

区块链技术下局域多微电网市场竞争博弈模型及求解算法

马天男¹, 彭丽霖², 杜英¹, 苟全峰¹, 王超¹, 郭小帆³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041; 2. 四川电力交易中心有限公司, 四川 成都 610041;

3. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要:区块链技术作为新兴分布式数据库技术,在能源领域有巨大的应用潜力。多微电网系统作为能源互联网的重要组成部分,研究多微电网系统中多主体的竞争博弈对能源互联网技术的发展具有重要的意义。在综合分析微电网运营商、大用户以及分布式聚合商市场主体需求及收益等因素的基础上,构建了基于区块链技术的多微电网系统竞争博弈模型;针对这一复杂多目标优化问题,提出了采用改进蚁群优化算法(IACO)进行求解。对所构建的竞争博弈模型及求解算法进行了仿真分析,仿真结果表明,基于所提模型得到的各时段最优电价策略可有效地平衡市场各主体的效益,从而实现多方共赢和协调发展;结果验证了IACO在求解基于区块链技术多目标优化问题时的适应性和有效性。

关键词:区块链;多微电网;能源互联网;竞争博弈;电力市场;蚁群算法;模型

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.028

0 引言

当前,一次能源消耗加快、环境恶化严重、气候变化加剧等是全球经济发展共同面对的重要问题^[1]。以新能源发电、低碳交通和信息技术高度融合的能源互联网EI(Energy Internet)为各类能源的灵活接入和规模化生产利用提供了可能的解决方案^[2]。由多个微电网组成的局域多微电网系统被认为是能源互联网的一种典型子网,也是实现能源互联网技术发展的重要前提和必经途径^[3]。随着储能技术的发展以及智能电网技术的推进,局域多微电网在电力市场中必将产生新的市场主体(如分布式聚合商DA(Distributed Aggregator)),这使得参与竞争的市场主体呈现了双重性和多元化特征,每个主体既是生产者又是消费者^[4];市场主体类型不再固定不变,而是以更加灵活的形式显现,电力市场中的竞争也将日趋复杂。新形势下,如何充分保障各市场主体的利益均衡、提高可再生能源的利用比例,成为推动多微电网系统建设必须要解决的问题。因此,构建多微电网市场竞争博弈模型,对于分布式能源消纳和能源互联网技术的发展具有重要的理论和现实意义。

近年来,部分学者对多微电网系统博弈竞争问题的研究已形成一定的成果。文献[5]基于微电网与配电网之间的交易影响,建立了非合作博弈的多微电网交易模型及求解流程,求解得出了微电网之间发生交易的形成条件及影响因素;文献[6]首先建立了基于价格差异与时间贯序权重的多微智能配

电网两阶段快速决策模型,并在此基础上构建了基于最大投标风险承受比例电量和最小用电成本的电价投标决策模型,通过多代理仿真平台仿真验证了模型的有效性;文献[7]建立了多微电网运营商MO(Microgrid Operator)在日前电力市场博弈竞争模型和市场运营商最优经济调度模型的双层优化模型,并基于完全信息下的动态博弈方法和双层优化求解模型计算了配电侧电力市场的纳什均衡点;文献[8]建立了孤岛运行方式下含储能单元的微电网多代理动态博弈模型,解决了孤岛运行方式下微电网系统各分布式能源之间的竞争博弈问题;文献[9]从经济性角度提出了一种基于博弈论的多级微电网优化配置模型,分析了不同投资主体的利益关系,为微电网的设计与建设提供了参考;文献[10]提出了多个微电网间联盟控制博弈模型,分析了联盟协作形成过程及算法;文献[11]针对多微电网配电侧需求响应问题,分别建立了微网内部功率优化模型和基于博弈的多微网竞价博弈模型,并通过仿真验证了模型的有效性和可行性。

上述研究取得了较好的成果,但大部分研究仅局限于发电侧或需求侧之间的博弈竞争,尚未涉及对多微电网系统中多元主体之间博弈竞争的研究。此外,随着未来市场多元化进程的不断加深,规模庞大、结构复杂以及高度实时性的多能源系统数据将会不断涌现^[12],市场主体对市场行为的把握不再靠直觉判断,而基于大规模数据分析的快速分析决策将会成为市场主体参与博弈竞争的主要发展方向。区块链作为一种分布式记账系统,所具备的数据透明性和可靠性使其能够很好地适用于分散化系统结构的数据分析和决策^[13],基于区块链技术的市场经济生态环境,可极大地减少不同市场主体间重塑或信任维护的成本,可有效地防止市场中的寻租

收稿日期:2017-11-13;**修回日期:**2018-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71501071)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71501071)

行为。因此,将区块链技术应用用于分散化的多微电网系统电力市场建设中,可实现物理信息流的高度融合和快速运转,有助于市场主体从海量数据中进行快速分析决策,帮助提高局域电力市场的运行效率,并保证市场能够健康有序发展。

