

基于电网线路传输安全的电力市场分布式交易模型研究

李远征¹ 张虎¹ 刘江平² 赵勇¹ 连义成¹

摘要 电力市场分布式交易模型可有效缓解传统集中模型下市场主体的隐私安全等问题,但难以在保障市场主体收益和电力系统安全稳定运行的同时,实现社会福利最大化.因此,基于电网线路传输安全,首先以社会福利最大化为目标,构建集中式交易模型,并采用拉格朗日乘子法和对偶定理,将其等价分解为各市场主体自身利益最大化的分布式交易模型.在此基础上,设计2种适用于不同情形的分布式交易方法及其求解算法,并构造电网安全成本影响市场主体的决策,从而保证电网线路传输安全.最后,基于算例分析,验证了2种交易方法的有效性.

关键词 区域配电网, 分布式电能交易, 线路传输安全, 市场交易模型

引用格式 李远征, 张虎, 刘江平, 赵勇, 连义成. 基于电网线路传输安全的电力市场分布式交易模型研究. 自动化学报, 2024, 50(10): 1938–1952

DOI 10.16383/j.aas.c211244

CSTR 32138.14.j.aas.c211244

Research on Distributed Power Market Trading Model Based on Grid Line Transmission Security

LI Yuan-Zheng¹ ZHANG Hu¹ LIU Jiang-Ping² ZHAO Yong¹ LIAN Yi-Cheng¹

Abstract The distributed power market trading model can effectively alleviate the problems among market entities such as privacy problem in the traditional centralized trading model. However, there is still a lack of distributed trading models that can maximize social welfare while ensuring the benefits of market entities and the safe and stable operation of the power system. Therefore, a centralized trading model with the objective of maximizing social welfare is constructed, which considers the power grid line transmission security. Then, it is equivalently decomposed into a distributed trading model that maximizes the interests of each market agent using the Lagrange multiplier method and dual duality theorem. On this basis, two distributed trading methods and the corresponding solution algorithms suitable for different scenarios are designed, and the grid security cost is used to influence the decision-making of market entities, thereby ensuring grid line transmission security. Finally, the effectiveness of the two trading methods are verified based on simulation analysis.

Key words Regional distribution network, distributed energy trading, grid transmission security, market trading model

Citation Li Yuan-Zheng, Zhang Hu, Liu Jiang-Ping, Zhao Yong, Lian Yi-Cheng. Research on distributed power market trading model based on grid line transmission security. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(10): 1938–1952

随着智能电网和能源互联网^[1]的快速发展,分布式电源^[2]和可控负荷^[3]在配电网中的比例不断提升.尤其在电力市场背景下,合理利用这些电力资源,可以显著提升配电网的运行效率.需要指出的是,此类电力资源一般体量较小,并且对于响应市

场电价动力不足^[4].在售配电侧市场逐步放开背景下^[5],降低传统集中式交易准入规模要求能在一定程度上缓解上述问题.但是,繁复的小规模交易会导导致电力市场的冗余计算问题^[6].其次,大量电压等级较低的分布式电源并网参与集中交易会配电网带来电能质量恶化、供电可靠性降低等挑战^[7].此外,在集中式交易模型下,负责组织交易的市场运营机构需要收集所有市场主体的报价等私有信息,因此市场主体隐私存在泄露的风险^[8].

为解决上述问题,现有的研究工作主要针对市场主体与交易模型2个方面进行探索.对市场主体方面的研究着重于将多个同类型分布式主体聚合为单一主体,使其达到市场准入规模要求,进而有效响应市场信息,以实现利益最大化,这种模型称为

收稿日期 2021-12-28 录用日期 2022-04-28

Manuscript received December 28, 2021; accepted April 28, 2022

国家电网总部科技项目(1400-202099523A-0-0-00)资助

Supported by Science and Technology Project of State Grid Headquarters (1400-202099523A-0-0-00)

本文责任编辑 孙秋野

Recommended by Associate Editor SUN Qiu-Ye

1. 华中科技大学人工智能与自动化学院 武汉 430074 2. 湖北电力交易中心有限公司 武汉 430077

1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 2. Hubei Electric Power Exchange Center Limited Company, Wuhan 430077

聚合商模型。田硕^[9]引入了电动汽车聚合商, 将其作为电动汽车和电力市场的中间商, 从而显著减少了交易主体数量, 提高了交易效率; 袁晓冬等^[10]利用资源聚合商整合柔性负荷等分布式资源, 解决了分布式资源数量多、布局分散、难以直接被电网调度问题。显然, 聚合商模型能有效利用分布式资源来响应市场机制, 并提高交易效率; 但聚合商模型的实施难点是如何使各参与主体在利益分配方面达成一致。此外, 各参与主体仍需将自身私有信息上报给所属聚合商, 因此本质上仍难以保障主体的隐私安全。

另一方面的研究着重于交易模型的设计。基于弱中心化或去中心化思想, 分布式交易模型可将集中模型下的大规模复杂问题转化为一系列简单子优化问题, 并由市场中的各交易主体分别独立求解, 从而避免了集中化交易模型的弊端。对该模型的研究如林俐等^[11]总结了国外分布式交易机制及其应用发展现状的研究, 并对中国未来分布式交易的发展进行了探讨; 蒋嗣凡^[12]指出, 对等 (Peer-to-peer, P2P) 交易是实现分布式交易模型的一种有效方法。在具体应用方面, 一些学者基于弱中心化思想, 将一个独立机构或实体作为协调者, 进行电能交易^[13]、提供辅助服务^[14]等, 但协调者的存在同样会对市场主体隐私安全造成一定威胁。鉴于此, Paudel 等^[15]使用拉格朗日松弛法, 将以社会福利最大化为优化目标的集中式市场出清问题, 分解为以各主体收益最大化为目标的一系列子优化问题, 并通过迭代求解得到交易结果, 该方法能达到与集中式市场出清相同的效果, 同时允许交易双方直接协商, 无须透露各自的隐私偏好。

上述研究虽能达到保护交易双方隐私或保障双方收益的效果, 却忽略了电网应满足的物理运行约束。对于能量交换, 电网有严格的安全运行约束, 违反这些约束将对电网造成严重影响^[16]。在电力市场改革的推动下, 未来市场对效率的追求将逐渐驱使电网运行逼近安全极限, 这使得在分布式交易中考虑网络安全约束显得尤为重要^[17]。因此, Guerrero 等^[18]提出一种适用于低压配电网的 P2P 电能交易方法, 并基于电压敏感性分析和功率传输分配因子, 以保证网络约束不会受到破坏, 但是其分析方法的核心理念为泰勒展开的一阶近似, 仅适合小规模、低参与度的分布式交易情形, 且未考虑社会福利最大化问题。针对新能源渗透率高的电力市场, Khorasany 等^[19]基于原始对偶定理, 设计一种 P2P 能源交易方法, 能够最大化社会福利, 并在分布式交易中考虑了电网的物理运行约束, 能够保障电力系统的安全稳定运行。但在该交易方法中, 没有充分考虑各

市场主体的自身利益最大化问题。Morstyn 等^[20]结合概率分布节点边际电价, 设计一种基于电力系统网络约束的 P2P 电能交易方法, 允许电能生产者和消费者以自身利益最大化为目标, 参与分布式交易。该方法虽能减少新能源发电浪费, 为整个系统创造价值, 但并未深入讨论如何实现系统整体收益最大化问题。

综上所述, 目前较为缺乏能够兼顾电力系统安全稳定运行要求和市场主体自身利益最大化并实现社会福利最大化的分布式交易模型。因此, 针对含大量分布式电源和柔性负荷的电力市场, 本文提出一种基于电网线路传输安全的分布式交易模型。首先, 构建一个含发电商与柔性负荷商, 以社会福利最大化为目标并考虑电网线路传输安全的电力市场双边交易模型; 然后, 基于拉格朗日松弛法和强对偶定理, 对该模型进行分解, 得到一系列子优化问题, 并设计相应的分布式交易方法及其求解算法, 该方法允许交易双方通过交换少量必要信息直接协商, 无须向市场运营机构上报大量私有信息, 可在一定程度上保护市场主体的隐私安全; 在此基础上, 为加快求解速度, 本文提出一种基于松弛管制的分布式交易方法及其求解算法, 并在不同的情形下, 对本文提出的 2 种算法的计算效率进行了对比。最后, 分别在 IEEE 9 节点和 IEEE 33 节点电力系统中进行算例分析, 验证了本文提出的 2 种分布式交易方法的有效性。本文创新点主要有以下 2 个方面:

1) 在电网分布式交易中, 考虑了线路传输安全, 设置了安全成本指标, 并根据交易结果是否满足安全约束计算出不同的安全成本, 进而影响柔性负荷商和发电商的购/售电策略, 促使交易结果满足安全约束, 保证了交易的安全性和可实施性。

2) 设计一种基于电网线路传输安全的分布式交易方法, 能在实现社会福利最大化的同时, 保障市场主体自身的利益; 另外, 为了提高计算效率, 提出了松弛管制分布式交易方法, 并分析了 2 种交易方法的适用情形。

本文结构如下: 第 1 节介绍了所研究的电力市场结构, 并在现行集中式交易模型基础上提出一种分布式交易模型; 第 2 节设计了相应的分布式交易方法及其求解算法; 第 3 节分别在 IEEE 9 节点和 IEEE 33 节点电力系统中进行实验, 验证了本文方法的有效性; 第 4 节对全文进行总结。

1 电力市场交易模型

为有效利用分布式资源, 并保证交易参与者的隐私安全和电力系统的安全稳定, 本文构建了基于

电网线路传输安全的分布式交易模型. 首先, 对电力市场结构以及发电商、柔性负荷商 2 类主要市场主体的经济特性和市场行为作了简要介绍; 然后, 考虑发电商和柔性负荷商的双边交易, 以社会福利最大化为目标, 建立了集中优化的电力市场交易模型; 最后, 基于拉格朗日松弛法和对偶定理, 对该模型进行分解, 旨在得到一个等价的分布式交易模型.

1.1 电力市场结构

本文面向电力市场, 并聚焦于单个时段 (1 h) 的交易问题. 本文研究的电力市场主要由配电网运营商、若干发电商和柔性负荷商组成, 结构如图 1 所示.

