

文章编号:1005-2542(2019)06-1134-09

基于区块链的能源电力供需网调度优化模型

胡 伟, 姚文慧

(上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090)

【摘要】针对传统电力调度过程中难以调控能源、易产生网络损耗等缺陷,提出基于区块链的能源电力供需网调度优化模型。结合区块链的去中心化、可信任、交易透明化的特性,建立能源电力供需网模型;利用区块链激励机制,实现能源电力供需网协调控制分布式能源独立并网的行为;在此基础上,根据运营成本最低、有功损耗最小等目标函数建立调度优化模型,运用协作型协同进化算法(CCEA)对模型进行求解,并通过区块链的 POW 共识机制,安排能源电力供需网各节点进行分布式计算,实现调度方案的二次验证与优化。算例结果表明,与传统的电力能源调度模型相比,本文所提出的方法可使总运营成本降低 9.9%,有功网络损耗降低 3.5%,日负荷方差等因素也有所改善,提高了电力系统的稳定性,为优化能源电力调度问题提供决策支持和理论支撑。

关键词:区块链; 能源电力供需网; 调度优化; 激励机制; POW 共识机制

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1005-2542.2019.06.014

Optimization Model of Energy Power Supply and Demand Network Dispatching Based on Blockchain

HU Wei, YAO Wenhui

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

【Abstract】Aiming at the difficulties in regulating energy and easily generating network loss in the traditional power dispatching process, a blockchain-based energy and power supply network scheduling optimization model is proposed. Based on the characteristics of decentralization, trustworthiness and transaction transparency of blockchain, the model of energy supply and demand network is established. Besides, the blockchain incentive mechanism is used to realize the coordinated control of distributed energy independent grid connection. Moreover, a scheduling optimization model is established based on the objective function with the lowest operating cost and the least active loss, and the collaborative co-evolutionary algorithm (CCEA) is used to solve the model. Furthermore, the energy supply and demand network is arranged through the POW consensus mechanism of the blockchain while the nodes perform distributed computing to achieve secondary verification and optimization of the scheduling scheme. The results of the example show that compared with the traditional power energy dispatching model, the proposed method can reduce the total operating cost by 9.9%, the active network loss by 3.5%, and improve the variance of daily load, which stabilizes the power system, providing decision support and theoretical support for optimizing energy and power dispatching problem.

Key words: blockchain; energy and power supply and demand network; scheduling optimization; incentive mechanism; POW consensus mechanism

收稿日期:2019-02-14 修订日期:2019-03-29

基金项目:国家社会科学基金资助项目(19BGL003)

作者简介:胡 伟(1979-),男,博士(后),副教授。研究方向为能源区块链及能源电力优化决策等。E-mail:hwshiep@shiep.edu.cn

随着电能生产价格的不断下降以及政策层面的有力支持,分布式能源(DER)正得到越来越广泛的应用^[1]。分布式能源是指分布在用户端的能源综合利用系统,既可独立运行,也可并网运行,系统将电力、热力、制冷与蓄能技术结合,以直接满足用户多种需求,实现能源梯级利用,并通过公用能源供应系统提供支持和补充。分布式能源的调度对电力系统安全可靠、稳定高效的运行有着直接影响,是保证电力资源优化配置的基础。因此,设计高效可靠的调度优化方案具有重要的理论与现实意义。

能源电力调度工作是电网管理的常规性工作,传统的能源电力调度管理中缺乏完善的问责机制,电力调度系统复杂,在管理过程中容易出现管理漏洞,造成严重的安全隐患问题。在联合调度模式下易产生安全性管理不统一的问题,在系统调度模式下机构的监控能力不强。同时,在调度过程中,由于系统运营成本较高,从而产生较大的损耗,影响电能传输效率。

区块链是分布式数据存储、点对点传输、共识机制和加密算法等计算机技术的新型应用模式^[2],起源于《比特币:一种点对点的电子现金系统》一文中^[5]。区块链本质上是一个去中心化的数据库,同时作为比特币的底层技术,是一串使用密码学方法相关联产生的数据块,每一个数据块中包含了一次比特币网络交易的信息,用于验证其信息的有效性和生成下一个区块。区块链技术的激励机制、共识机制以及去中心化的特性为能源电力调度优化问题提供了研究方向和参考依据。

目前,国内外学者从多个方面对能源区块链的调度优化问题进行了研究。文献[3]中考虑储能单元约束、潮流约束和系统总成本等条件,提出了一种基于交替方向乘子法(ADMM)、投影梯度法和平均一致性的全分布式算法求解最优调度计划;文献[4]中结合并行智能技术建立了一种新的并行调度模式,并根据电力系统运行目标提出最优调度策略,以实现复杂电网的安全运行;文献[9]中对分布式发电调度模式分层调度结构进行了研究,该结构有效提升了电网对分散分布式发电的接纳能力;文献[11]中提出一个机会约束的经济调度模型,通过在模型中运用 PSAA 框架,有效地整合了储能系统和高渗透率可再生能源;文献[12]中基于区块链技术、分布式文件服务技术以及分布式电力系统分析与管理技术,形成一个分布式自主的电力能源运行系统,促成稳定、可靠、有效的电力能源生产、传输与消费;文献[13]中将区块链技术应用到大用户直购电中,从市

