

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220087

基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略研究

邸剑^{1,2}, 臧齐齐^{1,2}, 王桂兰^{1,2}, 杨璟正^{1,2}, 周国亮³

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003; 2. 复杂能源系统智能计算教育部工程研究中心, 河北 保定 071003; 3. 国网冀北电力有限公司技能培训中心, 河北 保定 071051)

摘要: 分布式经济调度计算负载均衡、可扩展性强, 适用于电源分散分布的场景。区块链作为分布式对等网络, 具有去中心化、安全性高和数据高度共享等特征, 与分布式经济调度的需求相契合。针对分布式经济调度中全局信息共享难、存在个体欺骗以及安全性不足的问题, 提出了基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略。该策略考虑配电网的多种约束, 采用统一微增变量的梯度修正法迭代计算各电源功率, 实现电网最小经济成本下的最优功率分配。对以太坊技术进行了调整和改进, 大幅降低其算力消耗和部署成本。并将调度算法合约化, 结合区块链的存储、共识和加密机制优化节点间的信息共享, 防止个体欺骗行为, 提高系统的安全性。仿真实验和分析表明, 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略收敛速度快, 具有良好的鲁棒性、安全性及可扩展性。

关键词: 分布式经济调度; 区块链; 以太坊; 梯度修正法; 个体欺骗

A distributed economic scheduling strategy based on blockchain and gradient correction method

DI Jian^{1,2}, ZANG Qiqi^{1,2}, WANG Guilan^{1,2}, YANG Jingzheng^{1,2}, ZHOU Guoliang³

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Computing for Complex Energy Systems, Ministry of Education, Baoding 071003, China; 3. Skill Training Center of State Grid Jibe Electric Power Co., Ltd., Baoding 071051, China)

Abstract: Distributed economic scheduling has strong load balancing and scalability, and is suitable for scenarios where power sources are distributed. As a distributed peer-to-peer network, blockchain has the characteristics of decentralization, high security and high data sharing. This meets the needs of distributed economic scheduling. To solve the problems of difficult global information sharing, individual deception and insufficient security, this paper proposes a strategy based on a blockchain and gradient correction method. The strategy considers various constraints, and adopts the gradient correction method of unified slightly increasing variables to iteratively calculate the power of each power source, and achieve the optimal power allocation under the minimum economic cost to the power grid. The Ethereum technology is adjusted and improved to reduce its computing power consumption and deployment cost, and the scheduling algorithm is contracted to optimize the information sharing between nodes, prevent individual deception and improve the security of the system in combination with the blockchain storage, consensus and encryption mechanisms. Simulation experiments and analysis show that the distributed economic scheduling strategy based on blockchain and gradient modification method has fast convergence speed, good robustness, security and scalability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62171185).

Key words: distributed economic scheduling; blockchain; Ethereum; gradient correction method; individual deception

0 引言

经济调度对维护电力系统稳定运行、节约发电

成本、减小燃料耗量和降低碳排放具有重要意义, 是电力系统中的基本问题之一^[1-2]。经济调度问题是在满足电力系统一定约束的前提下, 将总负荷分配到各发电机组出力, 使总发电成本最小的优化问题^[3-4]。传统经济调度一般采用集中式的调度方法,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62171185)

即调度中心首先获取所有发电单元的信息,然后通过经济调度算法进行功率分配,最后向各个发电单元发出调度命令。在此过程中,任何通信问题(如丢包、延迟等)都会使调度中心无法获得准确完整的信息,导致经济调度不能收敛到最优解。同时,随着电网系统规模不断扩大,调度中心面临严峻的通信和计算压力,一旦调度中心崩溃,则全局经济调度失效,系统的稳定性和经济性都将受到严重影响。

近年来,随着电网结构从集中式向分布式转变,分布式的经济调度策略获得了更多关注。分布式经济调度将各分布式电源视为独立的智能体,各智能体具有一定的决策能力,与相邻节点交换信息后进行自主决策调整出力,可有效降低中心节点的通信和计算压力,具有良好的鲁棒性与可拓展性^[5-7]。然而调度权的高度分散使系统易于遭受外部恶意攻击,并且攻击更加难以识别和防御^[8-10]。同时,高效的分布式经济调度既要求各智能体间交换的信息少,又要求交换信息的正确性。某些个体为了提高自身经济利益,可能与相邻节点交换假消息,导致经济调度无法达到实际全局最优。因此,提高分布式经济调度安全性,避免个体欺骗行为,是保障经济调度稳定运行的前提条件。

为了实现安全高效的分布式经济调度,相关学者开展了研究探索工作。文献[11]采用了基于虚拟电厂的分布式经济调度策略,通过虚拟电厂参与调度,聚合发电侧的分布式能源以提高可再生能源消纳程度。文献[12]采用粒子群算法对建立的光热-风电联合调度模型进行求解,实现经济调度的优化。文献[13]提出了考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型,采用列生成算法对模型求解,降低可再生能源不确定性带来的风险,保证微电网与主网间联络线功率的稳定性。文献[14]设计了一种基于交替方向乘子法的分布式经济调度算法,通过二分法和有限时间分布算法求解子问题,得到各电源节点的最优功率分配。但在发电节点频繁加入/退出时,该策略的调度稳定性会受到较大影响。

