	29.46
52	0.871	2.98	3.989	63.14	-76.06
53	0.834	2.62	4.546	51.55	-28.83
54	0.617	2.95	4.213	48.56	0.62
55	1.172	2.98	5.218	57.22	-42.32
56	0.734	3.03	6.566	63.20	-85.65
57	0.901	3.43	4.509	36.76	33.13
58	0.694	2.70	5.746	43.83	5.84
60	0.747	3.55	4.753	89.63	-206.10
62	1.028	3.07	5.072	39.31	39.01
64	0.740	2.32	6.460	61.13	-63.48
65	0.92	3.32	5.200	47.62	7.48
67	0.627	3.47	4.333	75.42	-114.90
70	0.524	2.29	4.616	54.93	-45.16
72	1.013	2.92	4.817	71.95	-115.00
73	0.926	3.44	4.884	32.51	61.76
74	0.863	2.64	4.267	71.68	-99.56
78	0.725	2.99	5.455	60.08	-81.23
79	1.406	2.68	5.864	53.72	-58.23
80	0.618	2.41	5.132	32.96	35.40
81	0.710	2.93	5.090	33.80	53.88

(续表)

DER 节点	强制并网容量	竞标并网容量下限	竞标并网容量上限	竞标策略 m	竞标策略 n
83	0.475	2.15	3.325	70.16	-78.61
84	0.612	2.79	4.618	20.74	59.19
85	0.662	2.99	3.948	40.12	-19.83
86	0.778	2.93	4.832	69.91	-100.90
87	0.864	3.17	5.666	69.73	-118.10
88	1.087	2.61	6.433	42.11	8.29
90	0.844	3.67	6.956	52.30	-65.49
93	0.682	3.11	5.198	11.88	124.60
95	0.854	3.80	4.826	26.44	92.13
96	0.909	1.93	5.911	41.46	9.28
98	0.982	2.53	5.508	40.83	-19.55
99	1.276	3.11	5.494	68.05	-108.20
100	0.945	2.45	5.835	50.66	-31.39
101	0.847	3.42	3.673	24.10	57.43
102	1.073	1.75	5.467	50.84	-28.81
104	0.743	2.58	5.167	31.80	43.85
105	1.042	3.54	4.198	90.41	-202.50
108	0.790	2.42	4.520	41.50	1.74
110	1.181	3.18	6.099	45.33	-7.28
111	0.755	3.51	4.435	29.43	71.59
114	0.867	3.81	3.893	73.49	-137.30
115	1.130	2.82	5.080	46.49	5.05
116	1.075	4.13	6.935	51.86	-18.22
117	0.731	2.76	5.299	69.00	-101.50

4.2 结果分析

同等条件下,分别对区域内无 DER 并网情形(仿真 1)、采用普通虚拟电厂模型协调控制 DER 并网情形(仿真 2)、采用基于区块链的虚拟电厂模型协调控制 DER 并网情形(仿真 3)进行仿真实验,实验结果如表 3 所列。

表 3 仿真实验结果对比

Table 3 Comparison of simulated experimental results

指标	仿真 1	仿真 2	仿真 3
集中式供能容量/MW	1298.358	979.91	958.626
集中式供能成本/美元	54477.08	24939.62	23442.55
DER 中标总容量/MW	-	279.994	241.05
DER 强制并网容量/MW	-	-	57.836
DER 并网总容量/MW	-	279.994	298.886
VPP 应标成本/美元	-	12608.55	10694.17
总运营成本/美元	54477.08	37548.17	35782.44
有功网络损耗/MW	104.208	65.752	63.359
电压偏离值	0.021562	0.021366	0.021395
平均成本电价/美元	41.96	29.80	28.45

仿真 2 和仿真 3 综合考虑了运营成本、有功损耗和电压偏差程度进行多目标优化。仿真 2 较仿真 1 的运营成本降低了 31.08%,有功损耗减少了 36.9%,电压偏差降低了 0.9%;仿真 3 较仿真 1 的运营成本降低了 34.32%,有功损耗减少了 39.2%,电压偏差降低了 0.8%;仿真 2 和仿真 3 中的 3 项指标较集中式发电情况均有明显改善。由此可见,分布式供能模式较集中式供能模式可有效降低发电成本,减少电力系统网络损耗,提高电能质量。

从 VPP 角度对比仿真 2 和仿真 3 的实验结果。在 VPP 安全经济运行指标方面,仿真 3 较仿真 2 的集中式供能容量下降了 2.172%,相应成本降低了 6.003%;DER 并网总容量上升了 13.909%,达到 DER 并网容量需求的 75.05%;VPP 运营成本降低了 4.703%,相应平均成本电价降低了 4.53%,有功网络损耗降低了 3.64%,但电压偏离程度升高了 0.136%。总体来说,除电能质量稍有下降外,其余指标均有明显改善。在分布式计算效率方面,仿真 2 的实验程序采用 Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU @ 3.30 GHz 处理器基于