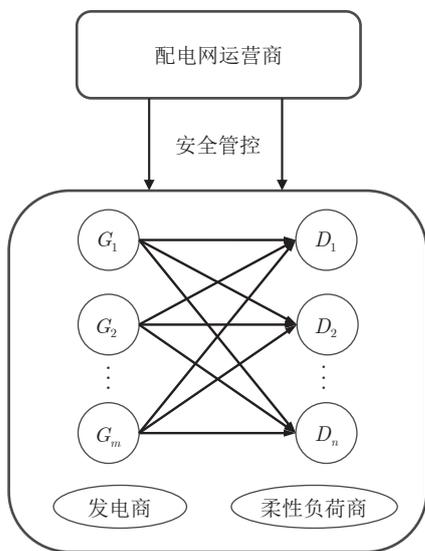


图 1 电力市场中的分布式交易
Fig.1 Distributed trading in the power market

配电网运营商不直接参与交易过程, 只是针对电力市场中的分布式交易进行线路传输安全的检验, 保证市场主体交易结果满足电力系统的线路传输安全. 假设有 m 个发电商, 记为 $G_i, i = 1, 2, \dots, m$; 有 n 个柔性负荷商, 记为 $D_j, j = 1, 2, \dots, n$. 为了简化, 假设每个发电商只有 1 台机组, 机组出力可控, 且在正常情况下, 机组出力上限和下限分别为该机组的额定有功功率和最小稳定技术出力. 柔性负荷主要指可削减负荷, 能改变某时段用电量以配合电力运营商的调度策略, 从而获得经济效益. 其需求在一定范围内可调节, 即具有用电需求上限和下限. 每个发电商都可同时与所有柔性负荷商协商, 以确定交易结果, 柔性负荷商与发电商同理. 这些主体都具有一定的灵活性, 且均以自身利益最大化为目标进行购电和售电决策, 并基于此, 确定交易结果, 市场根据它们的交易结果进行出清.

1.2 集中式交易模型

本文用 $\mathbf{P}_G = [p_{G,1} \ p_{G,2} \ \dots \ p_{G,m}] \in \mathbf{R}^{1 \times m}$ 表示发电商申报的供给向量, $p_{G,i}$ 表示发电商 i 申报的发电功率, 单位为 MW. 本文中的时间单位相同, 均为 1 h, 故下文省略时间单位. 同时, 采用式 (1) 所示的需求矩阵 $\mathbf{P}_D \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 表示市场主体间的双边交易结果, $p_{D,ji}$ 表示柔性负荷商 j 从发电商 i 处所购的电功率, 单位为 MW.

$$\mathbf{P}_D = \begin{bmatrix} p_{D,11} & \dots & p_{D,1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{D,n1} & \dots & p_{D,nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, 矩阵的第 j 行 $\mathbf{P}_{D,j} \in \mathbf{R}^{1 \times m}$, 表示柔性负荷商 j 的电力需求, 它可同时与多个发电商交易, 其总需求 $p_{D,j}$ 满足:

$$p_{D,j} = \sum_{i=1}^m p_{D,ji} \quad (2)$$

在集中优化的交易模型中, 交易开始前, 发电商和负荷商一般要向市场运营机构上报自身信息, 如报价、机组出力区间、用电需求区间等. 本文参照中国广东省的电力现货市场交易规则, 规定发电商和负荷商采取分段报价^[21]形式, 可得分段线性形式的发电商发电成本和柔性负荷商愿意支付的购电费用曲线, 如图 2 所示.

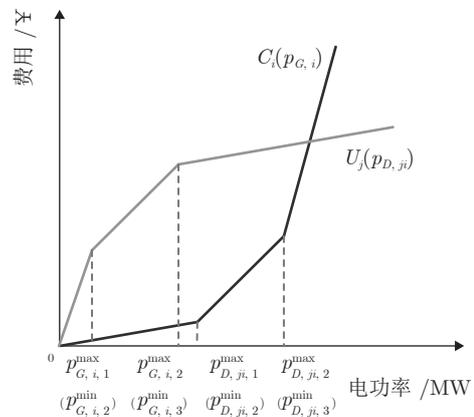


图 2 发电成本和购电费用曲线
Fig.2 Power generation and power purchase cost

图 2 中, $C_i(p_{G,i}) = \sum_{w=1}^{N_W} c_{G,i,w} \cdot p_{G,i,w}$ 为发电商 i 申报的发电成本. 其中 N_W 为发电商的允许报价区段总数, $c_{G,i,w}$ 为发电商 i 申报的第 w 个出力区间对应的售电价格, 单位为 $\text{¥}/\text{MW}$, 且需要满足报价非递减的规则; $p_{G,i,w}$ 为发电商 i 在第 w 个出力区间的中标电功率, 且有 $p_{G,i} = \sum_{w=1}^{N_W} p_{G,i,w}$ 和 $p_{G,i,w}^{\min} \leq p_{G,i,w} \leq p_{G,i,w}^{\max}$, 其中 $p_{G,i,w}^{\max}$ 、 $p_{G,i,w}^{\min}$ 分

别为发电商 i 申报的第 w 个出力区间的上界和下界。 $U_j(p_{D,j,i}) = \sum_{v=1}^{N_V} c_{D,j,v} \cdot p_{D,j,i,v}$ 为柔性负荷商 j 愿意支付的购电费用。其中 N_V 为柔性负荷商的允许报价区段总数, $c_{D,j,v}$ 为柔性负荷商 j 申报的第 v 个出力区间对应的购电价格, 单位为 ¥/MW , 且满足报价非递增的规则; $p_{D,j,i}$ 为柔性负荷商 j 在第 v 个出力区间的中标电功率, 且有 $p_{D,j,i} = \sum_{v=1}^{N_V} p_{D,j,i,v}$ 和 $p_{D,j,i,v}^{\min} \leq p_{D,j,i,v} \leq p_{D,j,i,v}^{\max}$, 其中, $p_{D,j,i,v}^{\max}$ 、 $p_{D,j,i,v}^{\min}$ 分别为柔性负荷商 j 申报的第 v 个出力区间的上界和下界。

因此, 社会福利可表示为:

$$Z(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m U_j(p_{D,j,i}) - \sum_{i=1}^m C_i(p_{G,i}) \quad (3)$$

然后, 考虑发电商和柔性负荷商间的双边交易及各项约束条件, 可建立如下以社会福利最大化为目标的电力市场出清模型:

$$\max_{\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D} Z(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D) \quad (4)$$

s.t.

$$p_{G,i} = \sum_{j=1}^n p_{D,j,i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$p_{G,i}^{\min} \leq p_{G,i} \leq p_{G,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$p_{D,j}^{\min} \leq \sum_{i=1}^m p_{D,j,i} \leq p_{D,j}^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$-P_l^{PF \max} \leq P_l^{PF} \leq P_l^{PF \max}, \quad \forall l \in \ell \quad (8)$$

式 (5) 为功率平衡约束, 是维持电力系统稳定运行的必要条件。在经济学角度, 与该约束相对应的拉格朗日乘子代表发电商的售电价格, 能反映市场中的供需关系, 本文将其记为 λ_i , 单位为 ¥/MW 。式 (6) 和式 (7) 分别为发电商有功出力约束和柔性负荷商用电需求约束, $p_{G,i}^{\max}$ 和 $p_{G,i}^{\min}$ 、 $p_{D,j}^{\max}$ 和 $p_{D,j}^{\min}$ 分别为发电商有功出力上限和下限、柔性负荷商用电需求上限和下限。式 (8) 为电网线路传输安全约束, $l \in \ell$, ℓ 表示一个给定电力系统中所有线路的集合, P_l^{PF} 为线路 l 的潮流; 当不考虑线路的输入功率和非市场化用户参与时, 其计算公式为:

$$P_l^{PF} = \sum_{i=1}^m G_{l-i} \cdot p_{G,i} - \sum_{j=1}^n G_{l-j} \cdot p_{D,j} \quad (9)$$

式中, G_{l-i} 、 G_{l-j} 分别为发电商 i 、柔性负荷商 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子^[22], 该因子反映了节点 i 或节点 j 上净注入功率或净输出功率的变化对线路 l 潮流的影响程度。

当式 (8) 中的等号成立时, 说明存在发生了阻塞的线路, 意味着系统线路容量资源稀缺, 该稀缺程度可用系统线路容量资源价值 (即线路阻塞价格) 表示。参照节点电价组成部分中的阻塞分量计算方法^[22], 此时配电网运营商可向相关节点的市场主体收取一定费用:

$$F_i(p_i) = \sum_{l \in \ell} (\alpha_l - \bar{\alpha}_l) G_{l-i} p_i \quad (10)$$

式中, α_l 、 $\bar{\alpha}_l$ 分别为线路 l 最大正向、反向传输安全的拉格朗日乘子, $\alpha_l - \bar{\alpha}_l$ 可理解为线路传输安全的影子成本, 单位为 ¥/MW , 该成本反映了放松单位容量约束时社会福利的增加量; p_i 表示节点 i 的注入功率。

由于收取上述费用的目的是维护电力系统的安全稳定, 因此本文将此称为电网安全成本。根据式 (10), 可得发电商 i 和柔性负荷商 j 分别需要支付的电网安全成本为:

$$F_{G,i}(p_{G,i}) = - \sum_{l \in \ell} (\alpha_l - \bar{\alpha}_l) G_{l-i} p_{G,i} \quad (11)$$

$$F_{D,j}(p_{D,j}) = \sum_{l \in \ell} (\alpha_l - \bar{\alpha}_l) G_{l-j} p_{D,j} \quad (12)$$

式 (11) 和式 (12) 本质上是将系统稀缺的线路容量资源价值, 通过特定映射关系与安全成本相关联。该电网安全成本体现了价格信号与线路潮流间的关系, 可根据线路传输情况及时响应, 并基于市场主体对线路容量的占用情况提供价格引导信号。在中国现行的电力市场中, 一般由电力调度机构求解上述集中优化出清模型, 得到市场出清结果, 如柔性负荷商和发电商的购电功率、售电功率和交易价格等。经过电网安全校核后, 电力调度机构会向市场各成员公布交易出清结果, 然后市场主体按照出清结果进行交易。

1.3 分布式交易模型

虽然上述社会福利最大化问题可采用如式 (4) ~ (8) 所示的集中式交易模型求解, 但集中模型存在分布式电源大量并网和市场主体隐私安全等问题。针对上述问题, 有学者使用分布式方法解决电力市场交易问题, 但一些研究未基于电力系统的安全约束, 另一些研究则并未充分考虑市场主体追求自身利益最大化的决策目标和行为, 所设计交易方法的可行性有一定局限。

鉴于此, 本文基于电网线路传输安全和各市场主体的决策行为, 利用拉格朗日乘子法和对其对偶定理^[23], 将以社会福利最大化为目标的集中式电力市场交易

优化问题, 分解为等价的分分布式交易模型. 在该分分布式交易模型中, 各市场主体通过交换部分信息, 以自身利益最大化为目标进行决策. 而配电网运营商则通过收集市场中的交易量信息, 来检验电网线路传输安全是否能够得到满足, 并据此计算安全成本, 由各市场主体承担, 从而影响市场主体的决策行为, 引导分布式交易结果满足电网线路传输安全约束. 分布式交易模型的建立过程如下.