在防止个体欺骗方面,文献[15-16]针对基于一致性协议的分布式控制系统,分别设计了一阶和二阶防欺骗分布式控制策略。其基本原理是,在系统中任一节点收到相邻节点的消息后,首先检查该消息与节点当前状态的偏差情况,如果偏差过大则认为是欺骗信息并直接丢弃,以避免个体欺骗行为,但一致性变量的最终收敛状态不是全局最优,而是接近全局最优。文献[17]将微增成本作为一致性变量,详细分析了个体欺骗在传播具有恒定偏差的微增成本时对经济调度功率分配的影响,并证明系统

频率不会受到个体欺骗行为的影响。文献[18]提出了基于虚拟发电机的分布式经济调度策略,以微增成本为一致性变量进行迭代计算,得到经济调度数据,并利用偏差修正方法抵消个体欺骗造成的影响。此方法可以较好地保证经济调度的精确性,但算法较复杂,且安全性有待进一步提高。

高效的分布式经济调度需要较高的安全性、准确的信息共享、良好的鲁棒性以及可扩展性。区块链是基于分布式数据库识别、传播和记载信息的智能化对等网络^[19-21],其具有安全性高、易于拓展、数据高度共享且不可篡改的特点,与分布式经济调度内在需求相契合。因此,探索基于区块链技术的分布式经济调度策略是有价值的尝试。

本文基于以太坊平台构建分布式电源的区块链网络,利用统一变量的梯度修正法和改进的以太坊技术迭代计算微增成本,实现分布式经济调度。仿真实验和分析表明,基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度算法收敛速度快、安全性高,可有效避免个体欺骗,在系统负荷波动、节点变动和网损波动等场景下均有很好的表现。

1 区块链与以太坊技术

1.1 区块链

区块链起源于比特币,其核心技术主要包括分布式存储、共识机制、智能合约以及非对称加密算法等,具有去中心化、点对点传输、可追踪、不可篡改以及数据安全等特点^[22]。

区块链采用分布式数据存储方式,即区块链上的数据在每个节点均有一份完整的数据拷贝,由链上节点共同维护,无法被篡改。区块链的共识机制使分布式架构下的多个节点之间达成数据一致,是区块链世界的法律。智能合约利用计算机语言描述传统的纸质合约,通过程序算法仲裁和执行合同。智能合约条件的触发和执行属于一次原子操作,合约流程去中心化、自动化执行,一旦部署到链上即与外部环境隔离,其执行不受干扰,可靠性高,执行过程透明且可跟踪^[23]。区块链的非对称加密算法通过成对的私钥和公钥加密、解密消息,保障了区块链节点之间消息传递的安全性。

1.2 以太坊和工作量证明机制

以太坊是开源具有智能合约功能的公共区块链平台,其底层开放了RPC接口,供节点调用合约,并利用以太坊虚拟机(ethereum virtual machine, EVM)处理智能合约。

工作量证明机制是经典的共识机制之一,它可以保证各节点的数据一致,有效应对多种服务滥用

问题^[24]。工作量证明机制要求链上节点执行一定量的运算, 即消耗计算机一定的时间来证明节点的工作量, 确定记账权。其共识过程如下: 1) 区块链节点调用智能合约改变链上数据, 产生交易; 2) 向全网广播交易并送入交易池; 3) 各记账节点周期性地交易池的交易打包上链, 同时计算一个有效的随机数; 4) 率先完成打包的节点通过非对称加密算法向其他节点广播打包好的新区块; 5) 其他节点验证收到的新区块, 验证无误后达成共识, 将新区块同步到本地存储, 完成数据上链。

2 统一微增变量的梯度修正调度算法

分布式经济调度的目标为: 在满足功率约束的情况下, 调整各分布式电源的出力, 使各电源微增成本达到一致, 实现功率的最优分配和总发电成本最小。本文使用统一微增变量的梯度修正法来进行经济调度计算, 将统一的全局微增成本作为一致性变量, 在实现快速收敛的同时, 减少区块链上存储的数据量, 减轻各节点存储负担。

设某配电网含有 n 个分布式电源和 m 个负载, 其模型如图 1 所示。设配电网中的分布式电源为 H_1, H_2, \dots, H_n , 通过物理线路向负载 L_1, L_2, \dots, L_m 供电。

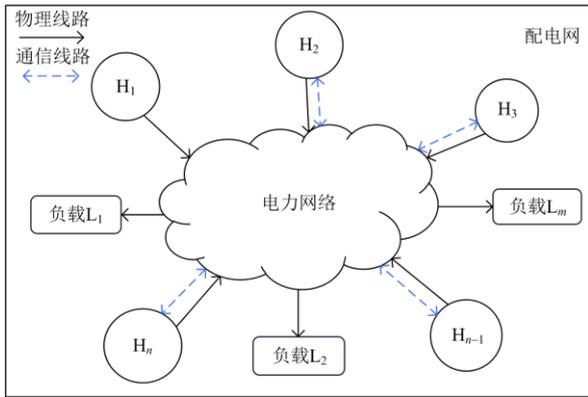


图 1 有源配电网模型

Fig. 1 Structure diagram of active distribution network

统一微增变量的梯度修正法的核心思想是: 为各电源设定统一的微增成本 λ , 根据系统功率差额计算每轮迭代过程中 λ 的修正量 $\Delta\lambda$, 根据修正量不断更新 λ , 直到收敛。此时, 各节点功率分配达到最优, 总发电成本最小。具体计算过程如下。