本文首先对区块链技术的相关概念进行了简要介绍,并对区块链技术与多微电网市场竞争博弈之间的契合度进行了分析;其次,从局域多微电网市场结构出发,建立了基于微电网运营商主体、大用户主体以及分布式聚合商主体等多方非合作博弈模型;然后,鉴于蚁群算法(ACO)与区块链技术共同存在的去中心化特征,采用改进蚁群算法 IACO(Improved Ant Colony Optimization algorithm)对上述多主体博弈模型进行求解;最后,通过算例对博弈模型进行仿真分析,验证所构建模型及求解算法的可行性和有效性。

1 区块链技术与多微电网市场竞争博弈契合度分析

1.1 区块链技术

区块链技术是互联网时代的新兴信息产业技术,通过去中心化和去信任的方式实现网络数据的维护,并采用密码学技术让区块之间的数据记录相互关联,交易信息由网络其他用户监督和审定,交易记录不可伪造、不可修改^[14]。实质上,区块链是由密码学算法产生带有时间戳数据区块(block)组成的链条,每个数据块主要包含区块头和区块数据两部分^[15],区块头的内容包括版本号、Harsh 值、Merkle 树等用于链接下一数据区块的外部信息;区块数据主要包括时间段内的全部交易信息数据,用于数据分析和处理,为节点用户提供决策方案。数据区块主体图如图 1 所示,各行区块代表主体在时间维度上形成的区块链,而行间链接代表区块主体间的互络联通,在时间维度上形成的区块网络增强了信息的可追溯性和安全可信性。

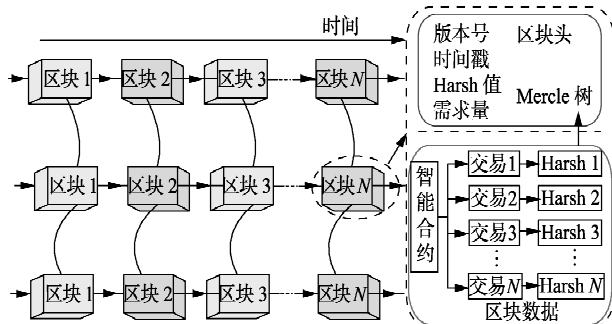


图 1 数据区块主体图

Fig.1 Main body diagram of data block

区块链技术作为分布式数据存储、记录和呈现的新型方式,在未来数据库的架构与拓展中具有极

大的潜力,主要具备以下 5 个方面的特点^[16]。

a. 去中心化。采用分布式存储和核算方式,区块链技术不存在中心化的硬件或管理结构,任意网络节点均有相等的权利和义务,网络中的数据模块由整个系统具备维护特性的节点来共同维护;而节点间的数据交换和传递只需要通过数字签名进行验证,不需要相互信任或依赖,只需按照规则实现交易即可。

b. 信息开放透明。区块链网络的开放性特征以及数据的透明性是节点用户之间赢取信任的基础。系统中除了被加密的私密信息,其他数据都会被其他节点用户查询和监督,任何用户都可以通过 Hash 值获取区块数据,整个系统的信息高度透明开放。另外,各节点用户均基于同一共识机制,通过相互竞争计算实现整个区块网络数据的安全可靠性,部分节点运行停滞,其他节点仍能正常工作,并不会对整个系统造成大的冲击。

c. 数据安全可信。区块链技术采用非对称密码学原理对数据进行加密,利用网络用户公式算法形成强大的护盾抵御外部攻击,从而保证了区块链数据的不可篡改和不可伪造,网络数据具有高度的安全性和可靠性。基于协商一致的数学规范和协议,任何人都不具备数据读写权,都不能对系统数据进行修改或删除,使系统能够在环境自由安全条件下交换数据,人为干预不会起任何实质性影响。

d. 区块信息可追溯。区块链是由带有时间顺序的区块相互链接而成,信息可通过区块特定标志进行查找,交易的完整传递路径能够被清晰地记录和追溯,可清晰掌握整个链条信息的传递过程,便于其他用户的监督和管理。

e. 交易双方匿名。由于节点之间的信息交换遵循特定的数学算法,数据交互无需任何信任,因此交换双方无需公开身份让对方产生信任。

1.2 契合度分析

伴随智能微电网技术和电力市场的发展,区块链技术的引入可有效地推动能源互联网产业的升级和完善,研究区块链技术下的多微电网市场博弈竞争将会对我国能源市场化改革带来积极的影响。区块链技术与多微电网市场竞争博弈的契合度主要体现在以下 5 个方面。

a. 区块链技术可以促进多微电网市场竞争博弈信息公开透明化。区块链信息的自由特性体现了市场的公平竞争,随着时间推进,市场会逐渐达到平衡,系统资源也会得到有效的配置,系统整体将达到 Pareto 最优。另外,信息的完全公开和可追溯性大幅减少了市场寻租行为,驱使市场主体在市场规则下演绎市场行为。区块的时间特性造就了各市场主体在完全信息条件下进行博弈竞争,可实现完全信