由于存在耦合约束式 (5) 和式 (8), 式 (4) ~ (8) 不能直接使用分布式方法求解. 易知式 (4) ~ (8) 为凸优化问题, 故可采用对偶定理对其进行分解. 首先, 利用如下的拉格朗日函数, 将耦合约束松弛化:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}) = & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m U_j(p_{D,ji}) - \sum_{i=1}^m C_i(p_{G,i}) + \\ & \sum_{i=1}^m \lambda_i \left(p_{G,i} - \sum_{j=1}^n p_{D,ji} \right) + \\ & \sum_{l \in \ell} \alpha_l (P_l^{PF} + P_l^{PF \max}) + \\ & \sum_{l \in \ell} \bar{\alpha}_l (P_l^{PF} - P_l^{PF \max}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中, λ_i 为与供需平衡约束式 (5) 相对应的拉格朗日乘子, 代表发电商 i 的售电价格; $\bar{\alpha}_l, \alpha_l \geq 0$ 为与线路传输安全约束式 (8) 相对应的拉格朗日乘子; 进一步, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_i]_{i=1, 2, \dots, m}$, $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_l]_{l \in \ell}$, $\bar{\boldsymbol{\alpha}} = [\bar{\alpha}_l]_{l \in \ell}$ 表示拉格朗日乘子向量. 值得注意的是, 上述拉格朗日函数未包含式 (6) 和式 (7) 所示的发电商有功出力约束和柔性负荷商需求量约束. 其原因是该约束仅与各发电商或柔性负荷商有关, 可直接作为后续发电商或柔性负荷商所求解子优化问题的约束条件, 故无需分解.

然后, 对上述拉格朗日函数取上确界, 得到其对偶形式:

$$\begin{aligned} \mathcal{D}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}) = \sup_{\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D} \mathcal{L}(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}) = & \sum_{j=1}^n \mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l) + \sum_{i=1}^m \mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l) + \\ & \sum_{l \in \ell} (\bar{\alpha}_l + \alpha_l) P_l^{PF \max} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, 当电网线路传输安全约束对应的拉格朗日乘子 α_l 和 $\bar{\alpha}_l$ 值给定时, $\sum_{l \in \ell} (\bar{\alpha}_l + \alpha_l) P_l^{PF \max}$ 为一个常量. $\mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 和 $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 的具体形式为:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l) = & \max_{p_{G,i}^{\min} \leq p_{G,i} \leq p_{G,i}^{\max}} \lambda_i p_{G,i} - \\ & C_i(p_{G,i}) - \sum_{l \in \ell} (\bar{\alpha}_l - \alpha_l) G_{l-i} p_{G,i} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l) = & \max_{p_{D,j}^{\min} \leq p_{D,j} \leq p_{D,j}^{\max}} \sum_{i=1}^m U_j(p_{D,ji}) - \\ & \sum_{i=1}^m \lambda_i p_{D,ji} - \sum_{l \in \ell} (\alpha_l - \bar{\alpha}_l) G_{l-j} p_{D,j} \end{aligned} \quad (16)$$

$\mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 为发电商 i 需要求解的子优化问题, 其决策变量 $p_{G,i}$ 仅与发电商 i 有关. 式 (15) 中, $\lambda_i p_{G,i}$ 为发电商 i 的售电收益, $C_i(p_{G,i})$ 为其发电成本, $\sum_{l \in \ell} (\bar{\alpha}_l - \alpha_l) G_{l-i} p_{G,i}$ 为其应向配电网运营商缴纳的安全成本. 故式 (15) 的含义为: 对一组给定的 $\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l$, 在机组出力区间内, 最大化发电商 i 的售电收益与发电成本、安全成本之差, 即最大化收入与支出之差. 因此, 发电商 i 求解 $\mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 即为求解自身利益最大化的优化问题. $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 为柔性负荷商 j 需要求解的子优化问题, 其决策变量 $p_{D,ji}$ 仅与柔性负荷商 j 有关. $\sum_{i=1}^m U_j(p_{D,ji})$ 为柔性负荷商 j 愿意支付的购电费用, $\sum_{i=1}^m \lambda_i p_{D,ji}$ 为其实际购电支出, $\sum_{l \in \ell} (\alpha_l - \bar{\alpha}_l) G_{l-j} p_{D,j}$ 为其应向配电网运营商缴纳的安全成本. 故柔性负荷商 j 求解 $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 即为求解自身利益最大化的优化问题.

从而, 可得对偶形式:

$$\min_{\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}} \mathcal{D}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}) \quad (17)$$

s.t.

$$\bar{\alpha}_l, \alpha_l \geq 0, \quad \forall l \in \ell \quad (18)$$

进一步, 可使用次梯度投影法, 对上述对偶问题进行迭代求解. 具体地, 发电商 i 求解与其相关的子优化问题 $\mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$, 得到 $p_{G,i}$, 并沿次梯度的反方向更新 λ_i ; 同时, 柔性负荷商 j 求解与其相关的子优化问题 $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$, 得到 $p_{D,ji}$. 然后, 各负荷商和发电商需要将自身的购电功率 $p_{D,ji}$ 和售电功率 $p_{G,i}$ 上报给配电网运营商, 配电网运营商据此沿次梯度的反方向更新 α_l 和 $\bar{\alpha}_l$. 由于柔性负荷商在求解子优化问题 $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \alpha_l)$ 时, 需要 λ_i 作为已知信息, 所以发电商 i 在更新完 λ_i 后, 需将其公布给各柔性负荷商, 以支撑柔性负荷商的决策. 同样地, 发电商和柔性负荷商在决策时, 均需 α_l 和 $\bar{\alpha}_l$ 作为已知信息, 所以配电网运营商在更新 α_l 和 $\bar{\alpha}_l$ 后, 需将其公布给各发电商和柔性负荷商. 拉格朗日乘子 $\lambda_i, \alpha_l, \bar{\alpha}_l$ 的更新法则为:

$$\lambda_i^{k+1} = \lambda_i^k - \xi^{k+1} \nabla_{\lambda_i} \mathcal{D}^k \quad (19)$$

$$\underline{\alpha}_l^{k+1} = [\underline{\alpha}_l^k - \xi^{k+1} \nabla_{\underline{\alpha}_l} \mathcal{D}^k]^+ \quad (20)$$

$$\bar{\alpha}_l^{k+1} = [\bar{\alpha}_l^k - \xi^{k+1} \nabla_{\bar{\alpha}_l} \mathcal{D}^k]^+ \quad (21)$$

即

$$\lambda_i^{k+1} = \lambda_i^k - \xi^{k+1} \left(p_{G,i}^k - \sum_{j=1}^n p_{D,j,i}^k \right) \quad (22)$$

$$\underline{\alpha}_l^{k+1} = [\underline{\alpha}_l^k - \xi^{k+1} (P_l^{PF,k} + P_l^{PF,max})]^+ \quad (23)$$

$$\bar{\alpha}_l^{k+1} = [\bar{\alpha}_l^k - \xi^{k+1} (P_l^{PF,max} - P_l^{PF,k})]^+ \quad (24)$$

式中, 拉格朗日乘子的上标 k 表示第 k 次迭代计算, $p_{D,j,i}^k$ 、 $p_{G,i}^k$ 分别为第 k 次迭代计算所得的柔性负荷商 j 和发电商 i 的最优购电功率、售电功率, $P_l^{PF,k}$ 为第 k 次迭代计算所得的线路 l 的潮流。由式 (22) 可知, 发电商在更新电价时, 需要用到 $p_{D,j,i}^k$, 所以柔性负荷商 j 需要将其购电功率 $p_{D,j,i}^k$ 公布给相应的发电商 i 。 ξ^k 为迭代步长, 为保证迭代计算能够收敛, ξ^k 必须设置的充分小, 其取值范围为 $0 < \xi^k < 2/L$, 其中 L 为对偶函数 $\mathcal{D}(\lambda, \alpha, \bar{\alpha})$ 的 Lipschitz 常量^[24]。 ξ^k 可以取为常量, 也可设为一个随迭代次数 k 变化的量, 后者需满足:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{\infty} \xi^k = \infty \\ \sum_{k=1}^{\infty} (\xi^k)^2 < \infty \end{cases} \quad (25)$$

最后, 上述迭代计算过程的终止条件为:

$$|\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k| < \varepsilon_\lambda \quad (26)$$

$$|\underline{\alpha}_l^{k+1} - \underline{\alpha}_l^k| < \varepsilon_\alpha \quad (27)$$

$$|\bar{\alpha}_l^{k+1} - \bar{\alpha}_l^k| < \varepsilon_\alpha \quad (28)$$

式中, ε_λ 和 ε_α 为趋近于 0 的正数。当式 (26) ~ (28) 均得到满足时, 即认为计算结果已收敛, 并停止迭代求解过程。

2 分布式交易方法

本节针对第 1.3 节所构建的分布式交易模型, 提出一种基于电网线路传输安全的分布式交易方法, 其求解过程如算法 1 所示。其中 \mathbf{P}_G^* 和 \mathbf{P}_D^* 分别表示迭代求解收敛时得到的最优发电功率和最优购电功率, λ^* 、 $\underline{\alpha}^*$ 和 $\bar{\alpha}^*$ 为最优拉格朗日乘子。

算法 1. 基于线路传输安全的分布式求解算法输入。 λ^0 , $\underline{\alpha}^0$, $\bar{\alpha}^0$ 。

输出。 \mathbf{P}_G^* , \mathbf{P}_D^* , λ^* , $\underline{\alpha}^*$, $\bar{\alpha}^*$ 。

1) 各发电商初始化电价 λ_i^0 , 配电网运营商初始化 $\underline{\alpha}_l^0$ 、 $\bar{\alpha}_l^0$, 并公布给所有市场主体;

while ($|\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k| \geq \varepsilon_\lambda$ or $|\underline{\alpha}_l^{k+1} - \underline{\alpha}_l^k| \geq \varepsilon_\alpha$ or $|\bar{\alpha}_l^{k+1} - \bar{\alpha}_l^k| \geq \varepsilon_\alpha$) do;