经济调度的目标函数^[25]为

$$\min F = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (1)$$

式中: F 为总发电成本; P_i 为第 i 个分布式电源的输出功率(即出力), 如式(2)所示; $F_i(P_i)$ 为第 i 个分布式电源的发电成本。

$$P_i = \frac{\lambda - b_i}{2c_i} \quad (2)$$

各电源发电成本的计算公式^[26]为

$$F_i(P_i) = \frac{1}{2}a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (3)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 分别为每个分布式电源的二次项、一次项和常数项系数, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

分布式经济调度的不等式约束为

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (4)$$

分布式经济调度的等式约束^[27]为

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_{\text{Loss}} \quad (5)$$

式中: P_D 为当前区域配电网总负荷需求; P_{Loss} 为配电网网络损失。

机组负荷调整速率约束为

$$|P_i^{(k)} - P_i^{(k-1)}| \leq V_i \quad (6)$$

式中: $P_i^{(k)}$ 为第 i 号机组第 k 轮的输出功率; V_i 为各迭代周期的最大功率调整量。

系统旋转备用约束为

$$\sum_{i=1}^n P_{i,\max} - \sum_{i=1}^n P_i^{(k)} \geq R(t) \quad (7)$$

式中, $R(t)$ 为 t 时刻系统的旋转备用容量。

为各发电机设定一个初始的微增成本 λ 作为统一的一致性变量, 不断调整 λ 使其收敛, 收敛后的 λ 即为最优情况下各电源节点的微增成本^[28]。

微增成本 λ 与 P_D 的关系为

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda - b_i}{2c_i} = P_D + P_{\text{Loss}} \quad (8)$$

整理得

$$\lambda = \frac{P_D + P_{\text{Loss}} + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2c_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2c_i}} \quad (9)$$

结合分布式经济调度的等式约束和不等式约束, 通过式(2)与式(9)迭代更新 λ 和各电源输出功率, 当 λ 达到收敛时, 系统功率分配最优, 且发电成本最小。

式(8)可以写成:

$$f(\lambda) = P_D + P_{\text{Loss}} \quad (10)$$

将式(10)在 $\lambda^{(k)}$ 点($\lambda^{(k)}$ 为第 k 轮的微增成本)按照泰勒级数展开并忽略高阶项得到式(11)。

$$f(\lambda)^{(k)} + \left(\frac{df(\lambda)}{d\lambda}\right)^{(k)} \Delta\lambda^{(k)} = P_D + P_{\text{Loss}} \quad (11)$$

整理得

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\left(\frac{df(\lambda)}{d\lambda}\right)^{(k)}} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum \left(\frac{dP_i}{d\lambda}\right)^{(k)}} \quad (12)$$

改写为

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum \frac{1}{2c_i}} \quad (13)$$

式中： $\Delta\lambda^{(k)}$ 为梯度修正量； $\Delta P^{(k)}$ 为第 k 轮迭代的功率差额，其计算如式(14)所示。

$$\Delta P^{(k)} = P_D + P_{LOSS} - \sum_{i=1}^{n_g} P_i^{(k)} \quad (14)$$

因此， λ 更新为

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \quad (15)$$

由于机组的负荷调整速率约束限制了各电源输出功率的变化速度，输出功率无法与微增成本维持相同的变化率。即微增成本的调整速度高于输出功率的调整速度，导致输出功率与微增成本会先超过最优值，然后再回调至最优值，甚至在最优值附近产生多次摆动。为了抑制这一现象，加快收敛，引入抑制策略限制微增变量的调整速率，如式(16)所示。

$$\Delta\lambda^{(k)} = \begin{cases} \Delta\lambda^{(k)} / x_h, \Delta\lambda^{(k)} \geq \theta \\ \Delta\lambda^{(k)} / x_l, \Delta\lambda^{(k)} < \theta \end{cases} \quad (16)$$

式中： θ 为微增变量调整阈值； x_h 和 x_l 分别为不同阈值下的调整系数。

当 $\Delta\lambda^{(k)} = 0$ 时，微增变量与各分布式电源输出功率不再变化，即分布式经济调度达到最优解。

3 基于区块链和梯度修正法的经济调度

3.1 基于区块链的分布式经济调度框架设计

基于区块链的分布式经济调度框架图如图2所示。框架底层由区块链智能体和通信线路组成的区块链网络，实现信息采集、指令下发和节点通信功能；第二层为以太坊平台层，主要用于执行经济调度计算，通过 levelDB 数据库存储经济调度信息，基于智能合约和共识机制实现经济调度的不可干扰性，利用非对称加密算法保证节点通信的安全性；第三层为管理层，依托以太坊平台实现数据管理、权限控制、节点管理和账户管理等功能；最顶层结合 geth 客户端和 Vue 前端实现调度信息展示与调度启停控制。

