基于区块链的电力系统最优潮流分布式求解算法

周 佳[1], 李如诗[1], 王立京[1], 周 鑫[1], 赵 鹏[2]
(1. 国网北京市电力公司,北京 100031; 2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:最优潮流OPF问题的解决对于保证电网的稳定运行和效率至关重要。针对此问题提出了一种新颖的区块链共识算法解决电力系统中的OPF问题,该算法利用交替方向乘子法(ADMM)将OPF问题分解为局部子问题,并集成到区块链协议中。通过在IEEE-57和IEEE-118基准系统上的模拟实验验证了算法的有效性和优越性。与现有的区块链共识算法相比,本算法在迭代次数和计算负载方面表现更优,同时保持了ADMM方法的收敛特性。本文提出的方法实现了电网节点间的去中心化共识,能够自适应电网的结构变化,具有良好的鲁棒性和可扩展性。

关键词:最优潮流问题;区块链;交替方向乘子法;电力系统;稳定性分析
DOI:10.15938/j.jhust.2026.04.011
中图分类号:TM73 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2683(2026)04-0112-09

Blockchain-based Optimal Power Flow Distributed Optimization Algorithm for Power Systems

ZHOU Jia[1], LI Rushi[1], WANG Lijing[1], ZHOU Xin[1], ZHAO Peng[2]
(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In current power systems, the resolution of the Optimal Power Flow (OPF) problem is crucial for ensuring the stable operation and efficiency of the grid. This paper proposes a novel blockchain consensus algorithm for tackling the OPF problem in power systems. The algorithm employs the Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) to decompose the OPF problem into local sub-problems, which are integrated into the blockchain protocol. The effectiveness and superiority of the algorithm are verified through simulation experiments on the IEEE-57 and IEEE-118 benchmark systems. Compared with existing blockchain consensus algorithms, the proposed algorithm exhibits better performance in terms of iteration times and computational load, while maintaining the convergence characteristics of the ADMM method. The proposed method achieves decentralized consensus among grid nodes, can adapt to the structural changes of the grid, and offers good robustness and scalability.

Keywords: optimal power flow problem; blockchain; alternating direction method of multipliers; power systems; stability analysis

0 引 言

随着可再生能源的大规模接入和电力市场的不断发展,电力系统正面临着前所未有的挑战和机遇。如何在保证电网安全稳定运行的同时,实现电力资源的优化配置和高效利用,已成为电力系统领域的重要研究课题[1-7]。最优潮流(optimal power flow, OPF)问题作为电力系统优化调度的核心问题之一,旨在满足各种物理和操作约束条件下,求解出电网

收稿日期:2024-07-31
基金项目:国家自然科学基金(52070018).
作者简介:周 佳(1990—),女,硕士,高级工程师;
李如诗(1995—),女,硕士,经济师.
通信作者:赵 鹏(1994—),男,博士,副教授,E-mail:13752865269@163.com.

的最优运行状态,最小化发电成本或网络损耗[8]。传统的 OPF 问题采用集中式优化的方法求解,需要将电网的全局信息集中到控制中心进行处理,难以适应日益复杂的电网结构和海量的数据处理需求[9]。

近年来,区块链技术以其去中心化、不可篡改、可追溯等特性受到学术界和工业界的广泛关注,被认为是解决电力系统面临挑战的潜在方案之一[10]。区块链通过密码学原理和共识机制实现了多方参与者之间的信任建立和价值传递,为电力系统的分布式优化控制提供了新的思路[11]。目前,国内外学者已经开展了一系列将区块链应用于电力系统的研究,涉及电力交易[12]、需求响应[13]、电动汽车充电[14]等多个场景,取得了丰富的研究成果。

在 OPF 问题求解方面,已有研究提出了多种分布式优化算法,试图通过局部信息交互实现全局最优解的收敛。其中,交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)以其良好的收敛性和鲁棒性得到广泛应用[15]。ADMM 通过引入拉格朗日乘子,将原问题分解为若干易于求解的子问题,通过迭代优化实现全局收敛。文[16]将 ADMM 应用于直流 OPF 问题,实现了发电机出力的分布式优化。文[17]进一步考虑了电压约束,提出了改进的 ADMM 算法用于交流 OPF 问题求解。然而,现有的分布式 OPF 算法大多依赖于中心节点进行信息同步和更新,难以适应电网的动态变化,且容易受到单点故障的影响。

针对上述问题,本文提出基于区块链的分布式 OPF 优化算法。该算法将 ADMM 分解后的子问题嵌入到区块链的共识过程中,通过区块链网络实现节点间的信息交互和同步,无需依赖中心节点。本文的主要贡献如下:

1)提出新颖的区块链共识机制,通过引入 ADMM 迭代过程,实现了电网节点间的分布式 OPF 求解。

2)针对 ADMM 算法在区块链这一特殊场景中的应用进行算法改进和优化,提高了收敛速度和计算效率。

3)在 IEEE-57 和 IEEE-118 标准测试系统上进行了仿真分析,验证了所提出算法的有效性和优越性。

4)对算法的收敛性和鲁棒性进行了理论分析,为算法在实际电网中的应用奠定了基础。

本文的主要创新点包括:首次将区块链技术与 ADMM 算法相结合,解决了电力系统 OPF 问题的分布式求解难题。针对性地对 ADMM 算法进行了改进,充分发挥了区块链技术的优势,提升了求解潮流问题的性能。通过理论分析和仿真验证,证明算法的可行性和有效性。