场准入、交易、结算和物理约束 4 个方面说明了区块链技术如何实际应用于大用户直购电。上述文献对协调控制系统内的分布式能源具有积极的作用,也为进一步优化电力系统中的能源调度方案提供了参考和借鉴。在总结现有研究成果的基础上,发现还存在如下两个方面的问题:① 研究主要集中在构建分布式调度模型方面,缺少对系统安全性的考虑;② 以区块链为基础构建的调度模型,大都只是理论阐释,没有具体描述区块链技术与电力调度的结合。

基于上述考虑,本文结合区块链技术构建了能源电力供需网调度优化模型。利用区块链激励机制,实现能源电力供需网协调控制分布式能源并网的功能。在考虑成本、网损等目标函数的条件下建立能源调度优化模型,通过 CCEA 算法对最优调度方案进行求解,采用 POW 共识机制验证所求最优调度方案,实现低成本、高效率的能源调度,提高电力系统的安全性。算例结果表明,结合区块链技术能够有效降低调度成本,减少损耗,提高电能质量。

1 区块链与能源电力供需网

基于区块链的能源电力供需网模型的结构如图 1 所示,在能源电力供需网中,根据地理位置将用户端小型分布式能源组成微型能源局域网,大型分布式能源在系统中与微型能源局域网并行。系统中每一个分布式能源单元都可以看作是供需节点,当分布式能源单元内电能供大于求时,该节点为供给节点;当分布式能源单元内电能供小于求时,该节点为需求节点。系统内电能需求得到满足后,在能源电力供需网的协调控制下,将供给节点中多余的电能统一并网。

能源电力供需网引入区块链的公有链和私有链特性。公有链特性表现为所有节点均通过 POW 共识机制验证最优调度计划并获得激励。私有链特性体现在并网时,调控中心起主导作用,独享区块链的发布权和记账权,利用区块链的激励机制诱导各部门参与分布式计算,各部门可通过激励优化自身并网行为。在能源电力供需网中,用户端小型分布式能源与所属微型能源局域网签署智能合约,由微型能源局域网代理并网。发放激励时,为解决各分布式能源节点与调控中心的信任问题,引入区块链的智能合约机制,建立去中心化的平台。

由于区块链采用了链式结构和时间戳,每一个区块都是按照时间顺序首尾连接而成,故区块链上的数据不可篡改但可追溯。各节点将每隔一段时间收集的数据上传到新生成的空区块中,同时链接到

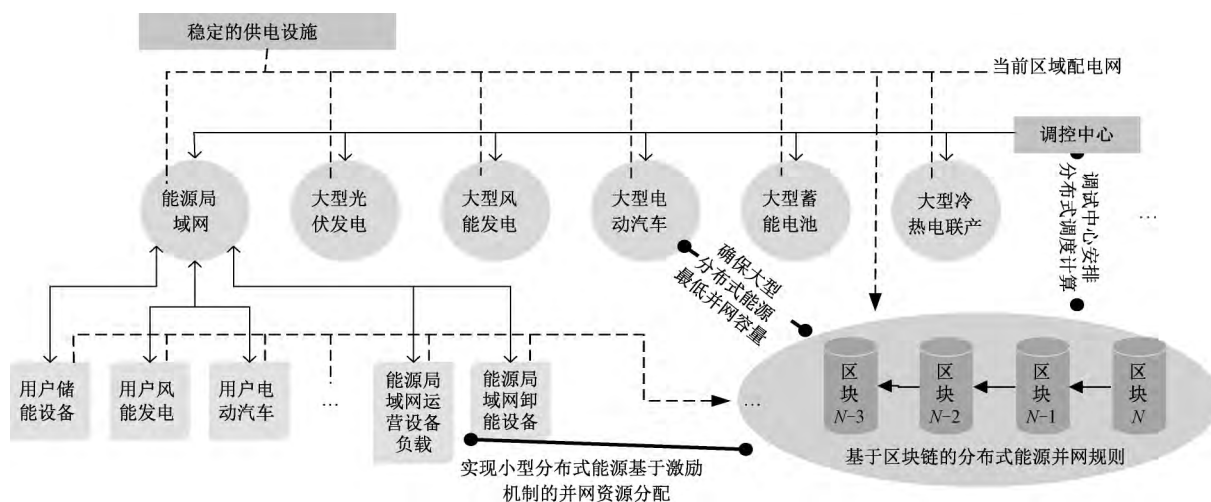


图1 区块链与能源电力供需网体系

最长的区块链上。区块头和区块体构成了新生成的区块,区块的具体布局如图2所示。区块头部分包括当前区块的版本号、前一区块的信息、时间戳、Merkle根以及该时段对应的电力交互容量。区块体部分则主要包括智能合约中的交易信息。

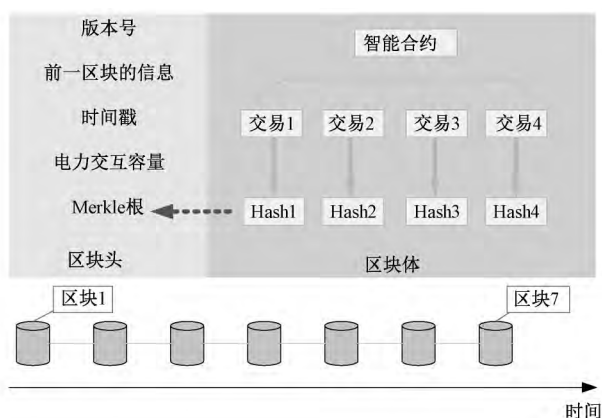


图2 区块布局

由于在供需网中应用的区块链都被视为重要节点,故智能合约的所有交易信息和与之相关的加密信息都会保存在区块体中。最底层的哈希值分支与各个交易一一对应,保证了交易数据的真实性和保密性。