3.2 基于区块链和梯度修正法的经济调度算法

将每个分布式电源映射为一个以太坊私有区块



图2 基于区块链的分布式经济调度框架图

Fig. 2 Block chain based economic scheduling framework

链节点，通过 geth 客户端搭建以太坊私有链，结合梯度修正法实现分布式经济调度。

与以太坊公有链不同，以太坊私有链具有交易速度快、实时性好、部署成本低以及灵活方便等优势，适用于分布式经济调度。以太坊私有链的写入权限仅掌握在经济调度参与者手中，数据的访问和记录等操作有严格的权限要求。各节点在调度计算发起时直接从本地数据库获取上一轮达成共识的信息，无需再临时与相邻节点进行信息交换，有效避免个体欺骗行为。同时，智能合约部署在以太坊私有链上，与外部环境隔离，执行过程更加安全。每轮的调度结果通过 PoW 共识机制同步更新到所有节点上，维持各节点调度数据一致。

基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度算法具体流程如下：

- 1) 初始化参数，包括各发电节点的相关系数、初始输出功率 $P_i^{(0)}$ 以及微增成本初始值 $\lambda^{(0)}$ 等；
- 2) 区块链节点从本地数据库获得上一轮次的功率分配结果 $P_i^{(k-1)}$ 以及微增成本值 $\lambda^{(k-1)}$ ，通过 $\lambda^{(k-1)}$ 计算本轮功率分配；
- 3) 通过当前功率差额计算本轮微增成本的梯度修正量 $\Delta\lambda^{(k)}$ ，更新得到本轮微增成本 $\lambda^{(k)}$ ，完成本轮迭代；
- 4) 各记账节点将得到的结果数据通过 PoW 共识机制打包上链，供下一轮迭代使用；
- 5) 持续上述迭代过程直至 $\Delta\lambda = 0$ ，即微增成本收敛至某一个值，此时系统的功率分配达到全局最优状态。

基于区块链和梯度修正法的经济调度算法流程如图3所示。

3.3 分布式经济调度智能合约开发

本文基于以太坊平台，通过 solidity 语言以及 remix 集成开发环境将梯度修正的分布式经济调度算法编写为智能合约，部署到区块链上。部署上链的智能合约运行在以太坊虚拟机上，与外部环境完全隔离，无法访问网络和文件系统等进程，仅开放底层的 RPC 端口。链上节点通过 web3.js 库调用智

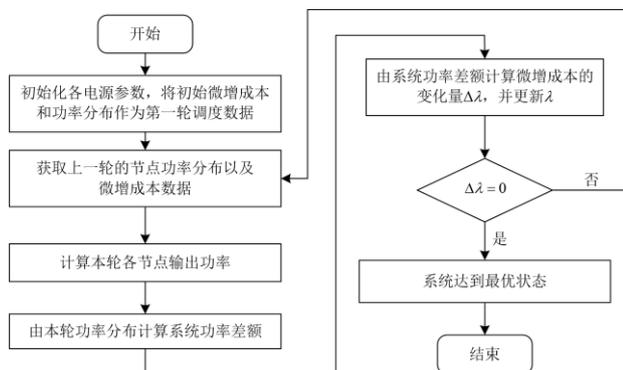


图 3 基于区块链的梯度修正法的经济调度算法流程图
Fig. 3 Flow chart of gradient modified distributed economic scheduling based on blockchain

能合约执行经济调度算法。智能合约启动后, 原子性执行, 不受外界干扰, 安全性高。

3.4 以太坊私有链的调整及改进

为了适应调度计算流程, 减小算力消耗和硬件需求, 本文在创建以太坊私有链时, 进行了以下改进和调整。

1) 大幅降低 PoW 共识机制计算随机数的难度值

在 PoW 共识机制中, 每隔一定的时间, 共识节点会同时打包交易池中的交易, 在此过程中需要进行大量的哈希计算, 耗费较长的时间和大量的算力, 获得一个符合条件的随机数。率先得到该随机数的节点可成功打包区块, 获取本次共识的记账权, 即该节点可以广播自己打包成功的区块, 其余节点验证该区块的正确性, 验证无误则共识成功, 数据上链。本策略在经济调度过程中需要先获取上一轮次的计算结果, 因此要求每轮的调度数据快速上链。大幅降低 PoW 共识机制的难度值, 可以在保证共识结果正确的情况下, 加快计算随机数的速度, 进而提高调度数据的上链速度, 保障了调度过程的时效性; 同时, 降低计算难度以及私有链对节点硬件配置的要求, 减少了部署成本。

2) 将 gas limit 提升至允许上限

以太坊智能合约每一步的执行都需要消耗一定量的 gas, 如果在合约执行结束之前 gas 耗尽, 则合约执行失败, 数据回滚, 提升 gas limit 可以有效避免这种情况。