本文的章节安排如下:引言介绍了研究背景和意义,第 1 节对本文涉及的区块链和最优潮流相关概念进行阐述,第 2 节详细描述了所提出的基于区块链的分布式潮流优化算法,第 3 节通过仿真实验验证了算法的可行性和性能,最后对全文工作进行了总结,并展望未来的研究方向。

1　相关概念

1.1　区块链共识算法

区块链共识算法包括从网络节点生成到接受区块的过程,每种算法都有优缺点。共识算法在区块链的性能特征中发挥着重要作用,包括保证可扩展性、交易速度、交易最终性和安全性[18]。下文将简要介绍最重要和最广泛使用的算法。

1.1.1　工作量证明

工作量证明(proof of work, PoW)是区块链网络中的重要共识机制,用于确保网络的安全性并防止双花攻击等恶意行为。PoW 的基本原理是要求网络中的计算节点(即“矿工”)完成一定量的计算工作,以证明其合法性并获得打包交易的权利[19-20]。PoW 算法要求节点找到 1 个可接受的随机数(nonce),作为哈希输出的结果。找到随机数所需的平均工作量随着前导零的数量呈指数增长,节点无法预测或影响哈希算法的结果,而验证是否可接受随机数,只需执行 1 次哈希运算。各个相互独立的节点不断地解决这些哈希难题,形成竞争关系。PoW 目前被比特币、以太坊、莱特币和其他几种公共区块链所使用,其主要缺点是需要消耗大量能源进行哈希计算。

1.1.2　权益证明

权益证明(proof of stake, PoS)共识算法授予一些节点特殊权限,以生成新区块并保护区块链,网络中的成员信任这些授权节点[19-20]。为了维护授权节点集合,采用投票机制,授权节点负责密封新区块。对于联盟区块链网络,PoS 网络没有 PoW 的缺点,更加安全、计算量更小、效率更高,因为它提供了更低的交易延迟和更高的可预测性,区块以稳定的时间间隔发布。PoS 共识机制代表的是较为集中的方法,在安全性和完整性不能受到威胁的应用场景中,如电网应用,PoS 非常受欢迎。

1.2 ADMM 和最优潮流

如今,电力系统由用于发电、输电和耗电的物理基础设施及电力市场组成。电网由发电机和电力输送系统组成,通常分为远距离输电系统和供给工业和居民消费者的配电系统。电力市场管理现金流,由电力生产商、消费者、输配电运营商和监管机构组成[21]。能源系统中的市场均衡是通过在满足总需求的前提下最小化发电成本实现的,这就引出了最优潮流问题,该问题涉及最小化目标函数和满足相关约束条件[22]。本文考虑标准交流最优潮流问题,该问题最小化发电总成本,并满足潮流和运行限制。设 $\mathscr{B}$ 为系统母线集合,V_i、P_i 和 Q_i 分别为母线 i 的电压、有功功率和无功功率,$\forall i \in \mathscr{B}$。最优电力流问题可表述为

最小化 $f(\boldsymbol{x})$,满足约束:

$$\left.\begin{aligned} g(\boldsymbol{x}) &= 0 \\ h(\boldsymbol{x}) &\leqslant 0 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中:向量 $\boldsymbol{x}=\{(V_i,P_i,Q_i),\forall i\in\mathscr{B}\}$ 为系统的原始变量;函数 f、g 和 h 分别为总发电成本函数、潮流方程和系统的运行限制,均为 $\boldsymbol{x}$ 的函数。为了实现分布式求解最优潮流问题,本文将整个电网划分为多个子区域。相邻区域之间的输电线相互有重叠,连接外部相邻母线。为了实现分布式算法,本文通过复制每个区域边界母线的电压来解耦电力系统,如图 1 所示。

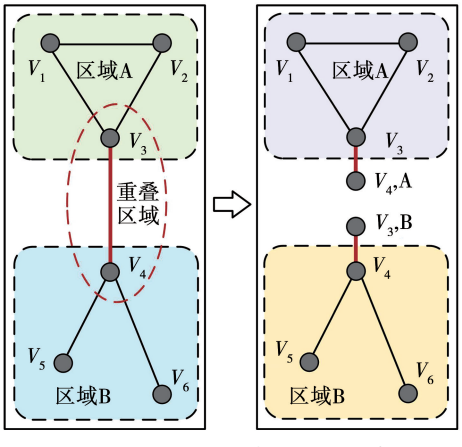


图 1 区域边界母线电压解耦示意图

Fig. 1 Schematic of regional boundary bus voltage decoupling

然后添加限制条件,以确保复制的电压彼此相等。$\boldsymbol{z}$ 为所有邻域之间接口电压的辅助变量,集合 $\mathscr{Z}$ 为 $\boldsymbol{z}$ 的可行域,即复制的电压必须相等。假设系统被划分为 k 个区域,则 OPF 问题可表述为