2 能源电力供需网调度优化模型

2.1 激励机制

激励机制是在组织系统中,激励主体系统运用多种激励手段并使之规范化和相对固定化,而与激励客体相互作用、相互制约的结构、方式、关系及演变规律的总和。在区块链中,激励机制具有重要作用,当发布一项算力任务时,联盟节点会努力计算,期望获得对应的激励,这种可预期的行为是信任产

生的基础。因此,区块链的可信任与区块链节点行为的可预期相关,而行为的可预期则与激励机制相关,这一优点在比特币的流通实践中也得到了体现。

能源电力供需网是一个半中心化的系统,调控中心仍然具有中心化的节点特性,协调控制各分布式能源并网,保证电力系统的安全性和可靠性;调控中心作为中心节点独享区块链的发布权,发布新区块的计算任务以及相应激励,新区块的计算任务指的是对最优调度计划的求解,相应激励指的是调控中心发行的虚拟货币($D\text{-coin}$), $D\text{-coin}$ 的价值为对应于工作量的并网优先权,分布式能源可利用 $D\text{-coin}$ 优化并网,提高自身收益。在本文中,只关注调控中心与分布式能源间的 $D\text{-coin}$ 交易,禁止分布式能源间的自行交易。

2.2 协调控制与独立并网联动

结合区块链技术有助于实现分布式能源的协调控制与独立并网联动,图3所示为区块链的形成过程。第 N 个电能需求时段开始前,调控中心首先对各分布式能源节点支付的激励进行结算,然后在新建的区块链中发布下一电能需求时段的调度计算任务,各分布式能源节点通过POW共识机制发现新区块并获得记账权;当前电能需求时段计算完成后,调控中心根据当前 $D\text{-coin}$ 的市场保有量将激励分配给拥有记账权的节点。第 N 个电能需求时段开始后,调控中心根据计算所得的最优调度计划协调控制各分布式能源节点参与并网。

在能源电力供需网中,首先由调控中心发布计算任务,空闲的分布式能源节点在完成计算任务后,经过POW共识机制验证其准确性,若满足准确性要求,则获得相应的 $D\text{-coin}$ 激励。在该过程中,调控中心无权干涉。

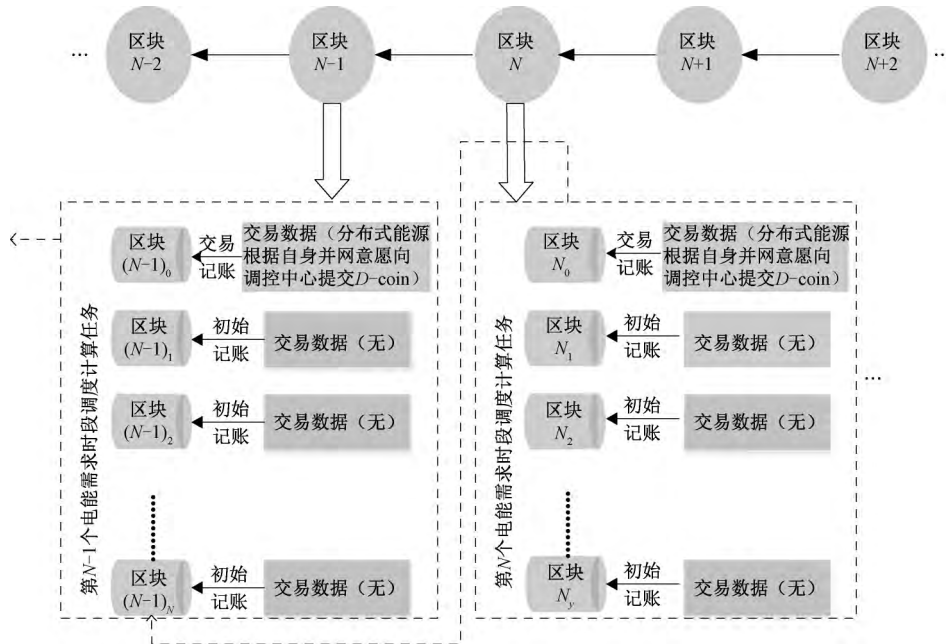


图3 区块链的形成过程

假设电力市场中需求电量更新间隔为 Δt , 记 $T_i \sim T_i + \Delta t$ 时间段内的参考电价为 P_i , P_i 为该能源供需网内无分布式能源并网时的成本电价, 各分布式能源节点根据此价格调整自身并网价格及电量策略。

(1) 小型分布式能源。小型分布式能源根据当前参考电价 P_i 及所属能源局域网内可发电量决定 $T_i \sim T_i + \Delta t$ 时间段内的并网电量, 各用户端小型分布式能源与所属能源局域网签订智能合约, 约定在 $T_i \sim T_i + \Delta t$ 时间段内由能源局域网代理并网, 并网容量依据各小型分布式能源提供 $D-\text{coin}$ 的比例分配。