息的动态博弈。

b. 区块链技术可促进多微电网市场竞争博弈去中心化。在市场竞争中,每个市场主体都会产生大量的交易信息,如负荷信息、发电量等,在传统的博弈竞争中,这些信息都需要反馈给电网交易中心后统一发布市场信息,进而再组织市场主体竞价,竞价成功后由调度中心统一实现经济调度,这种方式无疑增加了信息流通环节,降低了信息的时效性。基于区块链技术的市场主体竞争支撑市场主体点对点的直接交易,信息的公开透明和可追溯特征使得市场竞争能够形成无中心依赖的可信任分布式系统,能够快速响应市场信息做出最优决策,从而节省了大量的时间成本,提高了信息流通效率,这无疑为市场的公平竞争增添了砝码。

c. 区块链技术可促进多微电网市场信息的动态化。基于区块链的市场博弈竞争中,博弈主体的市场信息是随时间的动态变化而变化的,每个节点每隔 Δt 的时间就会更新市场信息,并将其重新封存于新的带有时间戳的数据区块中,随着时间的增加,各区块先后连接形成具有动态结构的区块链 DBC (Dynamic Block Chain),各节点的市场主体可通过查看和分析其他节点的 DBC 来决策市场行为。数据区块的动态性使得市场竞争博弈更加灵活和方便,当交易发生后可以实现系统的自调度和生态化运行,基于动态数据模块链的分散决策为市场主体的博弈竞争决策问题提供了解决方案,通过多模协同运行实现区域自治。区块链信息的动态特性使得局域多微电网系统具备强大的持续性和旺盛的生命力,各主体会根据各个阶段的数据信息动态演化其他市场主体的动态行为,从而根据演绎结果做出相应的博弈策略,也就是说市场主体的博弈策略并不是固定不变,而是随着市场信息动态变动,确保了市场主体的最大化效益。

d. 区块链技术可促进多微电网市场交易信息的安全性。区块链技术是基于非对称加密算法解决用户的信任问题,包含了2个密钥:公开密钥(public key)和私有密钥(private key)。这种算法加密使得节点数据为全网所有节点共同认证和鉴定,保障了数据的安全性和有效性。区块链中的每个主题都拥有专属的公钥和私钥,用户用私钥对数据加密,其他用户则用公钥揭秘信息,采用私钥在数据尾部进行数字签名,其他用户则通过公钥解密认证数据的真实性。这种数据加密方式和认证形式保证了市场主体在博弈过程中数据的真实有效性,一旦某个节点数据发生危险,其他节点就能够迅速做出反应,解决了用户间信息不对称的问题,最大限度地减少了市场主体的寻租行为,保证了市场的竞争博弈朝有序方向发展,自动保障交易及利益分配的公平和高效

配置。

e. 区块链技术可完善多微电网市场竞争博弈的奖惩机制。基于区块链的多微电网市场主体竞争博弈,加入了实质性的激励机制和惩罚机制。基于智能合约或“可编程货币”实现的激励机制能够促进市场主体积极交易,加深市场化程度,鼓励提高清洁能源利用率,有效地降低对外部环境的碳排放。另外,智能化的惩罚机制加强了交易主体的自律性和信用等级,防止虚假交易和记录篡改,在解决市场主体公信力问题的同时,使得市场竞争具备更加市场化、扁平化和自治化的特征,避免多种能源的重复建设,减少能源供给浪费,并能够有效地提升可再生能源的消纳利用,解决环境污染等问题。

2 局域多微电网市场博弈模型构建

2.1 局域多微电网市场结构

本文所研究的局域多微电网市场结构如图2所示。局域多微电网市场结构中,市场主体主要包括微电网运营商、电力大用户 BC (Big Consumer) 和分布式聚合商三方,各主体都是理性的,均希望通过积极运作保障自己的最大利益。由图2可知,各市场模块由能量流和信息流连接互通;能量流在物理层面实现能量的传导和输送,信息流则以区块链形式实现各节点的信息传递;信息流与能量流的高度融合,加强了各主体之间能量传递的可靠性,并保障了市场交易的实时性。图2中微电网运营商的主要功能为生产和售卖电量,当系统发生缺电时也需要向分布式聚合商或其他微电网运营商购取电量;分布式聚合商的主要功能是收集和储存全部分布式用户的分散电能,通过购销差价赚取利润;电力大用户则只需考虑以最低成本获取自身所需电量即可,本文假设大用户不进行售电行为。

由图2可知,每个市场主体均配套相应的区块,各主体区块在同时段下会相互连接形成能源区块网络(blocks),而每个区块在不同时间段又会形成区块链条(chains),因此,能源区块网络会随着时间的推移形成能源区块链网络 EBN (Energy Blockchain Network)。在 EBN 中,各主体模块会主动提交自身的相关信息,如身份 ID、账户、能源形式、地理位置、装机容量等基础信息,用于区块网络认证和身份标识,并作为电能传输数据和市场交易数据的核心基础。在市场交易中,微电网运营商、大用户以及分布式聚合商三方之间存在的竞争关系使得三方的利益目标存在严重冲突,而通过 EBN 信息的分析和挖掘可能实现市场博弈均衡,达成三方共赢。在竞争博弈过程中,微电网运营商 i 作为市场中的电能主要生产,需要首先将各时段可参与竞价的售电电价 $P_{mo}(t)$ 和售电电量 $Q_{mo}(t)$ 向 EBN 持续广播信息数