2) 各发电商求解 $\mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \underline{\alpha}_l)$, 得到 $p_{G,i}^k$, 并将其上报给配电网运营商;

3) 各负荷商求解 $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \underline{\alpha}_l)$, 得到 $p_{D,j,i}^k$, 并公布给相应的发电商和配电网运营商;

4) 各发电商根据式 (22) 更新 λ_i^k , 并公布给各负荷商;

5) 配电网运营商根据式 (23) 和式 (24) 更新 $\underline{\alpha}_l^k$ 、 $\bar{\alpha}_l^k$, 并公布给各发电商和负荷商;

end while;

6) 得到最终结果 \mathbf{P}_G^* 、 \mathbf{P}_D^* 、 λ^* 、 $\underline{\alpha}^*$ 、 $\bar{\alpha}^*$;

7) 通过电网安全校核后, 进行市场出清。

首先, 发电商 i 设置自身的初始电价 λ_i^0 , 配电网运营商设置初始值 $\underline{\alpha}_l^0$ 、 $\bar{\alpha}_l^0$, 并公布给各市场主体。然后, 进行迭代求解: 发电商 i 求解子优化问题 $\mathcal{H}_i(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \underline{\alpha}_l)$, 得到第 k 次迭代的最优发电功率 $p_{G,i}^k$, 并将其上报给配电网运营商; 柔性负荷商 j 求解子优化问题 $\mathcal{G}_j(\lambda_i, \bar{\alpha}_l, \underline{\alpha}_l)$, 得到第 k 次迭代的最优购电功率 $p_{D,j,i}^k$, 并公布给相应的发电商和配电网运营商; 各发电商可根据式 (22), 更新 λ_i^k , 配电网运营商可根据式 (23)、式 (24), 更新 $\underline{\alpha}_l^k$ 、 $\bar{\alpha}_l^k$, 并公布给各市场主体。每次迭代, 各主体根据式 (26) ~ (28) 判断迭代过程是否可以终止, 若式 (26) ~ (28) 均得到满足, 则迭代过程终止, 得到最终结果 \mathbf{P}_G^* 、 \mathbf{P}_D^* 、 λ^* 、 $\underline{\alpha}^*$ 、 $\bar{\alpha}^*$, 通过电网安全校核后, 市场可以按照此结果进行出清; 否则, 继续迭代求解。

上述分布式交易方法中, 各市场主体无须上报自身的报价曲线, 只需在迭代求解过程中, 对相关成员公布部分必要信息 (交易量或交易价格), 因而在一定程度上保障了各主体的隐私安全。

定理 1. 算法 1 中的迭代求解过程能收敛到原集中式交易模型式 (4) ~ (8) 的全局最优解。

证明. 首先, 引入次梯度的定义和 Lipschitz 连续条件:

凸函数 $f(\mathbf{x}) : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 在 \mathbf{x} 处的次梯度定义为任意 $\mathbf{g} \in \mathbf{R}^n$, 满足:

$$f(\mathbf{y}) \geq f(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{y} - \mathbf{x})^T \quad (29)$$

若凸函数 $f(\mathbf{x}) : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 为 Lipschitz 连续函数, 则满足:

$$\|\mathbf{g}\| = \frac{|f(\mathbf{y}) - f(\mathbf{x})|}{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|} \leq W \quad (30)$$

式中, W 为一个常数且 $W > 0$ 。

由式 (4) 可知, $Z(\mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D)$ 为凸函数, 且为 Lipschitz 连续函数, 故满足式 (30).

然后, 记 $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\lambda} \quad \boldsymbol{\alpha} \quad \bar{\boldsymbol{\alpha}}]$, 则 $\mathcal{D}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\alpha}, \bar{\boldsymbol{\alpha}})$ 可表示为 $\mathcal{D}(\mathbf{x})$. 记 \mathbf{x}^k 为第 k 次迭代的解, \mathbf{x}^* 为集中式交易模型式 (4) ~ (8) 的全局最优解, 由 λ_i 、 α_l 、 $\bar{\alpha}_l$ 的更新法则即式 (22) ~ (24), 可知:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^*\|^2 &= \|\mathbf{x}^{k-1} - \xi^k \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{k-1} - \mathbf{x}^*\|^2 = \\ &\|\mathbf{x}^{k-1} - \mathbf{x}^*\|^2 - 2\xi^k \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{k-1} (\mathbf{x}^{k-1} - \mathbf{x}^*)^\top + \\ &(\xi^k)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{k-1}\|^2 \leq \|\mathbf{x}^{k-1} - \mathbf{x}^*\|^2 - \\ &2\xi^k (\mathcal{D}(\mathbf{x}^{k-1}) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*)) + (\xi^k)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{k-1}\|^2 = \\ &\|\mathbf{x}^{k-2} - \xi^{k-1} \nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{k-2} - \mathbf{x}^*\|^2 - \\ &2\xi^k (\mathcal{D}(\mathbf{x}^{k-1}) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*)) + (\xi^k)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{k-1}\|^2 = \\ &\dots \leq \|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|^2 - \\ &2 \sum_{u=1}^k \xi^u (\mathcal{D}(\mathbf{x}^{u-1}) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*)) + \\ &\sum_{u=1}^k (\xi^u)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{u-1}\|^2 \end{aligned} \quad (31)$$

因为 $\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^*\|^2 \geq 0$, 故有:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|^2 - 2 \sum_{u=1}^k \xi^u (\mathcal{D}(\mathbf{x}^{u-1}) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*)) + \\ \sum_{u=1}^k (\xi^u)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{u-1}\|^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (32)$$

从而有:

$$\begin{aligned} 2 \sum_{u=1}^k \xi^u (\mathcal{D}(\mathbf{x}^{u-1}) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*)) \leq \\ \|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|^2 + \sum_{u=1}^k (\xi^u)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{u-1}\|^2 \end{aligned} \quad (33)$$

用 $\mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k)$ 表示 k 次迭代内的最优解, 即:

$$\mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) \leq \mathcal{D}(\mathbf{x}^u), \quad u = 0, 1, 2, \dots, k \quad (34)$$

结合式 (33)、式 (34), 可知:

$$\begin{aligned} 2 \sum_{u=1}^k \xi^u (\mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*)) \leq \\ \|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|^2 + \sum_{u=1}^k (\xi^u)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{u-1}\|^2 \end{aligned} \quad (35)$$

式中, 当迭代求解的初始值 \mathbf{x}^0 确定后, $\|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|^2$ 为一个常数, 记为 S , 且由式 (30) 可知 $\|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{u-1}\|^2 \leq W^2$, 故有:

$$\begin{aligned} \mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*) \leq \\ \frac{\|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|^2 + \sum_{u=1}^k (\xi^u)^2 \|\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{D}^{u-1}\|^2}{2 \sum_{u=1}^k \xi^u} \leq \\ \frac{S^2 + W^2 \sum_{u=1}^k (\xi^u)^2}{2 \sum_{u=1}^k \xi^u} \end{aligned} \quad (36)$$

当 ξ^u 满足式 (25) 时, 有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (37)$$

易知, 集中式交易模型式 (4) ~ (8) 为凸优化问题, 满足强对偶定理, 对偶间隙为 0, 即:

$$\mathcal{D}(\mathbf{x}^*) = \mathcal{L}(\mathbf{P}_G^*, \mathbf{P}_D^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\alpha}^*, \bar{\boldsymbol{\alpha}}^*) = Z(\mathbf{P}_G^*, \mathbf{P}_D^*) \quad (38)$$

因此, 有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) = Z(\mathbf{P}_G^*, \mathbf{P}_D^*) \quad (39)$$

所以, 算法 1 中的迭代求解能收敛到原集中式交易模型式 (4) ~ (8) 的全局最优解. \square

综上所述, 本文提出的分布式交易方法可实现社会福利最大化, 同时也能保证线路传输安全.

需要注意的是, 在一般中低压配电网中, 分布式电源容量和市场分布式交易规模并不大, 不会造成线路阻塞或潮流越限. 此时, 若在分布式交易中考虑电网线路传输安全和安全成本, 会增加计算成本. 因此, 为了提高中低压配电网中分布式交易的效率, 本文在上述交易方法基础上, 提出一种基于线路传输安全的松弛管制分布式交易方法, 其求解过程如算法 2 所示. 松弛管制即为放松对电网线路传输安全管控, 其主要思想为, 在首轮迭代求解中, 暂不考虑电网安全成本, 即发电商和柔性负荷商求解的子优化问题分别转变为:

$$\mathcal{H}_i(\lambda_i) = \max_{p_{G,i}^{\min} \leq p_{G,i} \leq p_{G,i}^{\max}} \lambda_i p_{G,i} - C_i(p_{G,i}) \quad (40)$$

$$\mathcal{G}_j(\lambda_i) = \max_{p_{D,j}^{\min} \leq p_{D,j} \leq p_{D,j}^{\max}} \sum_{i=1}^m U_j(p_{D,j,i}) - \sum_{i=1}^m \lambda_i p_{D,j,i} \quad (41)$$

算法 2. 基于线路传输安全的松弛管制分布式求解算法

输入. $\boldsymbol{\lambda}^0$.

输出. \mathbf{P}_{mG}^* , \mathbf{P}_{mD}^* , $\boldsymbol{\lambda}^*$, $\boldsymbol{\alpha}^*$, $\bar{\boldsymbol{\alpha}}^*$.