(2) 能源局域网及大型分布式能源。能源局域网和大型分布式能源的并网策略包括优先并网及竞价并网两部分。优先并网是指分布式能源 j 以所获得的 $D-\text{coin}$ 兑换并网优先权后再进行并网的模式。假定优先并网模式下的交易电价为 $T_i \sim T_i + \Delta t$ 时间段内的实际成本电价 β 。记分布式能源 j 的优先并网电量为

$$Q(P_j) = \frac{D-\text{coin}_j}{D-\text{coin}_T} Q_P \quad (1)$$

式中: Q_P 为系统内允许的优先并网电量总和; $D-\text{coin}_j$ 为节点 j 提供的 $D-\text{coin}$ 的数量; $D-\text{coin}_T$ 为在这一时段内调控中心回购的 $D-\text{coin}$ 之和。

记优先并网收益为

$$\sigma(P_j) = \beta Q(P_j) \quad (2)$$

竞价并网依据最优选择的标准, 各分布式能源首先向调控中心提交电量-价格曲线, 调控中心根据

最优调度计划确定各分布式能源并网电量。记分布式能源 j 的竞价并网电量为 $Q(B_j)$, 对应的单位电量价格为 λ , $Q(B_j)_{\min}$ 为并网容量下限, $Q(B_j)_{\max}$ 为并网容量上限, $k(j)$ 和 $b(j)$ 为分布式能源 j 的电量-价格曲线中的参数, 则竞价并网收益为

$$\sigma(B_j) = \begin{cases} [k(j)Q(B_j) + b(j)]\lambda, \\ Q(B_j) \in [Q(B_j)_{\min}, Q(B_j)_{\max}] \\ 0, \quad Q(B_j) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.3 节点结构及其工作原理

分布式能源节点结构如图4所示。节点结构分为4层: 第1层为加密层, 主要包括有关加密的IP地址、公钥、私钥和电力交互方案; 第2层为区块层, 用于存储每一次交互的信息, 并形成区块链; 第3层为信息暂存层; 第4层为变量层, 主要是节点状态空间中的相关变量。

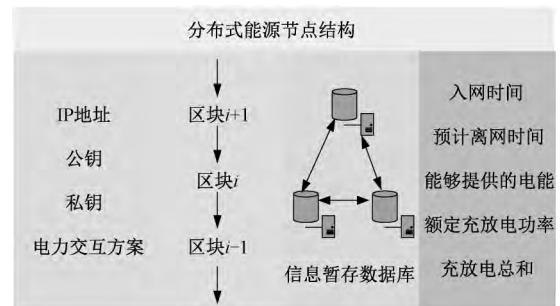


图4 分布式能源节点结构

能源电力供需网中分布式能源节点间的电能传输步骤:

(1) 新节点随着新的分布式能源的入网产生,

同时系统将自动为其分配 IP 地址,并随机生成私钥和公钥。

(2) 所有分布式能源节点的各个变量值将在入网后上传到变量层,随后向全网广播,公布公钥。

(3) 下载其他节点处的区块链信息,各个节点定时新建一个空的区块。

(4) 借助智能电网和传感器元件,收集并计算电力交互的容量,然后向全网广播。

(5) 各节点接收到信息后,根据要求按照下式自主进行调节,形成电力交互方案,即

$$Q(j, t+1) = Q(j, t) + \alpha(j)[W(j, t) - Q(j, t)R(t)] \quad (4)$$

式中: α 为算法收敛因子; $W(j, t)$ 为 t 时段分布式能源 j 的充放电效率; $R(t)$ 为 t 时段预计出现的电量。

2.4 能源电力供需网调度优化模型

2.4.1 能源供需网调度优化目标函数 调控中心根据电网的电能需求以及各分布式能源的并网策略,研究实现调度最优的方案。为了使运营成本最低,有功网络损耗、日负荷方差最小,电压偏离程度最低,电能不平衡系数最小,建立如下目标函数:

$$\max F(OC) = \mu(CP) + \sum_j \mu(j) + c \quad (5)$$

$$\min F(AL) = \frac{1}{2} \sum \frac{(U_i - U_{i'})^2}{R_{ii'}^2} \quad (6)$$

$$\min F(DL) = \sum_{t=1}^T (P_s - P_L - \bar{P})^2 \quad (7)$$

$$\min F(VD) = \sqrt{\sum \frac{(U_i - U_0)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\min EI_t = \frac{\int_t p_{\tau}^{AM} d\tau - \int_t p_{\tau}^E d\tau}{\int_t p_{\tau}^E d\tau} \quad (9)$$

式(5)为运营成本函数 $F(OC)$ 。系统运营成本包括:集中式供电设备运营成本 $\mu(CP)$,系统内分布式能源运营成本 $\sum_j \mu(j)$,能源供需网内通信、计算等固定运营成本 c 。式(6)为有功网络损耗函数 $F(AL)$ 。电能可在系统中传输时必然会产生有功损耗,有功损耗与支路电压差及支路阻抗有关。记 $U_i - U_{i'}$ 为支路电压差, $R_{ii'}$ 为支路阻抗, $U_i - U_{i'}$ 和 $R_{ii'}$ 参数可通过潮流计算获得。式(7)为日负荷方差函数 $F(DL)$ 。日负荷方差是衡量电力系统内的安全性和电能损失大小的因素之一,负荷方差越大,电能损失越大,电力系统的稳定性更低。记 \bar{P} 为日平均负荷,计算方法为