3.5 个体欺骗控制机制

在基于多智能体通信网络的分布式经济调度中, 各节点需要与相邻节点交换信息, 并根据该信息执行经济调度算法, 所以交换数据的准确性直接影响分布式经济调度的效果。在实际调度场景下, 某些节点可能会为了提高自身利益, 向相邻节点发

送错误的信息。比如, 在真实的微增成本或自身输出功率上加上一一定的偏差, 影响调度结果, 减小自身输出功率。此时其余节点会提高自身输出功率使系统达到供需平衡, 整个网络无法达到最优功率分配, 总发电成本不能达到最小。

本策略中对于个体欺骗行为的控制方式如下:

1) 本文采用的经济调度算法使用全局统一的微增成本来调整各节点输出功率, 微增成本的变化对各节点产生相同的影响。假设欺骗节点为提高自身利益, 篡改本地数据库, 增大微增成本, 根据式(2)可知, 所有节点输出功率均增大, 欺骗节点无法从中获利。

2) 在节点迭代计算过程中, 每一轮的经济调度结果通过共识机制同步到所有节点; 在进行新一轮计算时, 各节点从本地数据库获取上一轮的功率分布、微增成本等参数, 即可迭代计算。该过程中各节点不需要再临时与相邻节点交换信息, 使电源节点无法进行欺骗行为。这种机制既遵循了调度过程中交换信息尽量少的原则, 又避免了个体欺骗问题, 保证了经济调度的准确性。

4 算例分析

4.1 仿真环境

本文实验中的配电网包含 6 个分布式电源, 各电源的基本参数如表 1 所示。用 VMWare 虚拟机模拟配电网中的 6 个分布式电源节点智能体, 构建以太坊私有链网络。其中, 每个区块链节点的硬件环境为 2 GB 内存, 10 GB 外存空间, CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-10400F CPU @ 2.90 GHz, 操作系统为 Linux。

表 1 各分布式电源参数表

Table 1 Parameters of distributed power supply

电源	$P_{i,min}/MW$	$P_{i,max}/MW$	a_i	b_i	c_i
H ₁	100	500	213	9.4523	0.003 256
H ₂	200	800	256	8.2245	0.002 457
H ₃	200	800	312	6.9443	0.005 365
H ₄	100	500	256	9.2512	0.004 682
H ₅	300	1000	298	8.2756	0.004 256
H ₆	300	1000	247	9.2274	0.003 987

4.2 实验场景

1) 负荷波动情况下的经济调度有效性验证

令系统的初始总负荷为 2000 MW, 网损为总负荷的 5%, 各分布式电源的初始输出功率为其下限, 微增成本初始值根据经验取 9.0, 微增成本的调整阈值取 0.21, 调整系数取 4 和 6。在 0~49 轮迭代中系

统负荷保持在 2000 MW，第 50 轮时突变为 2500 MW，并保持至第 99 轮；第 100 轮时系统负荷再次突变为 3500 MW，并保持到第 150 轮迭代。在上述实验条件下验证负荷波动时微增成本的收敛速度、收敛效果以及各电源节点的功率分配情况。

2) 电源节点变动情况下经济调度有效性验证

系统初始总负荷仍为 2000 MW，网损为总负荷的 5%，各分布式电源的初始输出功率为其下限，微增成本初始值取 9.0。第 50 轮时，6 号电源节点故障停机，剩余 5 个节点继续进行经济调度，各自调整输出功率以满足系统负荷需求；第 100 轮时，6 号电源节点恢复正常，再次参与经济调度。在上述条件下验证节点退出/加入时对微增成本和功率分配的影响。

3) 网损波动情况下经济调度有效性验证

令系统初始总负荷为 2000 MW，初始状态时网损为系统负荷的 5%，各分布式电源的初始输出功率为其下限，微增成本初始值取 9.0。在第 50 轮时，网损变为系统负荷的 10%；第 100 轮时，网损变为系统负荷的 15%。在以上条件下进行试验，验证网损变化对微增成本和功率分配的影响。

4.3 实验结果与分析

1) 负荷波动情况下的调度有效性实验结果与分析

负荷波动情况下得到的微增成本以及节点输出功率变化曲线如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可见，迭代计算执行到第 22 轮时，微增成本上升至 11.18 美元/MWh，之后下降，第 32 轮时，微增成本收敛至 11.17 美元/MWh，此时各节点输出功率达到最优分配，6 个电源的输出功率分别为[263.55, 599.11, 393.69, 204.76, 339.87, 300.00] MW，总输出功率为 2100.98 MW，与系统负荷、网损达到平衡。当迭代进行到第 50 轮时，系统负荷突升为

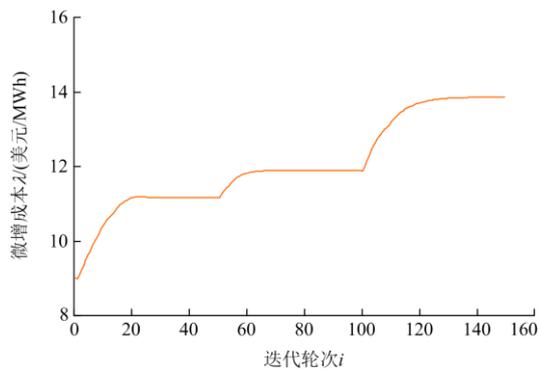


图 4 负荷波动情况下微增变量的收敛曲线
Fig. 4 Convergence curve of incremental cost under load fluctuation