1) 各发电商初始化 λ_i^0 , 并公布给各柔性负荷商;

while ($|\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k| \geq \varepsilon_\lambda$) do;

2) 各发电商 i 求解 $\mathcal{H}_i(\lambda_i)$, 得到 $p_{G,i}^k$, 并将其上报给配

- 电网运营商;
- 3) 各柔性负荷商 j 求解 $\mathcal{G}_j(\lambda_i)$, 得到 $p_{D,j,i}^k$, 并公布给相应的发电商和配电网运营商;
 - 4) 各发电商根据式 (22), 更新 λ_i^k , 并公布给各柔性负荷商;
- end while;
- 5) 配电网运营商将各柔性负荷商与各发电商上报的最优购售电功率 P_D° 和 P_G° 代入式 (9), 计算 P_l^{PF} 并判断是否满足线路传输安全约束式 (8);
 - 6) 判断 P_D° 和 P_G° 是否为最终结果;
- if P_l^{PF} 满足式 (8);
- 7) 得到最终市场交易结果: $P_G^* = P_G^\circ$ 、 $P_D^* = P_D^\circ$ 、 $\lambda^* = \lambda^\circ$ 、 $\underline{\alpha}^* = \bar{\alpha}^* = \mathbf{0}$;
- else;
- 8) 用算法 1 再次进行交易;
- end if;
- 9) 通过电网安全校核后, 进行市场出清。

在基于线路传输安全的松弛管制分布式交易方法中, 首先发电商 i 设置初始值 λ_i^0 , 并公布给各柔性负荷商; 然后, 暂不考虑电网安全成本, 进行迭代求解: 发电商 i 求解 $\mathcal{H}_i(\lambda_i)$, 得到 $p_{G,i}^k$, 并上报给配电网运营商; 柔性负荷商 j 求解 $\mathcal{G}_j(\lambda_i)$, 得到 $p_{D,j,i}^k$, 并公布给相应的发电商和配电网运营商; 然后, 各发电商根据式 (22) 更新 λ_i^k , 并根据式 (26) 判断迭代过程是否可以终止, 若式 (26) 不满足, 则继续迭代求解; 否则, 停止迭代, 得到求解结果 P_D° 、 P_G° 、 λ° 。此时, 各市场主体需将求得的 P_D° 和 P_G° 上报给配电网运营商, 由配电网运营商根据式 (8) 和式 (9) 检验是否满足线路传输安全约束。若满足, 则得到最终求解结果 $P_G^* = P_G^\circ$ 、 $P_D^* = P_D^\circ$ 、 $\lambda^* = \lambda^\circ$ 、 $\underline{\alpha}^* = \bar{\alpha}^* = \mathbf{0}$; 否则, 需要使用算法 1 再次进行计算。最后, 通过电网安全校核后, 市场可以按照 P_G^* 、 P_D^* 、 λ^* 、 $\underline{\alpha}^*$ 、 $\bar{\alpha}^*$ 进行出清。

定理 2. 对于同一个电力市场分布式交易问题, 算法 1 和算法 2 能求得相同的交易量和交易价格。

证明. 不失一般性, 证明分为 2 种情形。

情形 1. 假设算法 2 中步骤 5) 求得的 P_l^{PF} 满足式 (8), 即 $0 \leq |P_l^{PF}| \leq P_l^{PF \max}$, 表明电网安全约束式 (8) 并未起作用。此时不妨在集中式交易模型式 (4) ~ (8) 中去除约束式 (8), 然后使用拉格朗日乘子法和偶定理对模型式 (4) ~ (7) 进行等价分解, 可得到与式 (40)、式 (41) 相同的形式, 将其求解结果记为 P_G^* 、 P_D^* 、 λ^* , 则必有 $P_G^* = P_G^\circ$ 、 $P_D^* = P_D^\circ$ 和 $\lambda^* = \lambda^\circ$ 。

情形 2. 假设算法 2 中步骤 5) 的 P_l^{PF} 不满足式 (8), 则需要再使用算法 1 进行求解, 此时算法 2 和算法 1 必能收敛到相同最优解 P_G^* 、 P_D^* 、 λ^* 、

$\underline{\alpha}^*$ 、 $\bar{\alpha}^*$ 。综上所述, 对于同一个电力市场分布式交易问题, 算法 1 和算法 2 能求得相同的交易量和交易价格。□

虽然算法 1 和算法 2 的求解结果相同, 但求解速度却不同, 下面对 2 种算法的计算复杂度进行分析。为便于分析, 设 $\xi^k = \xi$, 则式 (36) 可改写为:

$$\mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*) \leq \frac{S^2 + k\xi^2 W^2}{2k\xi} = \frac{S^2}{2k\xi} + \frac{\xi W^2}{2} \quad (42)$$

假设在分布式交易方法中, 目标函数值的允许误差为 δ , 即:

$$\mathcal{D}(\mathbf{x}_{best}^k) - \mathcal{D}(\mathbf{x}^*) \leq \delta \quad (43)$$

可令:

$$\frac{S^2}{2k\xi} + \frac{\xi W^2}{2} = \delta \quad (44)$$

对此, 不妨令:

$$\frac{S^2}{2k\xi} = \frac{\xi W^2}{2} = \frac{\delta}{2} \quad (45)$$

可求得迭代求解次数为:

$$k = \frac{W^2 S^2}{\delta^2} \quad (46)$$

故算法 1 的计算复杂度可表示为 $O(1/\delta^2)$ 。同理, 可得算法 2 的计算复杂度也为 $O(1/\delta^2)$ 。

2 种算法的复杂度量级相同, 均为次线性收敛, 但具体迭代求解次数不同。在相同允许误差 δ 下, 将算法 1 的迭代求解次数记为 k_1 ; 算法 2 中的步骤 1) ~ 4) 的迭代求解次数记为 k_2' , 总迭代求解次数记为 k_2 , 有:

$$k_1 = \frac{W^2 S_1^2}{\delta^2} = \frac{W^2 \|\mathbf{x}^0 - \mathbf{x}^*\|_2^2}{\delta^2} = \frac{W^2}{\delta^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\lambda_i^0 - \lambda_i^*)^2 + \sum_{l \in \ell} (\alpha_l^0 - \alpha_l^*)^2 + \sum_{l \in \ell} (\bar{\alpha}_l^0 - \bar{\alpha}_l^*)^2} \quad (47)$$

当算法 2 中步骤 5) 求得的 P_l^{PF} 满足式 (8) 时, 有:

$$k_2 = k_2' = \frac{W^2 S_2^2}{\delta^2} = \frac{W^2 \|\lambda^0 - \lambda^*\|^2}{\delta^2} = \frac{W^2}{\delta^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\lambda_i^0 - \lambda_i^*)^2} \quad (48)$$

此时, 显然有 $k_2 \leq k_1$;

而当算法 2 中步骤 5) 求得的 P_l^{PF} 不满足式 (8) 时, 有:

$$k_2 = k'_2 + k_1 \quad (49)$$

有 $k_2 > k_1$.

综上所述, 在不同情况下, 本文提出的 2 种算法的计算效率存在差别. 当市场中的分布式交易结果不足以造成线路阻塞或潮流越限时, 算法 2 的迭代次数更少、效率更高; 否则, 算法 1 的效率更高. 所以, 可对市场中的分布式交易情形进行分类, 以便针对各种情形, 选择效率较高的交易方法. 但一般在交易前, 难以准确判断交易结果是否会造成线路阻塞或潮流越限, 这给交易情形分类带来难度. 鉴于此, 本文提出一个分类依据, 并将分布式电力市场交易情形分为 2 类: 当某情形满足 $\exists l \in \ell_i, p_{G_i}^{\max} \geq P_l^{PF \max}$ 时, 其中 ℓ_i 表示与发电商相连的线路, 为情形 1; 否则, 为情形 2.

在电力系统中, 当 $\forall l \in \ell_i, p_{G_i}^{\max} < P_l^{PF \max}$ 时 (即情形 2), 即使各发电商的出力达到最大, 与各发电商相连的线路也不会发生阻塞; 同时从售电侧角度反映了市场中的分布式交易量与线路潮流上限相比并不大, 线路发生潮流越限的可能性较小, 故算法 2 的计算效率更高. 若算法 2 中的步骤 1) ~ 4) 交易结果可通过电网安全校核, 则可直接进行市场出清, 总迭代次数为 $k_2 = k'_2 \leq k_1$; 否则, 即使未通过安全校核, 也可再次使用算法 1 进行分布式交易, 仍能保障交易的顺利进行. 而在情形 1 下, 即 $\exists l \in \ell_i, p_{G_i}^{\max} \geq P_l^{PF \max}$, 当发电商的出力达到最大时, 会导致线路潮流越限, 此时根据式 (49), 有 $k_2 > k_1$, 故在情形 1 下, 算法 1 的计算效率更高.

3 算例分析

为验证上述分布式交易方法的有效性, 本节采用文献 [15] 的 IEEE 9 节点电力系统进行算例分析. 该电力系统由 9 个市场交易主体组成, 包括 3 个发电商 $G_1 \sim G_3$ 和 6 个柔性负荷商 $D_4 \sim D_9$, 其拓扑结构如图 3 所示. 在情形 1 和情形 2 两种分布式交易情形下, IEEE 9 节点电力系统中各市场主体参数如表 1 和表 2 所示, 各条线路的潮流上限如表 3 所示. 本文使用 Matlab R2017a 和 Gurobi 9.1, 在 Intel(R) Core(TM) i5-10400 CPU@2.90 GHz 处理器和 16 GB 内存计算机上进行仿真实验.

当对凸优化问题使用次梯度下降法时, 拉格朗日乘子的初始值并不影响求解结果, 故可取为 $\lambda_i^0 = c_{G,i,1}$, $\alpha_i^0 = \alpha_l^0 = 0$. 迭代步长为 $\xi = 0.1/k$, 迭代终止条件设为 $\varepsilon_\lambda = \varepsilon_\alpha = 0.001$. 需要注意的是, 在对本文 2 种算法的计算效率进行对比时, 必须保证实验的初始值相同.

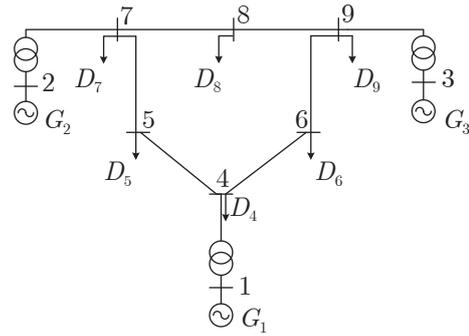


图 3 IEEE 9 节点电力系统拓扑结构
Fig.3 IEEE 9 bus power system topology

表 1 2 种分布式交易情形下, IEEE 9 节点电力系统的发电商出力上限和下限 (MW)
Table 1 Upper and lower limits on generator output for IEEE 9 bus power system in 2 distributed trading scenarios (MW)

发电商		G_1	G_2	G_3
情形 1	$p_{G_i}^{\max}$	350	290	400
	$p_{G_i}^{\min}$	10	20	15
情形 2	$p_{G_i}^{\max}$	120	100	140
	$p_{G_i}^{\min}$	10	20	15

表 2 2 种分布式交易情形下, IEEE 9 节点电力系统的柔性负荷商需求上限和下限 (MW)
Table 2 Upper and lower limits on flexible loaders' demand for IEEE 9 bus power system in 2 distributed trading scenarios (MW)

柔性负荷商		D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
情形 1	$p_{D_j}^{\max}$	150	100	145	140	150	170
	$p_{D_j}^{\min}$	60	50	90	60	50	70
情形 2	$p_{D_j}^{\max}$	150	90	100	140	150	150
	$p_{D_j}^{\min}$	20	15	30	30	15	20

表 3 IEEE 9 节点电力系统线路潮流上限 (MW)
Table 3 Upper limit of grid line power flow for IEEE 9 bus power system (MW)

线路	1-4	4-6	6-9	3-9	9-8	8-7	7-2	7-5	5-4
$P_l^{PF \max}$	160	100	100	150	100	100	120	100	100

3.1 分布式交易方法的有效性分析

下面分别使用集中式交易方法和本文提出的分布式交易方法, 对电网线路传输安全的社会福利最大化问题进行求解, 并对求解结果进行对比分析. 图 4 和表 4 分别为使用集中式和分布式 2 种交易方法求得的社会总福利和各市场主体交易量对比.