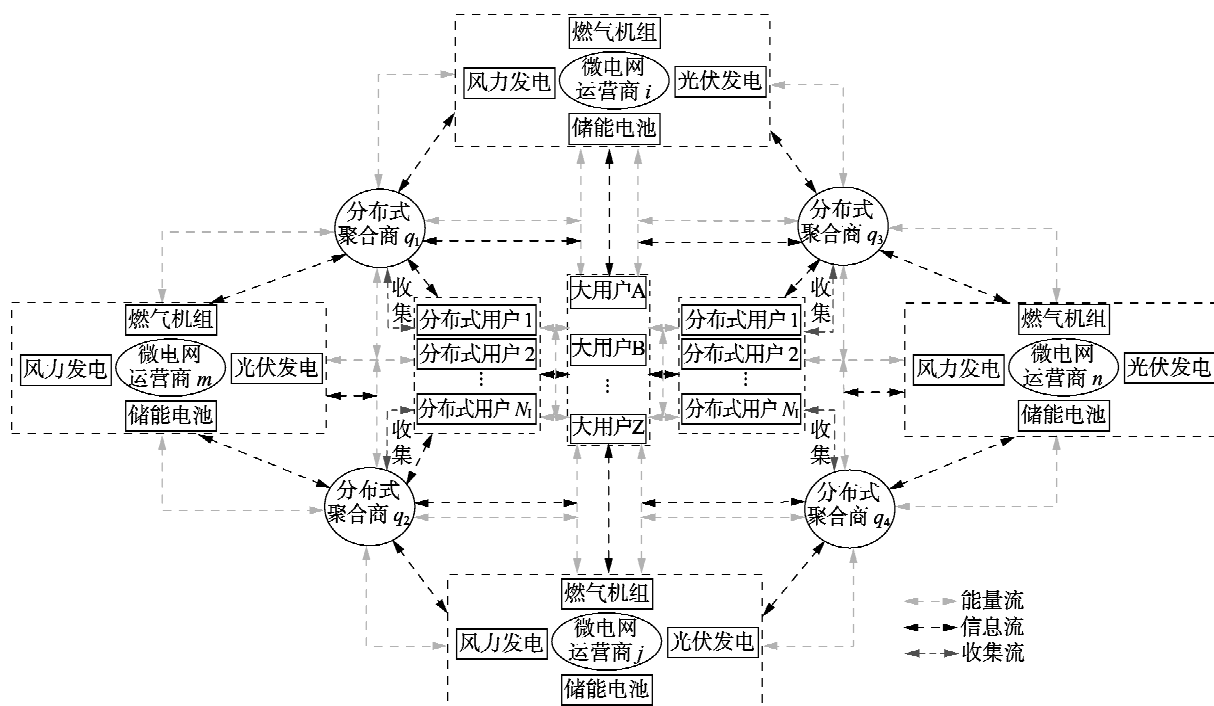


图 2 局域多微电网市场竞争博弈框架图

Fig.2 Marketing competition game framework of local multi-microgrids

据,并附上发送者的身份 ID。所有其他市场主体通过独立监听和记录微电网运营商发布的 EBN 全网数据,经过一定时间间隔 Δt 后,将自身的电价、电量等信息也发布到 EBN 中,并由其他用户共同监听和记录。全部市场主体的区块信息均在 EBN 中记录生成,各主体只需在规定的时间内对数据进行分析,并向 EBN 中的目标市场主体发布购售需求信息,当两两节点之间达成共识后,即可生成智能合约并完成交易。

2.2 市场主体数学模型

区块链技术所具备的透明性和去中心化特征,使市场主体能够更好地适应市场结构。各节点区块均拥有自身条件下的智能合约信息,如电网信息、用户信息、动态合约等^[17],通过查询和追溯不同用户节点之间的交易信息,市场主体会对电力市场需求、市场行为以及市场潜力进行深入分析和评估,进而优化运行策略,为用户自身提供优化和交易边界,并制定同时期在电力市场中的购售电策略,以追求自身利益最大化。在多微电网系统中,为了追求自身利益最大化,参与市场博弈的微电网运营商、大用户以及分布式聚合商三方主体会通过制定不同阶段的不同购售电策略来影响市场变化。因此,如何在区块链技术支撑下的市场条件中通过竞争博弈获取超额利润,是各博弈方最关心的问题。

2.2.1 微电网运营商需求

由于微电网内部含有间歇式能源(风电、太阳能等),在单位时段 Δt 内,其内容工序不一定与自身负荷平衡,对外通常呈现多余电量或缺少电量^[18]。当

系统有富余电量时,微电网运营商为了追求自身利益最大化会向其他微电网运营商、分布式聚合商、大用户以及部分个体用户出售电量获取收益 $R_{\text{sell}}^{\text{MO}}(t)$;当系统缺电时,微电网运营商会考虑向外界购电以保证自身负荷供电而产生购电成本 $C_{\text{buy}}^{\text{MO}}(t)$ 。另外,由于区块链技术下多微电网市场具有严格的奖惩机制,微电网运营商还需要考虑提升可再生能源利用率带来的奖励收益 $R_{\text{bonus}}^{\text{MO}}(t)$,以及额外碳排放造成的惩罚成本 $C_{\text{extra}}^{\text{MO}}(t)$ 等。以数学形式描述如下。

a. 向外售电收益 $R_{\text{sell}}^{\text{MO}}(t)$ 。

$$R_{\text{sell}}^{\text{MO}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} P_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} P_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t) + \sum_{m=1}^{N_3} P_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t) + \sum_{q=1}^{N_4} P_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t) \quad (1)$$