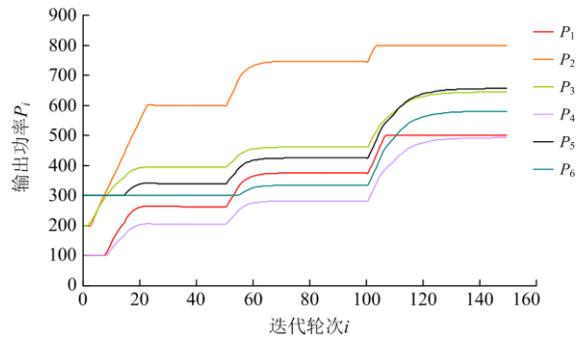


图 5 负荷波动情况下各电源输出功率变化曲线
Fig. 5 Variation curve of output power of each power supply under load fluctuation

2500 MW，又经过 29 轮迭代，即第 79 轮时，微增成本收敛至 11.89 美元/MWh，此时各电源的输出功率分别为 [374.98, 746.77, 461.31, 282.24, 425.11, 334.43] MW，系统输出功率为 2624.84 MW；第 100 轮时系统总负荷上升为 3500 MW，收敛状态再次被打破，微增成本经过 43 轮迭代计算最终收敛至 3.86 美元/MWh，各电源节点的输出功率稳定在[500.00, 800.00, 644.40, 492.05, 655.92, 580.81] MW，系统输出功率为 3673.18 MW，达到最优分配和供需平衡。

从上述结果可见，基于区块链的梯度修正分布式经济调度算法在负荷大幅度波动的情况下，基本经过 30 轮左右的迭代即可达到稳定，可以快速使微增成本达到收敛，实现最优功率分配、供需平衡以及全局发电成本最小。从图 4 的曲线走势可以看出，梯度修正法在最开始距离收敛状态差距较大时，微增成本 λ 的变化步长 $\Delta\lambda$ 较大，可以快速接近收敛状态；随着系统状态不断接近收敛状态， $\Delta\lambda$ 的值逐渐减小，在抑制策略的控制下仅产生很小的过优幅度即回落收敛，收敛过程平滑且快速。

2) 电源节点变动情况下经济调度有效性实验结果与分析

电源节点变动情况下的实验结果如图 6 和图 7 所示。由图可知，从初始状态开始，微增成本迭代 32 轮后收敛至 11.17 美元/MWh，各节点输出功率为 [263.35, 598.86, 393.57, 204.62, 339.72, 300.00] MW，达到功率最优分配和供需平衡。第 50 轮时 6 号节点停机，输出功率归 0，其余 5 个节点立刻提升自身输出功率，以弥补 6 号节点退出产生的功率缺额。经过 25 轮迭代，微增成本收敛至 11.61 美元/MWh，系统重新达到稳定，此时各节点输出功率分别为 [331.58, 689.27, 434.97, 252.07, 391.91, 0.00] MW，总输出功率为 2099.80 MW，达到供需平衡。第 100 轮时，6 号节点恢复出力，再次加入经济调度，经过 33

轮迭代后, 微增成本再次收敛至 11.17 美元/MWh, 此时各节点输出功率为[263.35, 98.86, 393.57, 204.62, 339.72, 300.00] MW, 总输出功率为 2100.12 MW 美元/MWh, 即恢复到了 6 号节点停机之前的系统收敛状态。上述结果表明, 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度系统在节点脱离和加入时均可以快速响应, 弥补功率差额, 收敛到最优状态, 具有“即插即用”的能力和好的鲁棒性。

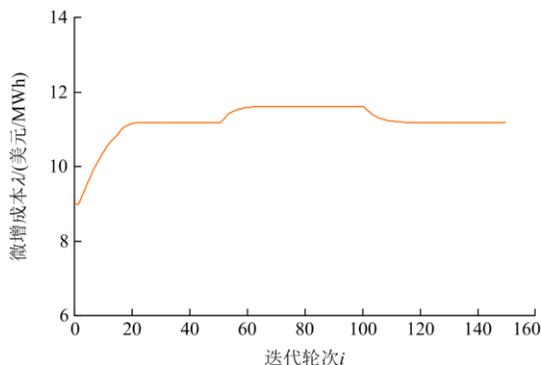


图 6 节点变动情况下微增量收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of incremental cost under node change