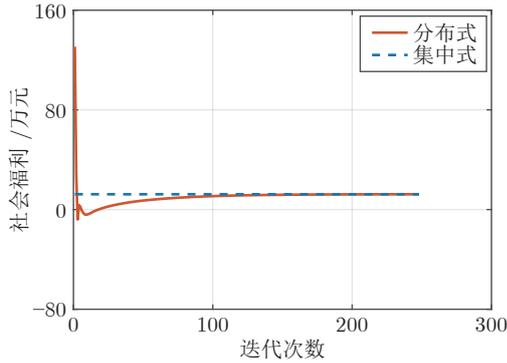


图 4 2 种交易方法求得的社会福利对比

Fig.4 Comparison of social welfare obtained by the 2 trading methods

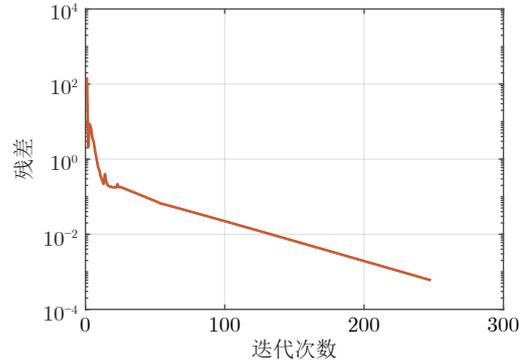


图 5 2 种交易方法求解结果间的残差

Fig.5 Residuals of the solution results of the 2 trading methods

表 4 2 种交易方法下, 各市场主体交易量对比 (MW)
Table 4 Comparison of the trading volume of market entities obtained by the 2 trading methods (MW)

交易量	集中式	分布式
G_1	155.374	155.376
G_2	97.747	97.747
G_3	126.912	126.918
D_4	59.998	60.002
D_5	50.010	50.007
D_6	90.007	90.007
D_7	60.006	60.006
D_8	50.009	50.006
D_9	70.012	70.006

由图 4 可以看出, 经过一定迭代后, 2 种交易方法求得的社会福利趋于相等, 即分布式交易方法实现了社会福利的最大化. 同样地, 由表 4 可以看出, 本文提出的分布式交易方法可取得与集中式交易方法相同结果.

图 5 以集中式交易和分布式交易方法所求得的柔性负荷商需求矩阵差的 2-范数 $\|P_D^k - P_D^*\|$ 来表征 2 种交易方法求解结果间的残差, 其中 P_D^k 表示分布式交易方法第 k 次迭代求得的需求矩阵, P_D^* 表示使用集中式交易方法求得的最优需求矩阵. 该残差体现了 2 种交易方法求解结果的接近程度, 即残差越小, 表示二者越接近. 由图 5 可知, 随着分布式迭代求解的进行, 2 种交易方法求解结果间残差逐渐变小, 最终小于 0.001, 故可认为在允许误差范围内, 2 种交易方法的求解结果相同, 即本文所提方法有效.

另外, 为验证在分布式交易中, 考虑线路传输安全的必要性以及本文方法在保证电网线路安全方面的有效性, 对以下 2 个案例进行仿真和对比.

案例 1. 未基于电网线路传输安全的分布式交易.

案例 2. 基于电网线路传输安全的分布式交易.

图 6 展示了 2 个案例中, 各条线路的潮流情况, 分别用 $P_l^{PF, \text{case 1}}$ 和 $P_l^{PF, \text{case 2}}$ 表示, 并将其与线路潮流上限进行了对比. 其中, 对线路 1-4、3-9 等有 $P_l^{PF, \text{case 1}} > P_l^{PF \max}$, 即未基于电网线路传输安全的分布式交易 (案例 1) 会导致潮流越限, 无法通过电力系统安全校核环节, 即该交易结果不具备可行性. 由此可见, 有必要在电力市场分布式交易中考虑线路传输安全. 与案例 1 相反, 在案例 2 中, 有 $P_l^{PF, \text{case 2}} \leq P_l^{PF \max}, \forall l \in \ell$, 即分布式交易不会造成线路潮流越限, 交易结果具有可行性. 由此可见, 本文提出的分布式交易方法在保证电网线路传输安全方面有效.

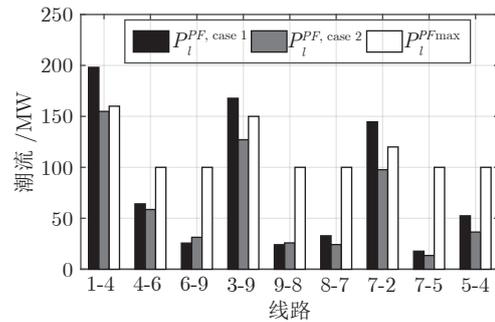


图 6 2 个案例中, 各线路潮流的对比

Fig.6 Comparison of the power flow of each grid line in 2 cases

综上所述, 本文提出的分布式交易方法能实现社会福利最大化, 并能够保障电网的线路传输安全, 交易结果具备有效性和可行性.

3.2 2 种分布式交易方法对比

本节在第 2 节列出的情形 1 和情形 2 下, 对文

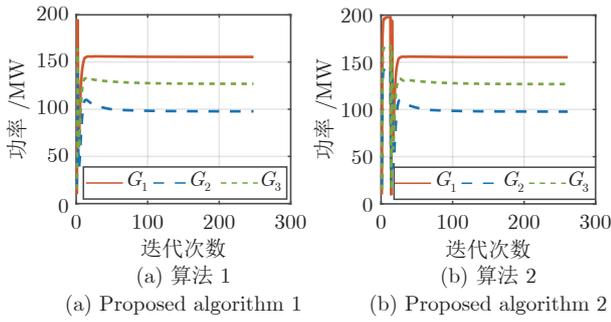


图 7 情形 1 下, 2 种算法求得各发电商的出力

Fig.7 Power generation of each generator obtained by the 2 algorithms in scenario 1

中提出的 2 种分布式交易方法所对应求解算法得到的交易结果和计算效率进行对比.

情形 1 下 2 种算法的对比如图 7 所示, 在相同的参数和初始条件下, 二者得到的交易结果完全一致, 但求解速度不同. 由表 5 知, 情形 1 下 2 种算法的迭代次数分别为 248 次和 265 次, 计算时间分别为 71.5 s 和 79.8 s, 即算法 1 的求解速度稍快于算法 2. 这是因为在情形 1 下, 与线路潮流上限 $P_l^{PF \max}$ 相比, 市场中的分布式交易量较大, 若不考虑线路传输安全, 交易结果会导致某些线路发生潮流越限情况. 所以, 与算法 1 相比, 算法 2 实际上多进行了一次不考虑安全约束的迭代求解过程, 因此算法 2 的求解速度慢于算法 1. 由于上述不考虑安全约束的迭代求解过程相对较快, 所以算法 2 的迭代次数只比算法 1 多了 17 次, 约 6.9%, 差别并不大. 由此可见, 算法 1 和算法 2 均适用于分布式交易量较大情形.

表 5 IEEE 9 节点电力系统下, 2 种算法的迭代次数和计算时间对比

Table 5 Comparison of iterations and computation time of the 2 algorithms in IEEE 9 bus system

情形	算法 1		算法 2	
	迭代次数	计算时间 (s)	迭代次数	计算时间 (s)
情形 1	248	71.5	265	79.8
情形 2	216	60.2	52	15.7

在情形 2 下, 2 种算法求得各发电商的出力结果对比如图 8 所示, 可以看出, 2 种算法求解速度不同. 结合表 5 可知, 在情形 2 下, 2 种算法的迭代次数分别为 216 次和 52 次, 计算时间分别为 60.2 s 和 15.7 s, 即算法 2 的求解速度明显快于算法 1. 这是因为在情形 2 下有 $\forall l \in \ell_i, p_{G,i}^{\max} < P_l^{PF \max}$, 即相对于线路潮流上限, 发电商的发电容量较小, 从而导致市场中的分布式交易量不足以造成线路阻塞或潮流越限问题. 所以, 使用算法 2 进行求解时, 实际

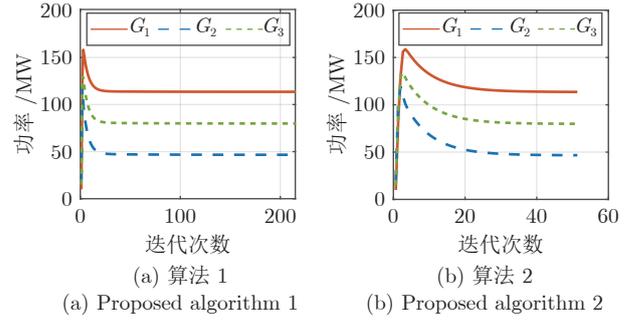


图 8 情形 2 下, 2 种算法求得各发电商的出力

Fig.8 Power generation of each generator obtained by the 2 algorithms in scenario 2

上只执行了步骤 1) ~ 5), 便得到了最终的交易结果; 与之相比, 算法 1 需多满足 2 个终止条件式 (27) 和式 (28), 即其收敛条件更为严格, 所以使用算法 1 求解会较慢. 由此可见, 算法 2 适用于情形 2.

综上所述, 算法 2 对上述 2 种情形均较适用, 而算法 1 仅适用于情形 1. 所以, 在实际中, 可根据具体情形选择方法, 也可均选用算法 2.