其中, $P_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t)$ 、 $P_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t)$ 、 $P_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t)$ 和 $P_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t)$ 分别为在时段 t 向第 i 个微电网运营商、第 j 个分布式聚合商、第 m 个大用户和第 q 个个体用户的售电电价; $Q_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t)$ 、 $Q_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t)$ 、 $Q_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t)$ 和 $Q_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t)$ 分别为在时段 t 向第 i 个微电网运营商、第 j 个分布式聚合商、第 m 个大用户和第 q 个个体用户的售电电量; N_1 为微电网运营商数量; N_2 为分布式聚合商数量; N_3 为大用户数量; N_4 为个体用户数量。

b. 向外购电成本 $C_{\text{buy}}^{\text{MO}}(t)$ 。

$$C_{\text{buy}}^{\text{MO}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} c_{\text{buy}}^{\text{MtoM}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{MtoM}}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} c_{\text{buy}}^{\text{AtoM}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{AtoM}}(t) \quad (2)$$

其中, $c_{\text{buy}}^{\text{MtoM}}(t)$ 和 $c_{\text{buy}}^{\text{AtoM}}(t)$ 分别为在时段 t 向第 i 个微电网运营商和第 j 个分布式聚合商的购电单位成本; $Q_{\text{buy}}^{\text{MtoM}}(t)$ 和 $Q_{\text{buy}}^{\text{AtoM}}(t)$ 分别为时段 t 内向第 i 个微电网运营商和第 j 个分布式聚合商的购电电量。

c. 激励效益和惩罚成本。

$$R_{\text{bonus}}^{\text{MO}}(t) = (i_{\text{re}} - i_{\text{re0}}) R_{\text{bonus}}(t) \quad (3)$$

$$C_{\text{extra}}^{\text{MO}}(t) = c_{\text{extra}}(t) (H_{\text{co2}}(t) - H_{\text{co2}}(t_0)) \quad (4)$$

其中, $R_{\text{bonus}}^{\text{MO}}(t)$ 为时段 t 内的激励效益; i_{re} 为当前阶段可再生能源利用率; i_{re0} 为系统可再生能源基准利用率; $R_{\text{bonus}}(t)$ 为每提高 1% 可再生能源利用率而获取的系统奖励收益; $C_{\text{extra}}^{\text{MO}}(t)$ 为时段 t 内的惩罚成本; $H_{\text{co2}}(t)$ 为当前时段的碳排放量; $H_{\text{co2}}(t_0)$ 为允许的基准碳排放量; $c_{\text{extra}}(t)$ 为每增加单位碳排放而受到的惩罚成本, 单位为元/kg。只有惩罚力度大于激励力度时才能发挥系统激励奖惩机制, 才能帮助提高可再生能源利用率。

d. 分布式电源出力补贴收益。

$$R_{\text{Subsidy}}^{\text{MO}}(t) = \sum_{k=1}^{\alpha_1} Q_{\text{solar}}^k(t) P_{\text{solar}}^{\text{Subsidy}} + \sum_{\mu=1}^{\alpha_2} Q_{\text{wind}}^{\mu}(t) P_{\text{wind}}^{\text{Subsidy}} \quad (5)$$

其中, $R_{\text{Subsidy}}^{\text{MO}}(t)$ 为时段 t 内分布式电源出力补贴收益; $Q_{\text{solar}}^k(t)$ 为第 k 个光伏电源在时段 t 内发电量; $P_{\text{solar}}^{\text{Subsidy}}$ 为光伏发电单位补贴收益, 单位为元/(kW·h); $Q_{\text{wind}}^{\mu}(t)$ 为第 μ 个风电在时段 t 内的发电量; $P_{\text{wind}}^{\text{Subsidy}}$ 为风力发电的单位补贴收益, 单位为元/(kW·h); α_1 、 α_2 分别为微电网运营商光伏发电和风力发电的数量。

2.2.2 大用户主体需求

大用户主体作为需求侧能源消费者, 其主要目的是以最小成本获取目标电量投入生产中; 而某些大用户主体也具备一定的生产电量的能力, 可以向外出售剩余电量。为了简化模型, 本文设定多微电网系统的大用户主体不具备生产电能的条件, 只考虑大用户购电的情况。大用户向外购电的目标主要包括向微电网运营商的购电成本 $C_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t)$ 和向分布式聚合商的购电成本 $C_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t)$, 具体购电形式视各主体的售电策略而定, 具体如下详述。

a. 向微电网运营商购电。

$$C_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} c_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) \quad (6)$$

其中, $c_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t)$ 为在时段 t 内大用户向第 i 个微电网运营商的购电单位成本; $Q_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t)$ 为时段 t 内大用户向第 i 个微电网运营商的购电电量。

b. 向分布式聚合商购电。

$$C_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) = \sum_{j=1}^{N_2} c_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) \quad (7)$$