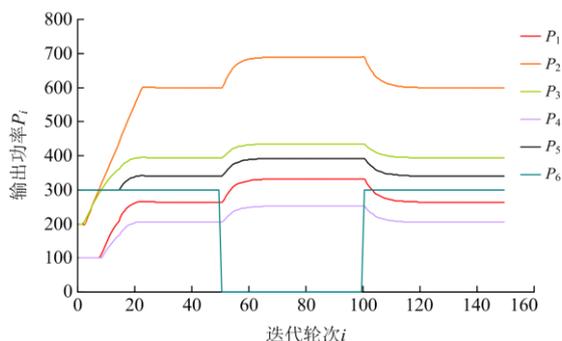


图 7 节点变动情况下各电源输出功率变化曲线

Fig. 7 Power change of each power supply under node change

3) 网损波动情况下分布式经济调度有效性实验结果

在网损波动情况下进行实验, 得到微增成本和节点输出功率变化曲线如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 可知, 在初始状态网损为负荷的 5% 时, 微增成本迭代 32 轮后收敛至 11.17 美元/MWh, 总输出功率与系统负荷及网损达到平衡。第 50 轮时网损变为负荷的 10%, 平衡状态被打破, 经过 27 轮迭代后, 微增成本再次收敛至 11.32 美元/MWh, 系统重新达到稳定, 此时各节点输出功率分别为 [286.06, 628.94, 407.34, 220.41, 357.08, 300.00] MW, 总输出功率为 2199.83 MW, 达到供需平衡。第 100 轮时, 网损变为负荷的 15%, 经过 30 轮迭代后微增

成本收敛至 11.46 美元/MWh, 此时各节点输出功率为 [308.84, 659.13, 421.17, 236.25, 374.52, 300.00] MW, 系统输出功率为 2299.91 MW, 等于系统负荷与网损之和。上述结果表明, 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略在网损波动时可以稳定工作, 快速实现微增成本收敛、系统供需平衡以及最优功率分配。

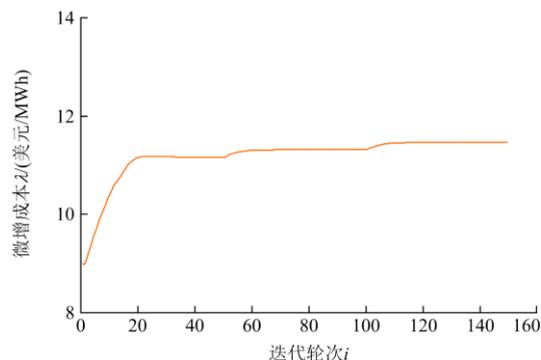


图 8 网损波动情况下微增成本曲线图

Fig. 8 Incremental cost curve under network loss fluctuation

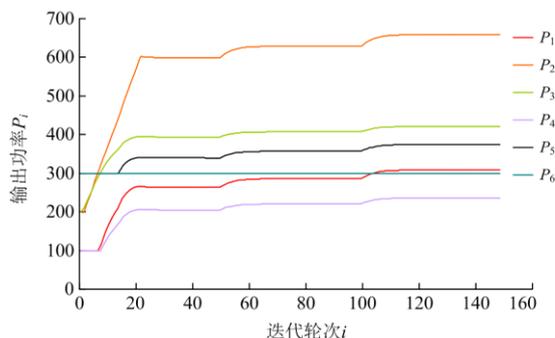


图 9 网损波动情况下各电源输出功率变化曲线

Fig. 9 Output power of each power supply under network loss fluctuation

5 结论

本文提出了基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略, 并对该策略的准确性、有效性、可拓展性、鲁棒性以及个体欺骗行为的应对能力进行了研究, 综合理论分析和仿真实验结果得出以下结论:

1) 本策略应用改进的区块链技术, 在迭代过程中直接从本地节点获取所需信息, 极大程度上减少了与相邻节点的信息交互, 避免了个体欺骗行为。同时, 智能合约与非对称加密算法等机制保障了经济调度的安全性。