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_s - P_L) \quad (10)$$

式中: T 为调度时段; P_s 为供给节点提供的功率; P_L 为需求节点消耗的功率。

式(8)为度量电压偏离程度的函数 $F(VD)$,其中, U_i 为节点电压, U_0 为节点参考电压, U_i 和 U_0 参数可通过潮流计算获得。式(9)为求解电能不平衡系数的函数 EI_t 。由于受天气条件的限制,大型光伏发电厂会对复杂天气进行预测,根据预测结果安排发电计划,减少由于电能不平衡导致的光伏发电量的损耗, EI_t 为 t 时段的电能不平衡系数; p_{τ}^{AM} 和 p_{τ}^E 分别为 τ 时刻测量和预测的平均光伏发电量。记测量值和预测值为每隔时间 t 更新一次,则上式可简化为

$$EI_t = \frac{p_t^{AM} - p_t^E}{p_t^E} \quad (11)$$

2.4.2 约束条件 求解最优调度计划时还应考虑供需平衡约束、支路容量约束、集中式供电设备出力约束以及电动汽车充放电功率约束等条件:

$$\sum_j [Q(Bj) + Q(Pj)] + Q(CP) \geq \sum Q(L) + Q_{loss} \quad (12)$$

$$Q(Bj) + Q(Pj) \leq P(j)_{\max} t(j) \quad (13)$$

$$P_{n, \min} \leq P_n \leq P_{n, \max} \quad (14)$$

$$P_{ch, PEV} \leq P_{ch, N} \quad (15)$$

$$P_{Dch, PEV} \leq P_{Dch, N} \quad (16)$$

式(12)为功率平衡约束,其中, $Q(CP)$ 为集中式供电设备的供电量, $\sum Q(L)$ 为电力系统中的总电力负荷需求量, Q_{loss} 为电能损耗。式(13)为支路容量约束,其中, $P(j)_{\max}$ 为支路的传输功率上限, $t(j)$ 为该时段内分布式能源的并网时间。式(14)为集中式供电设备出力约束, P_n 为机组 n 提供的功率, $P_{n, \min}$ 和 $P_{n, \max}$ 分别为机组出力上下限。式(15)、(16)为电动汽车充放电功率约束, $P_{ch, PEV}$ 和 $P_{Dch, PEV}$ 分别为电动汽车的充放电功率, $P_{ch, N}$ 和 $P_{Dch, N}$ 分别为电动汽车的额定充放电功率。

3 算法设计

3.1 求解最优调度计划

对于求解最优调度计划的问题,本文采用协作型协同进化算法(CCEA)^[14],通过将分层搜索与局部搜索相结合达到全局优化,利用迭代的方法,逐组搜索最优解,对分层搜索的方法进一步改进。

该算法的核心部分为分层搜索算法,具体实现过程为:将能源局域网与大型分布式能源的并网出

力比例用 $0 \sim 100$ 的整数编码表示,随机生成多组初始解,分布在 n 个样本层中。在样本层 i 中,通过对初始解进行算子迭代找出最优解,若迭代后的解优于当前最优解,则以迭代后的解替换当前最优解;对整个样本层的可行解搜索完后,以最优解作为下一样本层初始解进行迭代。当所有样本层均无法对当前最优解进行优化时,分层搜索算法终止,输出最优解。其流程图如图 5 所示。图中, k 为样本层内的搜索次数,若对样本层 i 内所有解进行搜索后未发现更优解,则转向下一样本层搜索;记当前样本层内的可行解总数为 K_{\max} ; M 为当前系统内的样本层总数; Count 为已经迭代过的样本层数。

分层搜索的顺序按样本层大小由大至小排序,并通过局部最优跳出机制确保算法的搜索深度及广度。当分布式能源供需网规模较大时,样本层容量设置偏小会导致过多的计算成本,而样本层容量设置偏大会导致局部最优,故结合局部搜索进一步优化解的质量。

3.2 分布式计算算法与 POW 共识机制

与集中式算法相比,分布式算法具有较低的计算复杂度以及较少的计算成本,同时可以避免单点

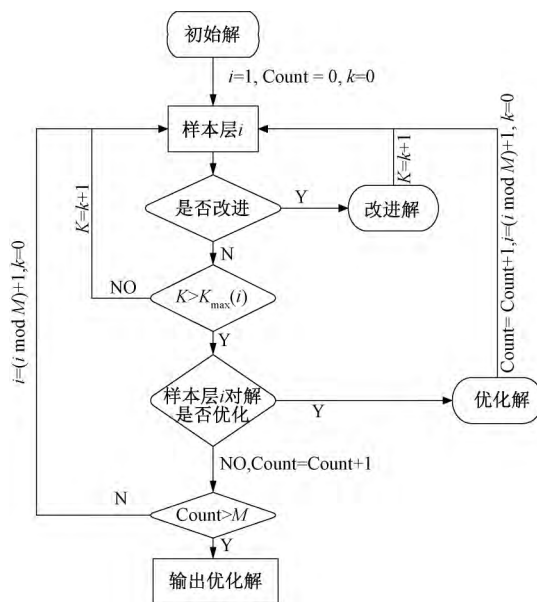


图 5 CCEA 算法的流程图

故障。对于 3.1 节中选出的可行解,可通过电力系统潮流计算评价该可行解的质量。由于潮流计算算力巨大,故通过区块链的 POW 共识机制,安排各分布式能源节点进行分布式计算,并行计算不同可行解的潮流计算。其流程图如图 6 所示。