其中, $c_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t)$ 为时段 t 内大用户向第 j 个聚合商的

购电单位成本; $Q_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t)$ 为时段 t 内大用户向第 j 个聚合商的购电电量。

2.2.3 分布式聚合商需求

基于区块链技术, 分布式聚合商可与分布式能源用户签订协议, 自动地生成智能合约, 将分散的可再生能源进行收集和存储, 并实现对分散式能源的集中管理和交易。分布式聚合商对不同发电资源的协同控制, 不仅能够激发普通用户积极参与到电力市场中, 还能够提高可再生能源的利用率, 是实现分布式能源消纳的重要途径。分布式聚合商主要通过买卖价差来实现利润最大化, 一方面以最低成本 $C_{\text{buy}}^{\text{A}}(t)$ 向外购电, 另一方面以最大收益 $R_{\text{sell}}^{\text{A}}(t)$ 向外售电。具体表现如下。

a. 向外购电成本。

向小型用户收集电能的成本:

$$C_{\text{buy}}^{\text{out}}(t) = \sum_{i=1}^{\delta_1} P_{\text{wind}}^i(t) Q_{\text{wind}}^i(t) + \sum_{j=1}^{\delta_2} P_{\text{solar}}^j(t) Q_{\text{solar}}^j(t) + \sum_{m=1}^{\delta_3} P_{\text{other}}^m(t) Q_{\text{other}}^m(t) \quad (8)$$

其中, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为小型风电用户数量、小型光伏发电用户数量、其他分布式发电用户数量; $P_{\text{wind}}^i(t)$ 、 $P_{\text{solar}}^j(t)$ 、 $P_{\text{other}}^m(t)$ 分别为时段 t 内分布式聚合商向风力发电用户、光伏发电用户和其他分布式发电用户购取分布式电量的电价; $Q_{\text{wind}}^i(t)$ 、 $Q_{\text{solar}}^j(t)$ 、 $Q_{\text{other}}^m(t)$ 分别为时段 t 内分布式聚合商购取的风力发电量、光伏发电电量和其他分布式发电电量。

向微电网运营商购电的成本:

$$C_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} c_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t) \quad (9)$$

其中, $c_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t)$ 为时段 t 内分布式聚合商向第 i 个微电网运营商的购电单位成本; $Q_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t)$ 为时段 t 内分布式聚合商向第 i 个微电网运营商的购电电量。

向其他分布式聚合商的购电成本:

$$C_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t) = \sum_{j=1}^{N_2} c_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t) \quad (10)$$

其中, $c_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t)$ 和 $Q_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t)$ 分别为时段 t 内分布式聚合商向其他第 j 个分布式聚合商的单位购电成本和购电电量。

b. 储能运行成本。

$$C_{\text{run}}^{\text{batterys}}(t) = c_{\text{run}}^{\text{A}}(t) Q_{\text{battery}}^{\text{A}} \quad (11)$$

其中, $C_{\text{run}}^{\text{batterys}}(t)$ 为时段 t 内分布式聚合商 j 的储能运行成本; $c_{\text{run}}^{\text{A}}(t)$ 为时段 t 内分布式聚合商 j 储能的单位运行成本; $Q_{\text{battery}}^{\text{A}}$ 为分布式聚合商 j 的储能容量。

c. 售电收益。

向微电网运营商售电的收益:

$$R_{\text{sell}}^{\text{AtoM}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} P_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t) \quad (12)$$

其中, $P_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t)$ 和 $Q_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t)$ 分别为时段 t 内向微电网运营商 i 的售电电价和售电量。

向大用户售电的收益:

$$R_{\text{sell}}^{\text{AtoU}}(t) = \sum_{m=1}^{N_3} P_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t) \quad (13)$$

其中, $P_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t)$ 和 $Q_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t)$ 分别为时段 t 内向大用户 m 的售电电价和售电量。

向其他分布式聚合商售电的收益:

$$R_{\text{sell}}^{\text{AtoA}}(t) = \sum_{j=1}^{N_2} P_{\text{sell}}^{\text{AtoA}_j}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{AtoA}_j}(t) \quad (14)$$

其中, $P_{\text{sell}}^{\text{AtoA}_j}(t)$ 和 $Q_{\text{sell}}^{\text{AtoA}_j}(t)$ 分别为时段 t 内向其他分布式聚合商 j 的售电电价和售电量。

2.2.4 非合作博弈模型

(1) 博弈主体 Γ 。

本文研究的多微电网市场竞争博弈模型的博弈主体主要为时段 t 内有购电需求的 N_M 个微电网运营商主体、 N_U 个大用户主体以及 N_A 个分布式能源聚合商主体, 表示为:

$$\Gamma = \{M_1, M_2, \dots, M_{N_M}, U_1, U_2, \dots, U_{N_U}, A_1, A_2, \dots, A_{N_A}\} \quad (15)$$