最小化函数 $f_k(\boldsymbol{x}_k)$,满足约束:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}_k &= \boldsymbol{z}_k \\ g_k(\boldsymbol{x}_k) &= 0 \\ h_k(\boldsymbol{x}_k) &\leqslant 0 \\ \boldsymbol{z} &\in \mathscr{Z} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{x}_k=\{(V_i,P_i,Q_i)\mid i\in\mathscr{B}_k\}$ 为区域 k 的原始变量向量;$\boldsymbol{A}_k$ 为转换矩阵;$\mathscr{B}_k$ 为区域 k 关联的母线集合;f_k、g_k、h_k 分别为区域 k 的总发电成本函数、潮流方程和限制条件。式(2)将 $\boldsymbol{z}_k$ 表示为 $\boldsymbol{x}_k$ 的函数,并确保全局辅助变量 $\boldsymbol{z}$ 的可行性,这是需要分解的约束,以实现完全去中心化。

ADMM 算法的目标是最小化增广拉格朗日函数:

$$L_k(\boldsymbol{x}_k,\boldsymbol{z}_k,\boldsymbol{\lambda}_k)=f_k(\boldsymbol{x}_k)+\boldsymbol{\lambda}_k^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}_k-\boldsymbol{z}_k)+\frac{1}{2}\|\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}_k-\boldsymbol{z}_k\|_{\rho_k}^2 \tag{3}$$

式中:ρ 为惩罚参数向量,其分量在迭代过程中自适应调整[23],以确保加速 ADMM 的收敛性[24];$\boldsymbol{\lambda}_k$ 为区域 k 的总利润函数。局部 ADMM 的第 $v+1$ 次迭代包括以下步骤:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}_{k,v+1} &= \arg\min_{\boldsymbol{x}_k} L_k(\boldsymbol{x}_k,\boldsymbol{z}_{k,v},\lambda_{k,v}) \\ \boldsymbol{z}_{k,v+1} &= \arg\min_{\boldsymbol{z}_k} L_k(\boldsymbol{x}_{k,v+1},\boldsymbol{z}_k,\lambda_{k,v}) \\ \boldsymbol{x}_{k,v+1} &= \boldsymbol{\lambda}_{k,v}+\mathrm{diag}(\rho_{k,v})(\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}_{k,v+1}-\boldsymbol{z}_{k,v+1}) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

用 (k,l) 表示区域 k 和其相邻区域 l 之间的连接线,以下是 1 组约束条件:

$$\left.\begin{aligned} g_k(\boldsymbol{x}_k) &= 0 \\ \boldsymbol{x}_{k\min} &\leqslant \boldsymbol{x}_k \leqslant \boldsymbol{x}_{k\max} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

通常式(4)代表 ADMM 算法中的优化问题,但在分布式最优潮流问题中并非如此。在 OPF 问题中,$\boldsymbol{z}_k$ 指的是相邻区域之间的电压,因此区域 k 的 $\boldsymbol{z}_{k,v+1}$ 可以通过区域 l 的 $\boldsymbol{z}_{k,v}$ 和 $\boldsymbol{z}_{l,v}$ 的平均值来更新。变量 ρ 表示惩罚参数,其数值可能会在迭代过程中增加以确保加快收敛。在自适应惩罚参数方案中,对于任何区域 k,ρ_k 的更新公式如下[25]:

$$\tilde{\rho}_{k,v+1}=\begin{cases} \|\rho_{k,v}\|_\infty, \Gamma_{k,v+1}\leqslant\gamma\Gamma_{k,v} \\ \tau\|\rho_{k,v}\|_\infty, \text{其它} \end{cases} \tag{6}$$

$$\rho_{k,(ij),v+1}=\max\{\tilde{\rho}_{k,(ij),v+1},\tilde{\rho}_{l,(ji),v+1}\} \tag{7}$$

式中:下标 ij 为区域 i 对 j 相连的边界/联络线所维护的量;下标 ji 为区域 j 对 i 相连的同一条边界/联络线所维护的量;变量上方的波浪号代表此值为临时中间迭代值;$0<\gamma<1$ 和 $\tau>1$ 为常数,Γ_k 的计算公式如下:

$$\Gamma_k=\|\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}_k-\boldsymbol{z}_k\|_\infty \tag{8}$$

式(7)表示在每次迭代中,区域 k 和 l 之间每条

连线(ij)都会选择$\{\rho_k,\rho_l\}$中的最大值ρ。因此,如果某个ρ_k值增长到∞,则网络中所有值均为∞。在第 3 节的实验中设置$\tau=1.02$、$\gamma=0.99$。

2　基于 OPF 共识的最优潮流证明

本文提出基于 OPF 的区块链新共识算法,最优潮流证明(proof of OPF, PoOPF)。PoOPF 算法兼具工作量证明和权益证明算法的部分特性,但其设计目的并非作为通用共识算法,而是专门为电网中具有自主决策能力的节点进行设计。PoOPF 算法可根据电网的物理特性和经济特性,为节点提供最优的发电决策。与 PoW 和 PoS 算法相比,三者在区块生成机制上存在显著差异:PoW 算法在节点解决问题时生成区块;PoS 算法在区块生成周期到期时生成区块;而 PoOPF 算法则在所有节点向总线发送局部解时生成区块。PoOPF 算法的区块生成过程可通过 ADMM 算法实现。在不失一般性的情况下,假设每个区域由单总线组成,如图 2 所示。PoS 具有固定的区块生成周期,而 PoOPF 每个区块的交易数量等于总线的数量,PoW 既没有固定的区块生成周期,也没有固定的交易数量,而是在节点解决哈希问题时生成区块。图 2(a)展示了创建两个连续的区块经过的时间。在 PoS 中,此时间在每个区块链的创始区块中定义,图 2(a)中设置为 5 s,在 PoW 和 PoOPF 共识算法中,这个时间是可变的。在 PoW 中,节点解决哈希计算问题的时间并不固定,在 PoOPF 中,时间也会变化,因为区块链网络会处于空闲状态,等待接收包含局部解的交易,在此期间,各个节点不会消耗能量。