2) 本策略的微增成本在迭代 30 轮左右即可达到全局最优功率分配, 文献[18]中的调度方案则需

要迭代 50 轮次左右,可见本策略可以快速高效地实现经济调度目标。

3) 本策略可以较好地应对配电网负荷大幅度波动、网损突变以及节点突然加入/退出的情况,具有良好的鲁棒性、稳定性以及可扩展性。

参考文献

- [1] 何惠清, 钱赟, 何炳源, 等. 基于机会约束的主动配电网动态经济调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 1-8.
HE Huiqing, QIAN Yun, HE Bingyuan, et al. Chance-constrained dynamic economic dispatch method for active distribution networks[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 1-8.
- [2] 朱云杰, 秦文萍, 于浩, 等. 基于神经网络的微电网参与上层电网实时优化调度策略[J]. 电力建设, 2020, 41(10): 9-19.
ZHU Yunjie, QIN Wenping, YU Hao, et al. Strategy based on neural network for microgrid participating in real-time optimal scheduling of upper grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 9-19.
- [3] 陈厚合, 王子璇, 张儒峰, 等. 含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2615-2625.
CHEN Houhe, WANG Zixuan, ZHANG Rufeng, et al. Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2615-2625.
- [4] 陈哲, 王槽裕, 郭创新, 等. 基于风险的多区互联电力系统分布式鲁棒动态经济调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 113-122.
CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Risk-based distributed robust dynamic economic dispatch for interconnected multi-regional power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 113-122.
- [5] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Zi'ang, et al. An improved droop control strategy based on consistency algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [6] 张津源, 蒲天骄, 李焯, 等. 基于多智能体深度强化学习的分布式电源优化调度策略[J/OL]. 电网技术: 1-10 [2021-11-06]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1737.
ZHANG Jinyuan, PU Tianjiao, LI Ye, et al. Distributed generation optimal scheduling strategy based on multi-agent deep reinforcement learning[J/OL]. Power System Technology: 1-10[2021-11-06]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1737.
- [7] 周晓倩, 艾芊. 配电网与多微网联合分布式鲁棒经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 23-30.
ZHOU Xiaoqian, AI Qian. Combined distributed robust economic dispatch of distribution network and multiple microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 23-30.
- [8] 伍益明. 恶意攻击下的多智能体系统安全一致性问题研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
WU Yiming. Research on security consistency of multi-agent system under malicious attack[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [9] YANG Feisheng, LIANG Xuhui, GUAN Xiaohong. Resilient distributed economic dispatch of a cyber-power system under DoS attack[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(1): 40-50.
- [10] LU Linyu, LIU Haojan, ZHU Hao. Distributed secondary control for isolated microgrids under malicious attacks[C] // 2016 North American Power Symposium (NAPS), September 18-20, 2016, Denver, CO, USA: 1-6.
- [11] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154-163.
ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatching model of virtual power plant considering power consumption behavior under carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 154-163.
- [12] 宋汶秦, 吕金历, 赵玲霞, 等. 光热-风电联合运行的电力系统经济调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 95-102.
SONG Wenqin, LÜ Jinli, ZHAO Lingxia, et al. Research on economic dispatching strategy of power system with combined operation of light, heat and wind power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 95-102.
- [13] 康慨, 邓少平, 张超, 等. 考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 60-67.
KANG Kai, DENG Shaoping, ZHANG Chao, et al. Robust economic dispatch model of microgrid considering tie line power stability[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 60-67.
- [14] DUAN Yuzhu, HE Xing, ZHAO You. Distributed algorithm based on consensus control strategy for dynamic economic dispatch problem[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 129(1).
- [15] LEBLANC H J, ZHANG Haotian, KOUTSOUKOS X,

- et al. Resilient asymptotic consensus in robust networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(4): 766-781.
- [16] DIBAJI S M, ISHII H. Consensus of second-order multi-agent systems in the presence of locally bounded faults[J]. Systems & Control Letters, 2015, 79: 23-29.
- [17] MONSHIZADEH N. The cost of dishonesty on optimal distributed frequency control of power networks[C] // 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), December 12-14, 2016, Las Vegas, NV, USA: 1-6.
- [18] 乐健, 周谦, 赵联港, 等. 考虑个体欺骗的有源配电网完全分布式经济调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5445-5454.
LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Fully distributed economic dispatch of active distribution network considering individual cheating[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5445-5454.
- [19] 姜鑫, 王飞. 区块链技术及应用综述[J]. 电脑与电信, 2021(5): 25-29.
JIANG Xin, WANG Fei. Overview of blockchain technology and application[J]. Computer and Telecommunications, 2021(5): 25-29.
- [20] 翟冉, 陈学斌. 区块链的共识机制研究[J]. 数据与计算发展前沿, 2021, 3(3): 86-94.
ZHAI Ran, CHEN Xuebin. Research on consensus mechanism of blockchain[J]. Frontier of Data and Computing Development, 2021, 3(3): 86-94.
- [21] 朱瑾, 许智颖. 区块链技术的应用与展望[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2021, 36(3): 267-274.
ZHU Jin, XU Zhiying. Application and prospect of blockchain technology[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science Edition), 2021, 36(3): 267-274.
- [22] 刘玉成, 段炼, 班晓萌, 等. 基于区块链技术的园区级综合能源系统能量交互[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 30-38.
LIU Yucheng, DUAN Lian, BAN Xiaomeng, et al. Blockchain technology for distributed energy scheduling method of district-level integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 30-38.
- [23] ANNA V, ANDREA D S, CORRADO A V, et al. A systematic literature review of blockchain and smart contract development: techniques, tools, and open challenges[J]. Journal of Systems and Software, 2020, 174: 1-19.
- [24] XU Yuntao, YANG Xingyu, ZHANG Jiale, et al. Proof of engagement: a flexible blockchain consensus mechanism[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2021, 21: 1-10.
- [25] HUG G, KAR S, WU Chenye. Consensus + innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1893-1903.
- [26] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 60-68.
YANG Hongchao, YANG Di, MENG Ke. Multi time scale coordinated optimal dispatch of multi virtual power plants under the penetration of high proportion of renewable energy[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 60-68.
- [27] SAADAT H. Power system analysis[M]. Second Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [28] 陈怡, 蒋平. 电力系统分析[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2018.

收稿日期: 2022-01-19; 修回日期: 2022-07-11

作者简介:

邸 剑(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为物联网技术及应用; E-mail: dijian6880@163.com

臧齐齐(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为区块链技术及应用; E-mail: 2575644077@qq.com

王桂兰(1979—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为区块链技术与应用、大数据分析。E-mail: wang.guilan@163.com

(编辑 姜新丽)