(2) 策略空间 $P(t)$ 。

各市场主体博弈的策略均为其购电单位成本 $C_{\text{buy}}(t)$ 、售电电价 $P_{\text{sell}}(t)$ (单位均为元/(kW·h))。微电网运营商的购电单位成本实质上为时段 t 内售电主体的售电电价, 因此, 微电网运营商可暂时不考虑购电单位成本作为策略集, 为了追求自身利润的最大化, 只需视具体情况制定售电电价作为博弈策略空间即可。因此可知微电网运营商 i 的博弈售电策略为: $\eta_{\text{sell}}^i = \{P_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t), P_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t), P_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t), P_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t)\}$ 。大用户主体不存在售电情况, 因此其市场博弈策略集合主要表现为低购电成本: $\eta_{\text{buy}}^U = \{c_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}, c_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}\}$ 。分布式聚合商主体主要通过储能收集分布式电量, 利用购销差价赚取中间利润, 其博弈策略空间表现在售电电价方面: $\eta_{\text{sell}}^A = \{P_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t), P_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t), P_{\text{sell}}^{\text{AtoI}_q}(t)\}$ 。

(3) 目标函数 F 。

微电网运营商、大用户以及分布式聚合商三方主体的竞争博弈目标是使自身利益最大化, 即以最小成本获取最大效益, 各主体的目标函数具体描述如下。

a. 微电网运营商的目标函数为:

$$\begin{aligned} \max \Pi_{\text{MO}}(t) &= R_{\text{sell}}^{\text{MO}}(t) - C_{\text{buy}}^{\text{MO}}(t) + \\ &R_{\text{bonus}}^{\text{MO}}(t) - C_{\text{extra}}^{\text{MO}}(t) + R_{\text{subsidy}}^{\text{MO}}(t) = \\ &\sum_{i=1}^{N_1} (P_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t) - c_{\text{buy}}^{\text{MtoM}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{MtoM}}(t)) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{N_2} (P_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t) - c_{\text{buy}}^{\text{AtoM}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{AtoM}}(t)) + \\ &\sum_{m=1}^{N_3} P_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t) + \sum_{q=1}^{N_4} P_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t) + \\ &(i_{\text{re}} - i_{\text{re0}}) R_{\text{bonus}}(t) - c_{\text{extra}}(t) (H_{\text{co2}}(t) - H_{\text{co2}}(t_0)) + \\ &\sum_{k=1}^{\alpha_1} Q_{\text{solar}}^k(t) P_{\text{solar}}^{\text{Subsidy}} + \sum_{\mu=1}^{\alpha_2} Q_{\text{wind}}^{\mu}(t) P_{\text{wind}}^{\text{Subsidy}} \quad (16) \end{aligned}$$

b. 大用户的目标函数为:

$$\begin{aligned} \min C_U(t) &= C_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) + C_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) = \\ &\sum_{i=1}^{N_1} c_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} c_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) \quad (17) \end{aligned}$$

c. 分布式聚合商的目标函数为:

$$\begin{aligned} \max \Pi_A(t) &= R_{\text{sell}}^{\text{AtoM}}(t) + R_{\text{sell}}^{\text{AtoU}}(t) + R_{\text{sell}}^{\text{AtoA}}(t) - \\ &C_{\text{buy}}^{\text{out}}(t) - C_{\text{run}}^{\text{batterys}}(t) - C_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t) - C_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t) = \\ &\sum_{i=1}^{N_1} P_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t) + \sum_{m=1}^{N_3} P_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t) + \\ &\sum_{j=1}^{N_2} P_{\text{sell}}^{\text{AtoA}_j}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{AtoA}_j}(t) - \sum_{i=1}^{\delta_1} P_{\text{wind}}^i(t) Q_{\text{wind}}^i(t) - \\ &\sum_{j=1}^{\delta_2} P_{\text{solar}}^j(t) Q_{\text{solar}}^j(t) - \sum_{m=1}^{\delta_3} P_{\text{other}}^m(t) Q_{\text{other}}^m(t) - \\ &c_{\text{run}}^{\text{A}_j}(t) Q_{\text{battery}}^{\text{A}_j} - \sum_{i=1}^{N_1} c_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{MtoA}}(t) - \\ &\sum_{j=1}^{N_2} c_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{AtoA}}(t) \quad (18) \end{aligned}$$

(4) 约束条件。

a. 微电网运营商的约束条件。

分布式发电机组出力约束:

$$0 < L_{\text{wind}}^{\alpha}(t) < L_{\text{wind}}^{\max}(t) \quad (19)$$

$$0 < L_{\text{solar}}^{\beta}(t) < L_{\text{solar}}^{\max}(t) \quad (20)$$

$$L_{\text{MT}, \min}^{\theta}(t) < L_{\text{MT}}^{\theta}(t) < L_{\text{MT}, \max}^{\theta}(t) \quad (21)$$

售电量约束:

$$\begin{aligned} 0 \leq &\sum_{i=1}^{N_1} Q_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t) + \sum_{m=1}^{N_3} Q_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} Q_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t) + \\ &\sum_{q=1}^{N_4} Q_{\text{sell}}^{\text{MtoI}_q}(t) \leq \left(\sum_{\alpha=1}^{\delta_1} L_{\text{wind}}^{\alpha}(t) + \sum_{\beta=1}^{\delta_2} L_{\text{solar}}^{\beta}(t) + \right. \\ &\left. \sum_{\theta=1}^{\delta_3} L_{\text{MT}}^{\theta}(t) - \sum_{i=1}^{N_1} L_{\text{load}}^{\text{MO}_i}(t) \right) \Delta t \quad (22) \end{aligned}$$