3.3 分布式交易方法的可扩展性分析

为验证分布式交易方法的可扩展性, 本节采用如图 9 所示的 IEEE 33 节点电力系统中压配电网系统进行仿真实验, 其中 1、6、14、18、22、25、33 七个节点为发电商节点, 其余 26 个节点为柔性负荷商节点.

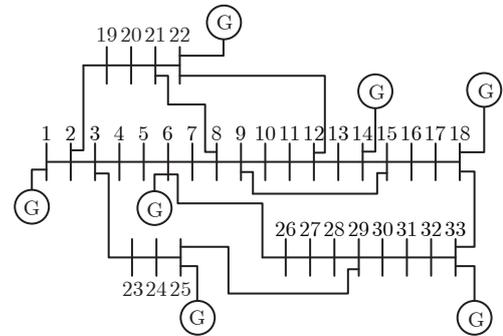


图 9 IEEE 33 节点电力系统拓扑结构

Fig.9 IEEE 33 bus power system topology

图 10 为在 IEEE 33 节点电力系统中, 集中式和分布式 2 种交易方法所得交易结果的残差. 可以看出, 随着迭代求解的进行, 残差逐渐减小, 最终小于 0.001, 可忽略不计, 故可认为本文方法能够达到与集中式交易相同的效果, 即本文方法有效.

然后, 在 IEEE 33 节点电力系统下, 对案例 1 和案例 2 进行仿真实验和对比分析. 由表 6 可知, 在案例 1 中, 未基于电网线路传输安全的分布式交

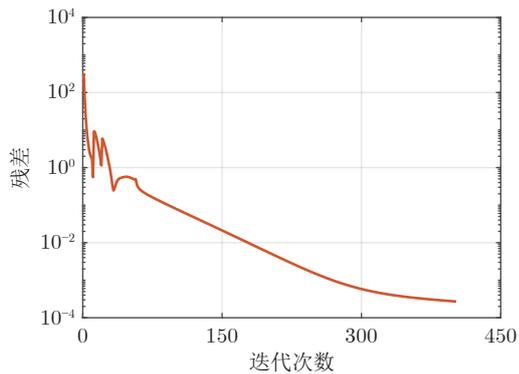


图 10 在 IEEE 33 节点电力系统中, 2 种交易方法求解结果的残差

Fig.10 Residuals of the solution results of the 2 trading models in IEEE 33 bus power system

易会导致多条线路 (如线路 5-6、14-15 等) 发生潮流越限情况; 而在案例 2 中, 使用本文方法进行分布式交易, 不会造成线路潮流越限. 因而, 有必要基于电网的线路传输安全开展分布式交易; 同时, 即使对于较为复杂的电力系统, 本文提出的分布式交易方法在保证线路传输安全方面也有效.

最后, 对本文提出的 2 种分布式交易方法所对应的求解算法进行求解速度对比. 在情形 1 下, 2 种算法求得各发电商的出力结果如图 11 所示; 在情形 2 下, 2 种算法求得各发电商的出力结果如图 12 所示, 其迭代次数和计算时间对比如表 7 所示. 可以看出, 在情形 1 下, 2 种算法求解结果相同, 且求解速度相差不大; 在情形 2 下, 2 种算法的求解结果也相同, 但算法 2 的求解速度明显快于算法 1, 这与第 3.2 节中, IEEE 9 节点电力系统下的结论相符.

综上所述, 在 IEEE 33 节点典型配电网系统案例下, 无论是本文提出的分布式交易模型的有效性, 抑或不同情形下, 2 种分布式交易方法的交易结果以及相应 2 种求解算法的求解速度对比, 其实验结论均与 IEEE 9 节点电力系统下的结论相吻合, 因此本文提出的分布式电力市场交易模型及相应的交易方法具有良好的可扩展性.

3.4 与现有求解算法的对比

为了验证本文所提分布式交易方法所对应的求解算法在求解效率方面的优越性, 在 2 种情形下, 将本文算法 1 和算法 2 分别与一阶最优性条件的原始对偶法^[19]和快速交替方向乘子法 (Fast alternating direction method of multipliers, F-ADMM)^[25]进行对比.

由于算法 1 和算法 2 分别适用于情形 1 和情形 2, 所以在不同情形下, 可以采用与该情形相适应

表 6 IEEE 33 节点电力系统中, 2 个案例的潮流对比 (MW)

Table 6 Comparison of the power flow in the 2 cases of the IEEE 33 bus power system (MW)

线路	$P_i^{PF, \text{case 1}}$	$P_i^{PF, \text{case 2}}$	$P_i^{PF \text{ max}}$
1-2	189.22	190.36	250
2-3	145.40	78.52	250
3-4	136.56	98.60	150
4-5	58.56	56.30	250
5-6	258.55	168.56	200
6-7	59.87	43.69	250
7-8	25.21	8.96	250
8-9	62.17	56.18	250
9-10	32.74	32.80	250
10-11	62.15	57.71	150
11-12	16.12	15.23	150
12-13	30.06	34.89	200
13-14	51.10	40.55	250
14-15	218.53	188.37	200
15-16	39.89	22.97	150
16-17	101.01	59.95	150
17-18	165.36	137.69	150
2-19	74.80	60.84	150
19-20	95.37	87.90	250
20-21	212.80	183.99	200
21-22	61.00	68.73	150
3-23	58.97	60.04	150
23-24	45.51	37.73	200
24-25	75.72	43.37	250
6-26	145.70	155.01	250
26-27	169.74	125.79	150
27-28	243.25	188.26	200
28-29	135.98	97.89	150
29-30	14.31	32.59	150
30-31	34.64	44.72	250
31-32	43.94	44.88	150
32-33	140.00	122.20	150
21-8	122.87	99.63	150
9-15	87.32	65.97	150
12-22	120.66	156.98	200
18-33	35.62	40.33	200
25-29	158.77	142.65	200

的算法, 来与其他算法进行对比. 在相同参数和初始条件下, 当本文算法与其他 2 种算法收敛到相同结果时, 各自的迭代次数和计算时间对比如图 13 和表 8、图 14 和表 9 所示. 可以看出, 在情形 1 下, 算法 1 的求解效率高于原始对偶法, 低于 F-ADMM;

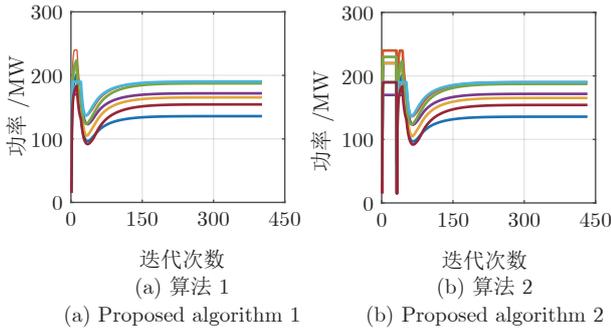


图 11 情形 1 下, 2 种算法求得的各发电商的出力

Fig. 11 Power generation of each generator obtained by the 2 algorithms in scenario 1

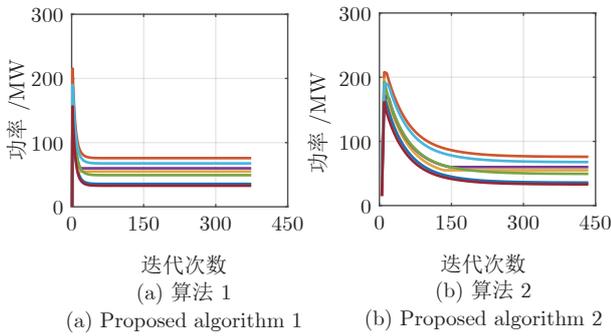


图 12 情形 2 下, 2 种算法求得的各发电商的出力

Fig. 12 Power generation of each generator obtained by the 2 algorithms in scenario 2

表 7 IEEE 33 节点系统下, 2 种算法迭代次数和计算时间对比

Table 7 Comparison of iterations and computation time of the 2 algorithms in IEEE 33 bus system

情形	算法 1		算法 2	
	迭代次数	计算时间 (s)	迭代次数	计算时间 (s)
情形 1	402	158.3	433	165.9
情形 2	374	143.3	86	32.6

在情形 2 下, 算法 2 的求解效率均高于原始对偶法和 F-ADMM.

在中国电力市场改革初期, 市场开放程度有限, 分布式交易规模较小的情形 2 可能较为普遍, 故算法 2 的应用更为广泛. 因此在实际应用中, 本文提出的求解算法与现有算法相比, 具有一定的优越性.

4 结束语

针对售电侧市场中, 集中式交易和分布式交易模型研究的不足, 本文探讨了一种基于电网线路传输安全的电力市场分布式交易模型. 首先, 对发电商和柔性负荷商这 2 类主要市场主体的经济特性进行分析, 并给出了社会福利的表达式; 在此基础上,

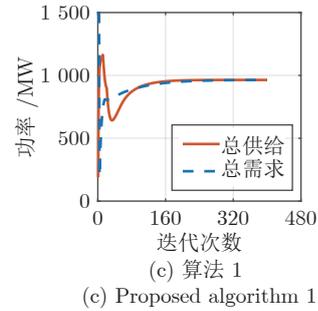
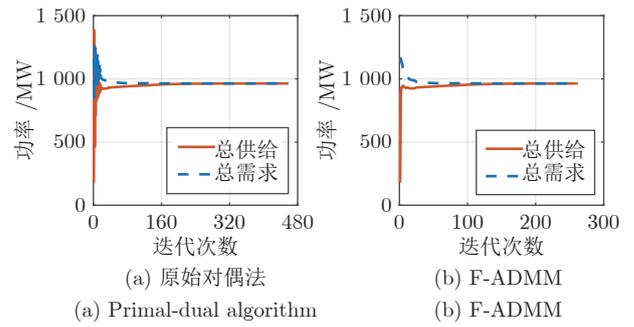


图 13 情形 1 下, 3 种算法的迭代求解结果

Fig. 13 The iterative solution results of the 3 algorithms in scenario 1

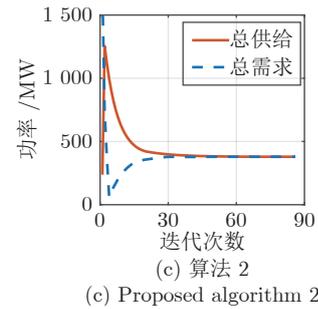
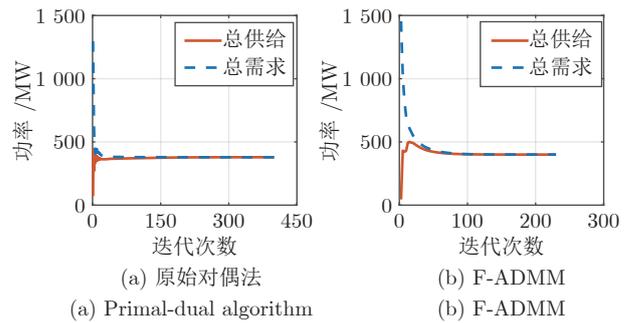