与 PoW 类似,PoS 也需要求解哈希问题。其特殊之处在于,通过将生成区块数设置为 ADMM 迭代次数,即每次迭代生成 1 个包含所有局部解的区块,可以最小化通信开销。图 2(b)显示了每个区块包含的交易数量,在 PoS 和 PoW 中,这个数量是变化的。相反,在 PoOPF 共识中,只有当所有节点的交易都到达将要签名下一个区块的节点的交易池中,区块生成过程才会开始。这意味着每个区块包含的交易数量等于电网节点的数量。当节点求解出局部最优问题时,就会立即发送区块的交易,这个行为是由 ADMM 算法定义的。PoOPF 共识使用签名者的角色,也就是生成区块的节点是被授权的节点,并不需要做挖矿的工作。

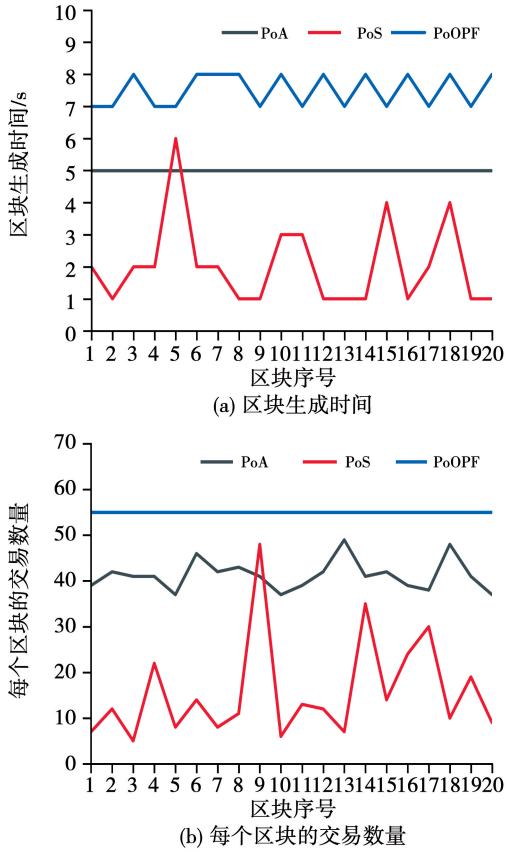


图 2　不同共识算法的区块生成时间和每个区块交易数量的比较

Fig. 2　Comparison of block generation time and the number of transactions per block for different consensus algorithms

2.1　局部解和区块的生成

如 1.2 节所述,电网被划分为不同区域,应对每个区域单独求解局部潮流优化问题。在本文提出的 PoOPF 区块链共识算法中,每个电网节点形成 1 个区域,每个区域有且只有 1 个区块链节点,如图 3 所示。每个区域使用局部 ADMM 求解器解决其局部潮流问题,并创建包含解的区块链交易。该交易首先发送到邻近节点,然后根据区块链协议广播到整个网络。图 4 为本文算法的整体架构。

PoOPF 算法的整体架构如图 5 所示。获得生成新区块权限的节点成为封闭节点后,生成包含所有交易的新区块并广播到 P2P 网络,每个区块链节点均存储整个区块链的副本。通过将签名者生成的新区块添加到它们的本地链中,区块链网络节点认同这是 ADMM 算法的最新迭代。使用这种方法,接收到包含所有电力网络节点所有局部解的新区块的区块链节点在全局状态上达成一致,电力网络节点开

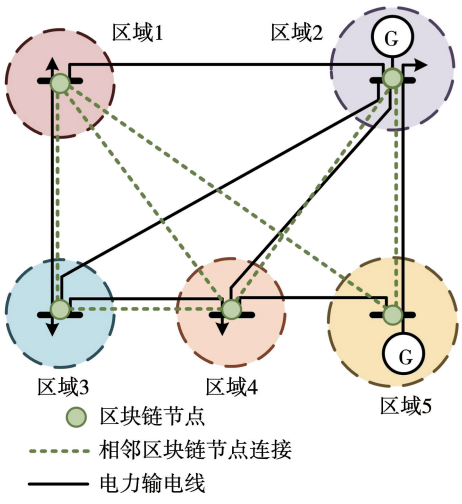


图 3 不同区域间信息和能量连接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of information and energy connections among different regions

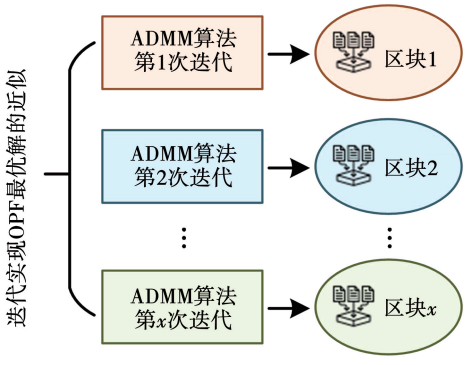


图 4 ADMM 算法迭代示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ADMM algorithm iteration