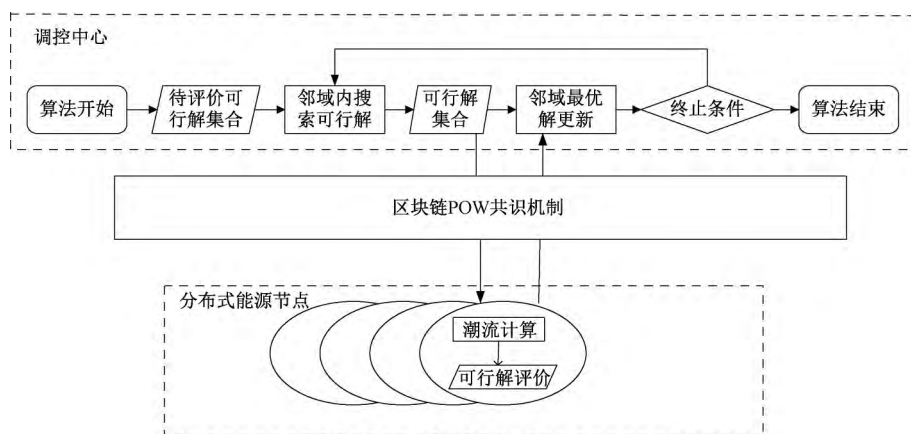


图 6 分布式计算算法的流程图

在基于区块链的能源电力供需网中,调控中心需要验证各分布式能源提供的工作量证明的准确性。若由调控中心直接验证,则会耗费大量的计算资源和时间,因此,采用节点交互验证的方法。节点交互验证是指分布式能源节点将工作量证明在整个网络内广播,由其他任意的若干个第三方节点进行验证,验证通过后该节点获得对应区块的记账权。进行第三方验证时,若参与验证的节点过少,将容易出现拜占庭将军问题;若参与验证的节点过多,则会因重复运算耗费大量时间。

在求解最优调度计划的过程中,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 D ,集合 D 中待评价可行解的数量记为 Count ,节点完成待评价可行解 D_k 的潮流计算或验证后反馈至调控中心的工作量证明集合记为 $Z(D_k)$, $Z(D_k, e)$ 表示节点 e 对待评价可行解 D_k 的计算或验证。图 7 中: W_1 为分布式能源节点 e 空闲,可进行潮流计算,向调控中心提出工作申请; W_2 为分布式能源节点 e 完成对可行解 D_k 潮流计算,向调控中心提交工作量证明 $Z(D_k, e)$; O_1 为调控中心向整个网络广播,说明该阶段分布式计算开始,各节点可以提出计算申请; O_2 为调控中心向申请计算的

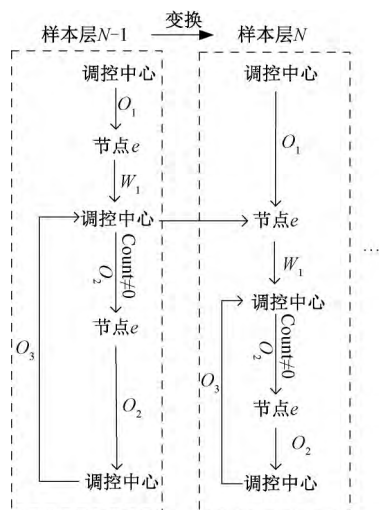


图 7 改进的 POW 共识机制

节点 e 随机发布待评价可行解 D_k 进行计算或验证, 要求节点 e 未参与 D_k 的计算或验证; O_3 为调控中心根据反馈的 $Z(D_k, e)$ 实时更新待评价可行解 D , 当 $Z(D_k)$ 中的工作量证明数量足够多且超过半数的 workload 证明一致, 则判断 D_k 获得正确评价, 并更新 D 及 Count; O_4 为该阶段分布式计算完成, 调控中心锁定当前区块链并向全网广播, 各节点等待下一阶段 W_1 。

这种节点交互验证的方式由调控中心向各节点随机分配计算任务, 调控中心具有一定的导向作用, 且各节点之间无法做到信息对接, 能够有效地避免拜占庭将军问题, 同时节省了计算时间且确保了计算的准确性。

4 仿真实验

4.1 仿真条件

在能源电力供需网中将每一个分布式能源单元都视为一个供需节点。仿真假设系统中节点 61 为平衡节点, 是一个额定容量为 1 000 MW 的火力发电厂。在 $t_k \sim t_k + \Delta t$ 时段, 通过潮流计算求得只有该火电厂发力时发电量为 935.33 MW, 发电成本为 38 675 美元, 因此, 下一时段的参考电价 $P_i = 41.35$ 美元/MW·h。