图 14 情形 2 下, 3 种算法的迭代求解结果

Fig. 14 The iterative solution results of the 3 algorithms in scenario 2

综合考虑社会福利最大化和电网线路传输安全, 构建了相应的数学优化模型. 然后, 基于拉格朗日松弛法和偶定理对该模型进行分解, 并设计了一种基于电网线路传输安全的分布式交易方法以及相应的求解算法. 该方法可以将集中式交易问题等价转

表 8 情形 1 下, 3 种算法的迭代次数和计算时间对比
Table 8 Comparison of iterations and computation time of the 3 algorithms in scenario 1

算法名称	迭代次数	计算时间 (s)
原始对偶法	458	162.2
F-ADMM	262	96.5
算法 1	402	158.3

表 9 情形 2 下, 3 种算法的迭代次数和计算时间对比
Table 9 Comparison of iterations and computation time of the 3 algorithms in scenario 2

算法名称	迭代次数	计算时间 (s)
原始对偶法	395	149.8
F-ADMM	218	80.4
算法 2	86	32.6

化为分散模型下的一系列子优化问题, 可由各相关市场主体分别独立求解与自身利益相关的子优化问题; 同时, 相关交易主体间只需交换少量必要信息, 其隐私安全在一定程度上能够得到保障; 并且, 电网会对交易结果进行检验, 并计算出相应的安全成本, 能够保证电网线路传输安全. 为提高分布式求解算法的求解效率, 本文提出一种基于电网线路传输安全的松弛管制分布式交易方法及相应的求解算法, 并在不同交易情形下, 对 2 种算法的求解速度进行了对比和分析. 最后, 基于 IEEE 9 节点和 IEEE 33 节点电力系统, 对本文提出的分布式交易方法及其求解算法进行了实验和分析, 验证了在分布式交易中基于电网线路传输安全的必要性、本文分布式交易模型及相应交易方法的有效性和可扩展性.

References

- Sun Qiu-Ye, Teng Fei, Zhang Hua-Guang. Energy internet and its key control issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 176-194
(孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题. 自动化学报, 2017, **43**(2): 176-194)
- Ping Zuo-Wei, He Wei, Li Jun-Lin, Yang Tao. Sparse learning for load modeling in microgrids. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(9): 1798-1808
(平作为, 何维, 李俊林, 杨涛. 基于稀疏学习的微电网负载建模. 自动化学报, 2020, **46**(9): 1798-1808)
- Li Yu-Shuai, Li Tian-Yi, Gao Wei, Gao Wen-Zhong. Distributed collaborative optimization operation approach for integrated energy system based on asynchronous and dynamic event-triggering communication strategy. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(9): 1831-1843
(李玉帅, 李天义, 高炜, 高文忠. 基于异步动态事件触发通信策略的综合能源系统分布式协同优化运行方法. 自动化学报, 2020, **46**(9): 1831-1843)
- Valero S, Ortiz M, Senabre C, Alvarez C, Franco F, Gabaldón A. Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2007, **1**(1): 104-110
- Zhang Xiao-Xuan, Xue Song, Yang Su, Tu Jun-Ming, Wei Zhe, Ma Li. International experience and lessons in power sales side market liberalization. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, **40**(9): 1-8
(张晓萱, 薛松, 杨素, 屠俊明, 魏哲, 马莉. 售电侧市场放开国际经验及其启示. 电力系统自动化, 2016, **40**(9): 1-8)
- Shan Jun-Jia, Hu Jun-Jie, Wu Jie-Chen. Peer-to-peer market trading mechanism and model for virtual power plant energy management. *Power System Technology*, 2020, **44**(9): 3401-3408
(单俊嘉, 胡俊杰, 吴界辰. 面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型. 电网技术, 2020, **44**(9): 3401-3408)
- Iweh C D, Gyamfi S, Tanyi E, Effah-Donyina E. Distributed generation and renewable energy integration into the grid: Pre-requisites, push factors, practical options, issues and merits. *Energies*, 2021, **14**(17): 1-34
- Bahrani S, Amimi M. A decentralized trading algorithm for an electricity market with generation uncertainty. *Applied Energy*, 2018, **218**: 520-532
- Tian Shuo. Operation Optimization and Bidding Strategy of the Electric Vehicle Aggregator Participating in Day-ahead Electricity Markets [Master thesis], North China Electric Power University, China, 2018.
(田硕. 电动汽车聚合商参与日前市场的运营优化与竞标策略研究 [硕士学位论文], 华北电力大学, 中国, 2018.)
- Yuan Xiao-Dong, Fei Jun-Tao, Hu Bo, Zhang You-Wang, Ge Le. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode. *Power System Protection and Control*, 2019, **47**(22): 17-26
(袁晓冬, 费骏韬, 胡波, 张友旺, 葛乐. 资源聚合商模型下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型. 电力系统保护与控制, 2019, **47**(22): 17-26)
- Lin Li, Xu Bing-Qian, Wang Hao-Huai. Analysis and recommendations of typical market-based distributed generation trading mechanisms. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, **43**(4): 1-8
(林俐, 许冰倩, 王皓怀. 典型分布式发电市场化交易机制分析与建议. 电力系统自动化, 2019, **43**(4): 1-8)
- Jiang Si-Fan. Research on P2P Trading Mechanism and Strategy of Distributed PV Generation [Master thesis], Zhejiang University, China, 2020.
(蒋嗣凡. 分布式光伏 P2P 交易机制和交易策略研究 [硕士学位论文], 浙江大学, 中国, 2020.)
- Paudel A, Chaudhari K, Chao L, Gooi H. Peer-to-peer energy trading in a prosumer based community microgrid: A game-theoretic model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, **66**(8): 6087-6097
- Zhang K, Troitzsch S, Hanif S, Hamacher T. Coordinated market design for peer-to-peer energy trade and ancillary services in distribution grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(4): 2929-2941
- Paudel A, Sampath L, Yang J, Gooi H. Peer-to-peer energy trading in smart grid considering power losses and network fees. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(6): 4727-4737
- Tushar W, Saha T K, Yuen C, Smith D, Poor H V. Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(4): 3185-3200
- Ma Teng, Liu Yang, Liu Jun, Jiang Zheng, Xu Li-Xiong. Distributed transaction model of electricity in multi-microgrid applying smart contract technology. *Electric Power Construction*, 2021, **42**(1): 41-48
(马腾, 刘洋, 刘俊, 蒋拯, 许立雄. 智能合约技术下微电网群电能分布式交易模型. 电力建设, 2021, **42**(1): 41-48)
- Guerrero J, Chapman A, Verbi G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, **10**(5): 5163-5173
- Khorasany M, Mishra Y, Ledwich G. A decentralized bilateral energy trading system for peer-to-peer electricity markets. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, **67**(6): 4646-4657

- 20 Morstyn T, Teytelboym A, Hepburn C, McCulloch M D. Integrating P2P energy trading with probabilistic distribution locational marginal pricing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(4): 3095–3106
- 21 Coffrin C, Knueven B, Holzer J, Vuffary M. The impacts of convex piecewise linear cost formulations on AC optimal power flow. *Electric Power Systems Research*, 2021, **199**(1): 1–11
- 22 Wang Yi, Yang Zhi-Fang, Yu Juan, Zhao Wei-Jia. Analysis and extension of internet relationship between locational marginal price and dual multiplier. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, **45**(6): 82–91
(王怡, 杨知方, 余娟, 赵唯嘉. 节点电价与对偶乘子的内在关联分析与扩展. *电力系统自动化*, 2021, **45**(6): 82–91)
- 23 Boyd S, Parikh N, Chu E, Peleato B, Eckstein J. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2011, **3**(1): 1–12
- 24 Bertsekas D. *Nonlinear Programming*. Belmont: Athena Scientific, 1999. 234–244, 334
- 25 Ullah M H, Park J D. Peer-to-peer energy trading in transactive markets considering physical network constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, **12**(4): 3390–3403



李远征 华中科技大学人工智能与自动化学院副教授. 主要研究方向为人工智能及其在智能电网中的应用, 深度学习, 强化学习和大数据分析.

E-mail: Yuanzheng_Li@hust.edu.cn

(**LI Yuan-Zheng** Associate professor at the School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology. His research interest covers artificial intelligence and its application in smart grid, deep learning, reinforcement learning, and big data analysis.)



张 虎 华中科技大学人工智能与自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为电力市场交易, 电力系统优化.

E-mail: dgjjzhang@foxmail.com

(**ZHANG Hu** Master student at the School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology. His research in-

terest covers power market trading and power system optimization.)



刘江平 湖北电力交易中心有限公司高级工程师. 主要研究方向为电力市场, 电力调度.

E-mail: hzxjj@foxmail.com

(**LIU Jiang-Ping** Senior engineer of Hubei Electric Power Exchange Center Limited Company. His re-

search interest covers power market and power dispatching.)

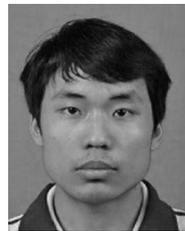


赵 勇 华中科技大学人工智能与自动化学院教授. 主要研究方向为决策理论, 大型工程项目管理, 社会经济系统的建模与仿真和系统分析与集成. 本文通信作者.

E-mail: zhiwei98530@hust.edu.cn

(**ZHAO Yong** Professor at the School of Artificial Intelligence and Automation, Hua-

zhong University of Science and Technology. His research interest covers decision-making theories, large-scale engineering project management, modeling and simulation of social economic systems, and system analysis and integration. Corresponding author of this paper.)



连义成 华中科技大学人工智能与自动化学院博士研究生. 主要研究方向为新能源接入的电力系统机组组合与经济调度.

E-mail: hust2017l@163.com

(**LIAN Yi-Cheng** Ph.D. candidate at the School of Artificial Intelli-

gence and Automation, Huazhong University of Science and Technology. His research interest covers power system unit commitment and economic dispatch of renewable energy.)