始计算它们的下一个局部解。全局状态是去中心化区块链网络所有变量的状态,由交易执行不断更新。除了使所有节点一致信任 OPF 问题的解以外,PoOPF 区块链共识还使用区块生成过程充当 ADMM 协调器。值得注意的是,所有区块链节点都在创世区块中注册为签名者。PoOPF 分阶段运行,在每个阶段中,选举 1 个签名者作为封装领导者并提议 1 个新区块。通过此过程,每个节点在每 N 个区块中仅操作 1 次网络,其中 N 为节点数量。因此,这个节点与其他节点相比并无特殊之处。

如果 1 个节点的行为恶劣,例如不发送本地解或提议不包含所有交易的区块,其他节点将拒绝该节点提议的区块,并将恶意节点投票出局,将其从授权密封者名单中移除,程序将在没有恶意节点的情况下重新计算。因此,如果向电网中添加了 1 个新节点,它也必须被添加到密封者名单中。为此,已授

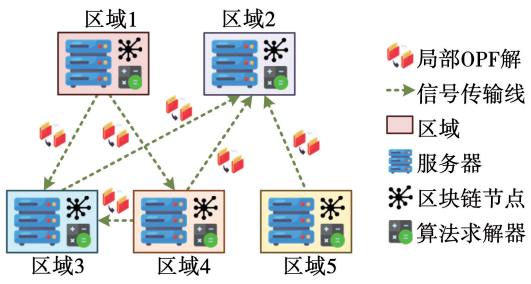


图 5 PoOPF 算法的整体架构

Fig. 5 The overall architecture of the PoOPF algorithm

权的节点可以随时发送反对或赞成某个节点的投票。如果某个节点获得其余大部分节点的投票,该节点会被加入或删除授权密封者清单。PoOPF 算法创建了 1 个基于节点声誉的投票系统,如果有权节点行为不端或效率不高,它将被迅速驱逐出区块链网络,共识过程不受影响。值得注意的是,PoOPF 共识本质上具有传统 ADMM 迭代方案的收敛特性。本文提出的整体程序本质上是将 ADMM 与 PoOPF 共识及相关区块链网络相结合,区块链共识算法只提供完全遵循 ADMM 算法细节的通信和控制机制。PoOPF 的另一个特点是,由于其分布式性质,可能会出现性能瓶颈。如果 1 个节点的计算资源有限或者局部优化问题较困难,区块生成过程将以最慢节点的速度进行。为了应对这个问题,PoOPF 假设网格的分区是均衡的,每个区域只包含 1 个节点,瓶颈现象发生的可能性较小。

2.2 共识算法对比

表 1 根据最显著的 4 个基本特征,从算法理论实现上分析比较 PoW、PoS、PoOPF 3 种共识算法。

表 1 PoW、PoS、PoOPF 机制的基本特征对比

Tab. 1 Comparison of basic characteristics of PoW, PoS, and PoOPF mechanisms

特征	PoW	PoS	PoOPF
能源效率	低	中等	高
区块生成速度	低	快	自适应
去中心化程度	高	慢	中等
选择矿工的随机性	高	中等	低

1)电能消耗:在能耗方面,由于区块链节点持续进行哈希计算,并相互争夺创建下个区块的机会,因此 PoW 是效率最低的算法。在 PoS 机制中,节点在预设的时间到期时生成 1 个区块,节点之间不存在竞争。如果在采用 PoS 共识的区块链网络上部署解决 OPF 问题的分布式求解程序,固定的区块生成

周期意味着某个节点可以在所有节点发送局部解之前生成 1 个区块。每次 ADMM 迭代 PoOPF 算法都会生成 1 个区块,这样既可以最小化生成和广播到区块链网络的区块数,也可以最小化通信和区块生成的带来的计算负载。通过将块数设置为 ADMM 迭代次数,PoOPF 的网络能源消耗低于 PoW 和 PoS,去中心化数据库中存储的区块数据量要求也最少。

2)区块生成速度:如 1)中所述,在 PoW 中,区块生成速度取决于矿工求解哈希问题的效率。在 PoS 中,这一速度是已经确定的,而在 PoOPF 中,这一速度是可变的,该速度与网络节点求解局部 OPF 问题的算法效率成正比。

3)去中心化程度:区块链系统在架构上是去中心化的,而在逻辑上是集中式的。架构去中心化是指不存在设备的单点故障,以及没有人能控制单个节点。逻辑集中化的含义是,系统的整体行为就像 1 台计算机。PoW、PoS 和 PoOPF 共识算法在去中心化程度上有所不同:在公共 PoW 网络中,任何区块链节点都可以加入网络并成为矿工;在公共 PoS 网络中,任何区块链节点都可以加入网络,而生成新区块的节点由网络其他部分选择和授权;在 PoOPF 区块链网络中,所有区块链网络节点都与电网节点一一对应,它们都有生成新区块的权限。