假设该能源电力供需网中在 39 个节点处有分布式能源参与并网, 各分布式能源并网策略的相关数据如表 1 所示。

4.2 结果分析

首先对区域内无分布式能源调度并网情形(仿真 1)及分布式能源调度并网模型(仿真 2)进行仿真, 实验结果如表 2 所示。

表 1 分布式能源并网数据

分布式能源节点	优先并网容量	竞价并网容量下限	竞价并网容量上限	竞价参数 k	竞价参数 b
8	0.748	2.90	6.482	18.04	97.32
9	1.048	2.87	5.562	34.45	50.33
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
33	0.958	2.03	6.612	56.97	-42.83
34	1.038	2.83	5.512	43.06	-4.96
37	0.643	4.08	5.277	56.46	-54.07
38	1.006	2.43	5.834	22.81	69.41
41	0.795	1.97	4.755	60.66	-57.26
42	0.871	2.98	3.989	63.14	-76.06
44	1.172	2.98	5.218	57.22	-42.32
51	0.999	3.23	5.411	42.37	29.46
53	0.920	3.32	5.200	47.62	7.48
55	1.172	2.98	5.218	57.22	-42.32
56	0.734	3.03	6.566	63.20	-85.65
60	0.747	3.55	4.753	89.63	-206.1
64	0.740	2.32	6.460	61.13	-63.48
66	0.725	2.99	5.455	60.08	-81.23
68	0.901	3.43	4.509	36.76	33.13
71	0.778	2.93	4.832	69.91	-100.9
72	1.013	2.92	4.817	71.95	-115
78	0.725	2.99	5.455	60.08	-81.23
85	0.844	3.67	6.956	52.30	-65.49
87	0.864	3.17	5.666	69.73	-118.1
89	0.854	3.80	4.826	26.44	92.13
92	0.982	2.53	5.508	40.83	-19.55
94	0.847	3.42	3.673	24.10	57.43
95	0.854	3.80	4.826	26.44	92.13
100	0.945	2.45	5.835	50.66	-31.39
102	1.042	3.54	4.198	90.41	-202.5
105	1.042	3.54	4.198	90.41	-202.5
107	1.181	3.18	6.099	45.33	-7.28
108	0.790	2.42	4.520	41.50	1.74
109	0.755	3.51	4.435	29.43	71.59
111	0.755	3.51	4.435	29.43	71.59
113	0.867	3.81	3.893	73.49	-137.3
116	1.130	2.82	5.080	46.49	5.05

表 2 仿真实验结果

指标	仿真 1	仿真 2
集中式设备供电量/MW	935.33	802.35
集中式设备供电成本/美元	38 675.2	17 655.9
分布式能源竞价并网容量/MW		223.34
分布式能源强制并网容量/MW		
分布式能源并网总容量/MW		223.34
能源调度网应标成本/美元		9 463.77
总运营成本/美元	48 675.2	27 119.67
有功网络损耗/MW	100.098	63.45
日负荷方差	126 443.43	87 097.6
电压偏离值	0.022 3	0.021 88
电能不平衡系数	0.308	0.198
平均成本电价/美元	41.35	26.44

仿真 2 综合考虑了运营成本、有功损耗、日负荷

方差、电压偏差程度和电能不平衡系数进行多目标优化。仿真2较仿真1的运营成本降低了44.3%,有功损耗减少了36.6%,电压偏差降低了1.88%;仿真2中的5项指标较集中式发电情况有明显改善。由此可见,采用分布式能源能有效优化调度。

接着对分布式能源调度并网模型(仿真2)及采用基于区块链的能源电力供需网调度优化模型协调控制分布式能源并网情形(仿真3)进行仿真,实验结果如表3所示。

表3 仿真实验结果

指标	仿真2	仿真3
集中式设备供电量/MW	802.35	786.3
集中式设备供电成本/美元	17 655.9	16 433.21
分布式能源竞价并网容量/MW	223.34	210.34
分布式能源强制并网容量/MW		34.45
分布式能源并网总容量/MW	223.34	244.79
能源调度网应标成本/美元	9 463.77	8 993.54
总运营成本/美元	27 119.67	24 426.75
有功网络损耗/MW	63.45	61.23
日负荷方差	87 097.6	65 590.87
电压偏离值	0.021 88	0.021 9
电能不平衡系数	0.198	0.108
平均成本电价/美元	26.44	24.66

仿真2、3同时考虑了运营成本、有功损耗、日负荷方差、电压偏差程度和电能不平衡系数进行多目标优化。仿真3较仿真2的总运营成本降低了9.9%,有功网络损耗降低了3.5%,日负荷方差降低了24.69%,电压偏离值增加了0.91%,电能不平衡系数降低了45.5%。由数据结果可知,除了电能质量稍有下降外,其余指标均有改善。

图8、9从并网容量、并网收益两方面对仿真2和3进行对比。由图8可见,仿真3中DER的并网容量总和多于仿真2中DER的并网容量,然而,部分DER节点在仿真3中的并网容量低于仿真2中的并网容量,其原因可能是该DER节点获得的激励较少,缺少并网优先权,本该获得的并网容量被其他拥有并网优先权的DER节点占去。从并网收益结果(见图9)来看,仿真3中多数DER的并网收益较仿真2更多,少数DER因某些时段优先并网电价低于应标电价,使得优先并网的电量获得的收益低于该部分电量应标并网的收益,导致在允许优先并网的情况下获得的收益更少。但从长远来看,在这种方式下,分布式能源能得到充分利用,可再生能源的利用率提高,更能适应当前电力系统向分布式格局转变的现状。