Matlab 编程实现,最优调度计划的计算时间为 8892.9 s,其中用于潮流计算的时间为 8879.8 s;仿真 3 在同样的实验环境下通过程序实现了基于区块链的分布式计算,最优调度计划计算累计耗时 17801.1 s。忽略节点间的通信耗时,当设置 10 个计算节点时最优调度计划计算时间约为 1780 s;当所有 67 节点均参与区块计算时最优调度计划计算时间约为 265.7 s;当 RMG 内部的大量 SS DER 参与区块计算时,最优调度计划调度时间将更短。

从 DER 的角度对比仿真 2 和仿真 3 的实验结果(见图 8、图 9)。仿真 3 较仿真 2 中的多数 DER 并网容量增加,部分 DER 因强制并网电价低于自身平均中标电价导致收益降低。但从长远来看,DER 能及时出清并网容量,降低了未来时段出现弃风弃光情况的概率,提高了可再生能源的利用率。

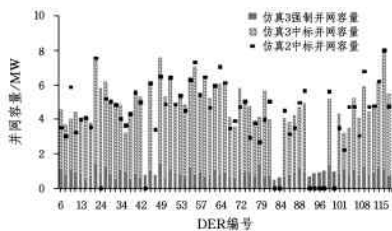


图 8 仿真 2 和仿真 3 并网容量的对比

Fig. 8 Comparison of grid-connected capacities in simulation 2 and simulation 3

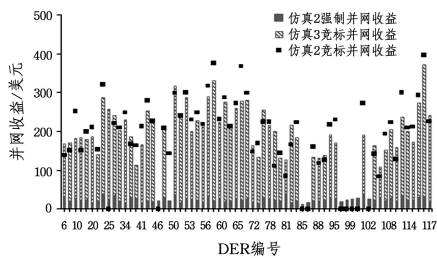


图 9 仿真 2 和仿真 3 并网收益的对比

Fig. 9 Comparison of grid-connected gains in simulation 2 and simulation 3

综上所述,基于区块链的虚拟电厂模型既可实现分布式计算,减小 VPP 调度计算负担,也可通过 DER 强制并网机制优化 DER 并网行为,提高 VPP 综合指标和分布式能源利用率。

结束语 本文针对未来能源互联网分布式能源大规模并网问题,基于区块链技术设计了一种虚拟电厂模型协调控制分布式能源并网。模型通过区块链激励机制将虚拟电厂协调控制手段和分布式能源独立并网行为有机联动,使分布式能源拓展参与虚拟电厂竞标并网结构,提高了虚拟电厂最优调度的计算效率。仿真实验表明,本文所设计的虚拟电厂模型可在确保电力系统安全可靠运行的基础上,实现分布式能源高渗透、高自由、高频率、高速度并网。下一步将深入研究虚拟电厂通过发布区块链激励宏观调控分布式能源并网行为的作用机理和规律,并在模型中引入节点交易机制,实现分布式能源在能源互联网中自由进行能量交互的设想。

参考文献

[1] RIFKIN J. The third industrial revolution; how lateral power is

transforming energy, the economy, and the world[J]. Survival, 2011, 2(2): 67-68.

- [2] DONG Z Y, ZHAO J H, WEN F S, et al. From Smart Grid to Energy Internet: Basic Concept and Research Framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11. (in Chinese)
董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [3] KIENY C, BERSENEFF B, HADJSAID N, et al. On the concept and the interest of virtual power plant: Some results from the European project Fenix [C]// Power & Energy Society General Meeting. IEEE Press, 2009: 1-6.
- [4] WANG C S, LI P. Development and Challenges of Distributed Generation, the Micro-grid and Smart Distribution System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14. (in Chinese)
王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [5] BARKER P P, DE MELLO R W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems [C]// Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE Xplore, 2000: 1645-1656.
- [6] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. A review on operation of micro grids and Virtual Power Plants in the power markets [C]// International Conference on Adaptive Science & Technology, 2009: 273-277.
- [7] RESEARCH N. Capacity of Virtual Power Plants Worldwide is Expected to More than Quintuple by 2023 [EB/OL]. <https://www.navigantresearch.com/newsroom/capacity-of-virtual-power-plants-worldwide-is-expected-to-more-than-quintuple-by-2023>.
- [8] RESEARCH P S M. Global Virtual Power Plant Market Size, Share, Development, Growth and Demand Forecast to 2023 [EB/OL]. <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/virtual-power-plant-market>.
- [9] NAKAMOTO S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [EB/OL]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [10] SWAN M. Blockchain: Blueprint for a New Economy [M]. New York: O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [11] CRYPTONEWL. An energy blockchain for European prosumers [EB/OL]. <https://bitcoinmagazine.com/articles/an-energy-blockchain-for-european-prosumers-1462218142>.
- [12] NGUYEN C. An indie, off-the-grid, blockchain-traded solar power market comes to brooklyn [EB/OL]. <http://motherboard.vice.com/read/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar>.
- [13] 张健. 区块链: 定义未来金融与经济新格局 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [14] HANSEN P. Variable neighborhood search [M]. Holland: Elsevier Science Ltd., 1997.
- [15] GUTIÉRREZ-ALCARAZ G, SHEBLÉ G B. Generation companies decision-making modeling by linear control theory [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(7): 815-827.