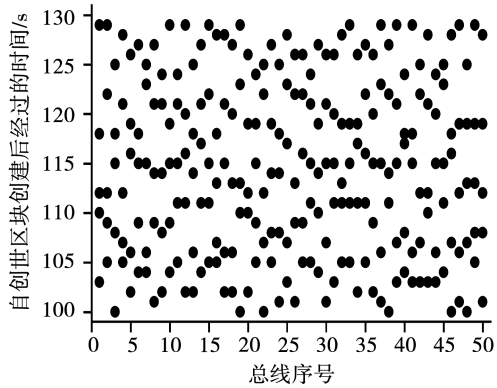
4)选择矿工的随机性:在 PoW 算法中,由首个解出哈希问题的节点生成下一个区块,在 PoS 和 PoOPF 中,算法循环执行。在 PoS 共识算法中,签名者的封装频率被限制为每经过 $N_F/2$ 轮封装 1 次,其中 N_F 为封装者的数量;而在 PoOPF 共识算法中,此频率被限制为每经过 N_F 轮封装 1 次。

3　仿真实验

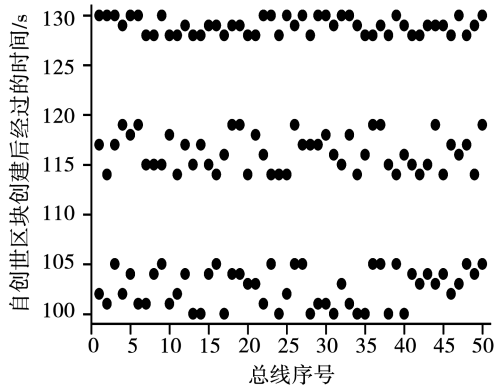
接下来,通过实验验证区块链如何在保证效率和精度的前提下,使用 ADMM 算法求解交流潮流优化问题。将本文提出的方法在 MATPOWER 系统测试案例存档中选择的广域网络进行测试,使用 PYPOWER软件进行交流潮流优化公式化,并使用 PYPOWER 内点法(interior point method, IPM)解决优化问题。本文考虑了 39 节点、57 节点和 118 节点的网络规模。对于 ADMM 算法的实现,本文参考文[26]中提出的方法,即本文将文献中使用单播管道进行邻域区域通信的基本实现与本文介绍的使用区块链作为通信手段的实现进行比较。

本章的仿真实验将基于区块链的共识算法 PoOPF、基于 PoS 和 PoW 共识算法的区块链实现及使用单播通信管道的 ADMM 实现(后文简称 uComm)进行对比。为实现区块链点对点网络,本文使用了以太坊的区块链实现,并用 Solidity 开发智能合约。实验在配备 2 个 Intel Xeon 6 核 2.40 GHz 处理器的 DELL Precision 台式计算机上进行。在本章的所有实验中,节点计算其潮流优化问题的局部解,并使用交易将该解提交到区块链网络,交易数据字段包含局部解。节点提交交易后,需等待局部解被包含在 1 个区块中,然后才进行下一次迭代。PoOPF 共识算法为所有节点提供同步机制,因为只有在收到所有节点发送的局部解后,才会生成 1 个新的区块。这种机制最大限度地减少了节点等待下一个区块生成的时间。需要注意的是,本文中提到的等待时间是指从最后一个局部解发送到区块生成所经历的时间。

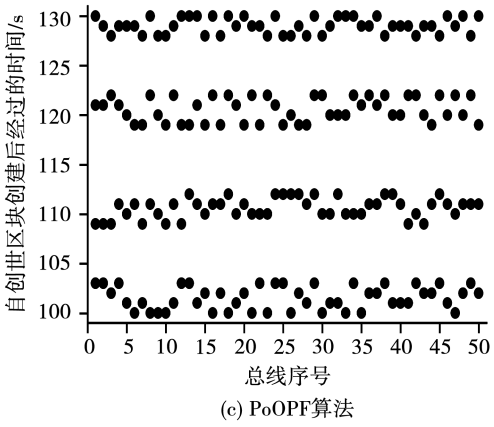
图 6 描述了区块生成过程,比较了 3 种不同的区块链共识算法。图中的点表示每个电网节点以交易形式发送局部解的时刻。在图 6(a)和图 6(b)中,每个节点发送其交易并等待交易被打包进区块中,然后才计算下一个局部解。图 6(c)说明了 PoOPF 如何同步节点并最小化等待时间。



(a) PoW算法



(b) PoS12 算法



(c) PoOPF算法

图6 IEEE-57基准测试中不同算法的生成区块的时间

Fig. 6 Time taken by different algorithms to generate blocks in the IEEE－57 benchmark test

由图可见,基于IEEE-57总线系统,在PoS算法中,节点有足够的时间完成其局部计算并发送交易,然后再生成区块,而只有在PoOPF算法中,区块是在最后一笔交易发送到网络后立即生成的。在PoS算法中,需要大量的等待时间。在PoOPF算法中,这些交易的数量等于电网节点的数量,而在其他共识算法中,随着区块生成频率的增加,交易数量减少,与图2结果一致。表2为不同算法的实验参数设置和实验结果,使用单播管道的ADMM(称为uComm)在时间上收敛得更快,在57节点测试案例中无智能合约时,uComm需要516 s和190次迭代才能收敛,PoS需要1 823 s和151次迭代(区块数量为8),而PoOPF需要1 165 s和151次迭代。