由此可见,基于区块链的分布式能源供需网调度优化模型可有效降低发电成本,减少有功损耗,提

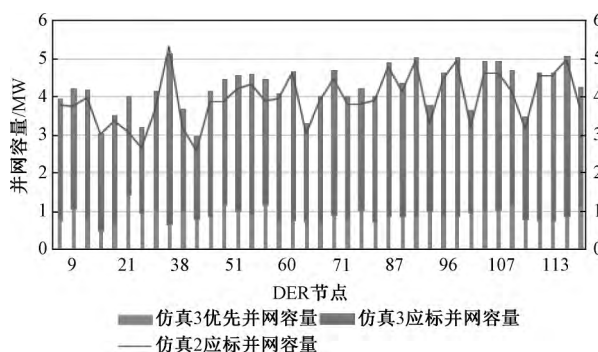


图8 仿真2和仿真3的并网容量

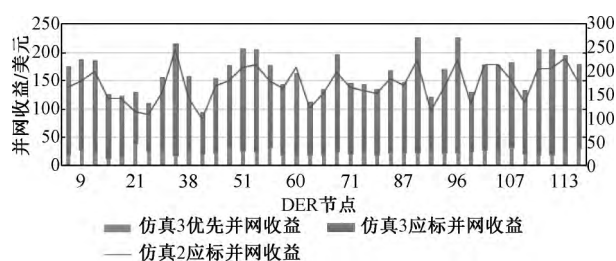


图9 仿真2和仿真3的并网收益

高电能质量,维护电力系统的稳定性。

5 结 语

为了更好地解决能源调度问题,协调控制分布式能源并网,提高能源电力供需网的安全性及稳定性,本文提出基于区块链的能源电力供需网调度优化模型。首先,结合区块链技术建立了能源电力供需网模型,介绍了能源电力供需网的工作原理,同时引入调控中心,在系统中负责协调分布式能源的并网行为,确立了系统的半中心化特性。通过在系统中引入激励机制,实现分布式能源的统筹并网,将并网分为优先并网和竞价并网,依据运营成本、有功网络损耗、日负荷方差、电压偏离程度以及电能不平衡系数建立分布式能源调度优化模型,并考虑供需平衡、支路容量等约束条件。最后,采用CCEA算法寻找最优调度方案,在此基础上结合POW共识机制设计了对最优调度计划的验证流程。仿真实验表明,本文所设计的能源电力供需网调度优化模型能够减少调度产生的成本,降低有功网络损耗、电压偏离程度以及电能不平衡系数,并且能实现高质量、高效率的并网。

参考文献:

- [1] Wang C S, Yan J Y, Marnay C, et al. Distributed energy and microgrids (DEM)[J]. Applied Energy, 2018, 210(1): 685-689.
- [2] 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.
- [3] Liu Weijie, Chi Ming, Liu Zhiwei, *et al.* Distributed optimal active power dispatch with energy storage units and power flow limits in smart grids [J]. Electric Power and Energy Systems, 2019, 105: 420-428.
- [4] Zhang Jun Jason, Wang Fei-Yue, Wang Qiang, *et al.* Parallel dispatch: A new paradigm of electrical power system dispatch [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 1: 311-319.
- [5] Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. 2008. <https://bitcoin.org/bitcoin.Pdf>.
- [6] Swan M. Blockchain: Blueprint for a new economy [M]. New York: O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [7] Yuan Yong, Wang Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [8] Li Yang, Fan Xinwen, Cai Zhiyuan, *et al.* Optimal active power dispatching of microgrid and distribution network based on model predictive control [J]. Tsinghua Science and Technology, 2018, 3: 266-276.
- [9] Zhang Hong, Zhao Dongmei, Li Furong, *et al.* Economic dispatch of smart distribution networks for electricity cost reduction[J]. Electricity, 2014, 2: 15-20.
- [10] Qian K, Zhou C, Allan M, *et al.* Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [11] Sikorski J J, Houghton J, Kraft K. Blockchain technology in the chemical industry: Machine-to-machine electricity market [J]. Applied Energy, 2017, 195: 234-246.
- [12] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统:需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [13] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [14] 刘方洁. 基于分组与局部搜索的大规模全局优化新算法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [15] Cheng Jianqiang, Chen R Li-Yang, Najm H N, *et al.* Chance-constrained economic dispatch with renewable energy and storage[J]. Computational Optimization and Applications, 2018, 70(2): 479-502.
- [16] Ho Wai Shin, Macchietto S, Lim Jeng Shiun, *et al.* Optimal scheduling of energy storage for renewable energy distributed energy generation system [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58:1100-1107.
- [17] Tarca S, Roughan M, Ertugrul N, *et al.* Dispatchability of wind power with battery energy storage in south australia [C]//1ST International Conference On Energy and Power, 2017, 110: 223-228.
- [18] Zyskind G, Nathan O, Pentland A S. Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data [C]//IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). [s.l.]:[s.n.]:2015: 180-184.
- [19] Rokni S G M, Radmehr M, Zakariazadeh A. Optimum energy resource scheduling in a microgrid using a distributed algorithm framework [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 37: 222-231.
- [20] Aghajani S, Kalantar M. Optimal scheduling of distributed energy resources in smart grids: A complementarity approach[J]. Energy, 2017, 141: 2135-2144.
- [21] Rifkin J. The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world[J]. Survival, 2011, 2(2): 67-68.
- [22] Brilliantova V, Thurner T W. Blockchain and the future of energy[J]. Technology in Society, 2018, 12(2): 1-12.
- [23] Sikorski J J, Houghton J, Kraft K. Blockchain technology in the chemical industry: Machine-to-machine electricity market [J]. Applied Energy, 2017, 195: 234-246.
- [24] Rathore S, Kwon B W, Park J H. BlockSecloTNet: Blockchain-based decentralized security architecture for IoT network [J]. Journal of Network and Computer Application, 2019, 143(10): 167-177.
- [25] Hinterstocker M, Haberkorn F, Zeiselmaier A, *et al.* Faster switching of energy suppliers-a blockchain-based approach[J]. Energy Informatics, 2018, 70(1): 48-59.
- [26] Zheng Cong, Yang Fang, Shi Chao, *et al.* Analysis of blockchain in global energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 45(3): 23-34.