表2 不同算法的实验参数设置和实验结果

Tab. 2 Experimental parameter settings and results of different algorithms

节点数量	算法	区块数量	时间/s		误差/%		迭代次数/次		Gas费用/10^9	
			无	有	无	有	无	有	无	有
39	PoW	自动	894	1 188	55.10	4.13	204	258	0.55	1.97
	PoS	3	505	1 092	66.44	9.61	115	233	0.31	1.83
		5	1 018	1 075	8.43	9.98	204	250	0.60	1.69
		8	1 368	1 227	2.86	8.36	172	277	0.51	1.43
	PoOPF	自动	900	—	2.98	—	170	—	0.49	—
	uComm	—	376	—	3.78	—	196	—	—	—
57	PoW	自动	1 413	1 457	23.49	7.82	224	216	0.86	2.74
	PoS	3	2 337	1 541	6.54	7.53	355	227	2.10	4.31
		5	2 246	1 569	7.30	6.34	337	237	1.98	2.91
		8	1 657	1 682	7.78	8.20	205	253	1.31	2.91
		12	1 823	1 921	3.46	6.32	151	281	0.97	1.99
	PoOPF	自动	1 165	—	3.31	—	151	—	0.73	—
	uComm	—	516	—	7.68	—	190	—	—	—
118	Pow	自动	6 785	2 088	12.29	3.81	462	142	4.45	3.94
	PoS	5	1 891	2 160	73.44	7.22	128	116	1.26	3.11
		8	187	2 073	10.97	5.69	148	128	1.43	3.31
		12	2 107	2 612	17.06	11.04	146	152	1.39	3.76
	PoOPF	自动	2 209	—	4.64	—	94	—	1.00	—
	uComm	—	840	—	7.09	—	145	—	—	—

注:“有”“无”分别表示有无智能合约。

PoOPF共识算法为ADMM算法提供了有效的同步,从而减少了迭代次数。由于原始uComm实现单播通信的性质,各区域仅与其邻居进行部分同步的ADMM迭代步骤。具体来说,每个区域只在收到所有邻居的局部解后,才继续进行下一次迭代并计算其下一个本地解决方案,该结果与测试案例的结果一致。具体而言,由表2可见,对于39节点系统,PoOPF算法需要170次迭代才能收敛,而uComm需要196次;对于57节点系统,PoOPF需要151次迭代,uComm需要190次迭代;对于118节点系统,

PoOPF 需要 94 次迭代,uComm 需要 145 次迭代。除了性能指标(时间和迭代次数)之外,本文还比较每个实验提供的解的质量指标(如误差),误差量化了分布式电流问题求解和集中式求解之间的归一化差异,如下:

$$\left(\sum_k f_k(\boldsymbol{x}_k) - f(\boldsymbol{x})\right)\frac{100}{f(\boldsymbol{x})} \tag{9}$$

式中:$f(\boldsymbol{x})$为使用集中式方法和 PYPOWER 软件求解 OPF 问题的解,而$f_k(\boldsymbol{x}_k)$为区域 k 的局部解。除了 39 节点系统外,PoOPF 提供的解决方案的误差小于所有其他解决方案,包括 uComm 实现。为了改善使用 PoS 和 PoW 共识算法时节点之间的同步,本文开发了简单的智能合约来存储节点提供的局部解。在没有使用智能合约的实验中,节点接收新区块并从交易中读取局部解。在使用智能合约的新实验中,包含在区块中的交易更新了合约的存储,节点从中读取解。实验结果在表 2 中列出,在有智能合约的列中,可以注意到以下几点:

1)对于 IEEE-39 节点电力系统,PoW 和 PoS 算法解决方案的质量显著提高。

2)对于 IEEE-57 电力系统,PoW 算法对解的质量有明显改善。

3)对于 IEEE-118 基准系统的所有实验,误差最小,但性能指标有好有坏。对比所有实验中使用的 Gas 费用,不使用智能合约的实验在区块链网络上需要的 Gas 费用远远少于使用智能合约的实验,开启智能合约需要 2 到 3 倍的 Gas 费用。这意味着在区块链网络上使用智能合约的计算要贵 2 到 3 倍,主要是由于需要维护智能合约存储。结果表明,智能合约可以改善误差大于 10% 的解,但与 PoOPF 算法相比,智能合约没有显著提升解的性能和质量。

4　结　语

本文的主要贡献在于设计、实验实施和分析了一种创新的区块链共识算法 PoOPF。该算法使得缺乏相互信任的电网节点能够就最优潮流(OPF)问题的解决方案达成共识。PoOPF 算法建立在广泛使用的 ADMM 算法基础之上,将 OPF 问题划分为局部子问题,并与相关的区块链协议进行集成。实验分析表明:本文提出的 PoOPF 算法在多个方面优于现有的共识算法。具体而言,PoOPF 在减小 OPF 解的误差、减少迭代次数及降低计算量等方面表现出色。此外,PoOPF 算法还具备现有算法无法提供的新特性。首先,PoOPF 算法能够自适应 OPF 问题的需求,即使电网发生重大结构性变化,PoOPF 也能计算出高质量和鲁棒的解。其次,PoOPF 算法与 ADMM 方法的紧密关联使其能够实时监测解的求解步骤,并赋予 PoOPF 抵御攻击的能力。

本文所提出的 PoOPF 算法已达到较高的技术成熟度,展现出良好的应用前景。下一步考虑开展现实电网中的试点研究,以验证算法在实际电力系统中的可行性和可扩展性。下一步工作包括但不限于:最小化区块链协议带来的额外开销,以便在实时能源市场中应用 PoOPF;研究所提出方法在优化速度的 ADMM 算法中的有效性,并深入探讨算法的安全稳健性问题。

参 考 文 献:

[1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and Prospects for Constructing the New-type Power System towards a Carbon Neutrality Future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806.

[2] FARGHALI M, OSMAN A I, MOHAMED I M A, et al. Strategies to Save Energy in the Context of the Energy Crisis: A Review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21(4): 2003.

[3] 李琮琮,王清,荆臻,等. 面向新型电力系统的电能质量扰动分类研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 111.
LI Congcong, WANG Qing, JING Zhen, et al. Research on Classification of Power Quality Disturbance in Novel Power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025,62(11): 111.

[4] 孙秋野, 钱本华, 胡杰. 从智能电网到新型电力系统[J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46(5): 579.
SUN Qiuye, QIAN Benhua, HU Jie. From Smart Grid to New Power System[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(5): 579.

[5] 王伟臣, 林海源. 极端冰雪天气下多阶段电力系统韧性提升方法研究[J]. 东北电力大学学报, 2025, 45(2): 59.
WANG Weichen, LIN Haiyuan. Research on Multi-stage Resilience Enhancement Methodology for Power Systems under Extreme Ice-snow Weather Events[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2025, 45(2): 59.

[6] 禹晋云,王玉俊,乔柱桥,等. 新型电力系统中数字化换流站人机协同故障处置装置研制及应用[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 91.
YU Jinyun, WANG Yujun, QIAO Zhuqiao, et al. Devel-

opment and Application Research of Human-machine Collaborative Fault Handling Device for Digital Converter Station in Novel Power System[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025,62(8): 91.

[7] 陈致远, 杨翾, 李凌. 用地空间信息感知技术在电力系统负荷预测中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2025, 47(3): 273.
CHEN Zhiyuan, YANG Xuan, LI Ling. Application of Land Spatial Information Perception Technology in Power System Load Forecasting[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2025, 47(3): 273.

[8] 殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1359.
YIN Shuangrui, AI Qian, ZENG Shunqi, et al. Challenges and Prospects of Multi-energy Distributed Optimization for Energy Internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1359.

[9] GENG Y, ZHANG N, ZHU R. Research Progress Analysis of Sustainable Smart Grid Based on CiteSpace[J]. Energy Strategy Reviews, 2023, 48: 101111.

[10] 王蓓蓓, 李雅超, 赵盛楠, 等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 53.
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key Technologies on Blockchain Based Distributed Energy Transaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53.

[11] YAP K Y, CHIN H H, KLEMES J J. Blockchain Technology for Distributed Generation: A Review of Current Development, Challenges and Future Prospect[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 175: 113170.

[12] WANG Y, LIU Z, WANG J, et al. A Stackelberg Game-based Approach to Transaction Optimization for Distributed Integrated Energy System [J]. Energy, 2023, 283: 128475.

[13] 王蓓蓓, 王骐鑫, 李雅超, 等. 区块链环境下考虑信用的需求响应资源交易机制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 30.
WANG Beibei, WANG Qixin, LI Yachao, et al. Transaction Mechanism of Demand Response Resource Considering Credit in Blockchain Environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 30.

[14] SU Z, WANG Y, XU Q, et al. A Secure Charging Scheme for Electric Vehicles with Smart Communities in Energy Blockchain[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4601.

[15] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers [J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2011, 3(1): 1.

[16] BIAGIONI D, GRAF P, ZHANG X, et al. Learning-accelerated ADMM for Distributed DC Optimal Power Flow [J]. IEEE Control Systems Letters, 2022, 6: 1.

[17] FAN H, DUAN C, ZHANG C K, et al. ADMM-based Multiperiod Optimal Power Flow Considering Plug-in Electric Vehicles Charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3886.

[18] MAHMUD R, SEO G S. Blockchain-enabled Cyber-secure Microgrid Control Using Consensus Algorithm[C]// 2021 IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL), 2021: 1.

[19] 刘懿中,刘建伟,张宗洋,等. 区块链共识机制研究综述[J]. 密码学报,2019,6(4):395.
Liu Y Z, Liu J W, Zhang Z Y, et al. Overview on Blockchain Consensus Mechanisms[J]. Journal of Cryptology, 2019, 6(4):395.

[20] 王群,李馥娟,王振力,等. 区块链原理及关键技术[J]. 计算机科学与探索,2020,14(10):1621.
Wang Q, Li F J, Wang Z L, et al. Principle and Core Technology of Blockchain[J]. Computer Science and Exploration, 2020, 14(10):1621.

[21] STRELKOV M, STRELKOVA H, ISHCHENKO O. Integrated Electricity Market System[C]//2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019: 359.

[22] YOUNESI A, SHAYEGHI H, WANG Z, et al. Trends in Modern Power Systems Resilience: State-of-the-art Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 162: 112397.

[23] 仇成, 赵万剑, 李新聪, 等. 基于节点电价的有源配电网智能软开关优化配置[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2024, 29(4): 114.
QIU Cheng, ZHAO Wanjian, LI Xincong, et al. Optimal Configuration of Intelligent Soft Switches in Active Distribution Networks Based on Locational Marginal Price[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2024, 29(4): 114.

[24] 何宇斌. 电-气综合能源系统的随机优化和分布式调度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[25] ERSEGHE T. A Distributed Approach to the OPF Problem[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015, 2015(1): 45.

[26] GUO J, HUG G, TONGUZ O K. A Case for Nonconvex Distributed Optimization in Large-scale Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3842.

(编辑:温泽宇)