售电电价约束:

$$P_{\min}(t) \leq \{P_{\text{sell}}^{\text{MtoM}_i}(t), P_{\text{sell}}^{\text{MtoA}_j}(t), P_{\text{sell}}^{\text{MtoU}_m}(t)\} \leq P_{\max}(t) \quad (23)$$

b. 大用户主体的约束条件。

购电量约束:

$$\sum_{i=1}^{N_1} Q_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} Q_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}(t) \geq Q_{\text{buy}}^U(t) \quad (24)$$

购电电价约束:

$$\eta_{\text{buy}}^{\text{U}} = \{c_{\text{buy}}^{\text{MtoU}}, c_{\text{buy}}^{\text{AtoU}}\} \leq c_{\text{buy}}^{\text{U}}(t) \quad (25)$$

c. 分布式聚合商的约束条件。

储能电池功率约束:

$$L_{\text{ESS}}^{\min} \leq L_{\text{ESS}}(t) \leq L_{\text{ESS}}^{\max} \quad (26)$$

售电电量约束:

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_1} Q_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t) + \sum_{m=1}^{N_3} Q_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t) \leq \sum_{\alpha=1}^{\delta_1} Q_{\text{wind}}^{\alpha}(t) + \sum_{\beta=1}^{\delta_2} Q_{\text{solar}}^{\beta}(t) + \sum_{\theta=1}^{\delta_3} Q_{\text{other}}^{\theta}(t) \quad (27)$$

售电电价约束:

$$P_{\min}(t) \leq \{P_{\text{sell}}^{\text{AtoM}_i}(t), P_{\text{sell}}^{\text{AtoU}_m}(t)\} \leq P_{\max}(t) \quad (28)$$

d. 系统功率平衡。

$$D(t) = \sum_{i=1}^{N_1} L_{\text{sell}}^{\text{MO}_i}(t) + \sum_{j=1}^{N_2} L_{\text{sell}}^{\text{A}_j}(t) + \sum_{q=1}^{N_4} L_{\text{sell}}^{\text{I}_q}(t) \quad (29)$$

其中, $L_{\text{wind}}^{\alpha}(t)$ 为第 α 台风机在时段 t 内的功率输出; $L_{\text{wind}}^{\max}(t)$ 为第 α 台风机的最大功率输出; $L_{\text{solar}}^{\beta}(t)$ 为第 β 个光伏发电在时段 t 内的功率输出; $L_{\text{solar}}^{\max}(t)$ 为第 β 个光伏发电的最大功率输出; $L_{\text{MT}}^{\theta}(t)$ 为第 θ 台微型燃气轮机在时段 t 内的功率输出; $L_{\text{MT},\min}^{\theta}(t)$ 、 $L_{\text{MT},\max}^{\theta}(t)$ 分别为第 θ 台燃气轮机的最小以及最大功率输出; $L_{\text{load}}^{\text{MO}_i}(t)$ 为微电网运营商 i 在时段 t 的负荷值; $P_{\min}(t)$ 、 $P_{\max}(t)$ 分别为时段 t 内微电网运营商的最小、最大售电价格; $Q_{\text{buy}}^{\text{U}}(t)$ 为时段 t 内大用户主体的最少需求量; $c_{\text{buy}}^{\text{U}}(t)$ 为时段 t 内大用户主体购电的最高限价; $L_{\text{ESS}}(t)$ 为时段 t 内储能电池的功率输出; $L_{\text{ESS}}^{\min}$ 、 $L_{\text{ESS}}^{\max}$ 分别为储能电池的最低和最高放电功率; $Q_{\text{other}}^{\theta}(t)$ 为第 θ 台其他分布式发电时段 t 内的可售电量; 式 (29) 表示系统负荷总需求等于系统总供给, $D(t)$ 为系统总需求, $L_{\text{sell}}^{\text{MO}_i}(t)$ 、 $L_{\text{sell}}^{\text{U}}(t)$ 和 $L_{\text{sell}}^{\text{I}_q}(t)$ 分别为微电网运营商、分布式聚合商以及个体用户的可提供的负荷。

3 区块链技术下多微电网市场竞争博弈模型求解

3.1 IACO

ACO 是对自然界蚂蚁搜寻食物过程的一种仿生, 蚂蚁通过不断的交流合作, 最终找出巢穴和食物间的最优路径; 蚂蚁在寻找路径的过程中, 会在当前路径上释放一定的信息素, 如果路径越长, 则释放的信息素就越低; 当碰到障碍物时, 蚂蚁会以一定的概率随机地选择一条道路, 概率的大小是由该道路上的信息浓度决定的; 信息素具有挥发性, 随着时间的推移, 信息素在最优路径上的浓度会越来越高, 而其他路径的浓度会随着时间的推移挥发, 最终整个蚂蚁群体找到最优路径。

ACO 与区块链都存在去中心化特征, ACO 通过

个体间的沟通协作可实现整体寻优, 而区块链通过区块间的互相监督 and 共同维护保证了信息传递的安全可靠和透明性。ACO 在求解多目标 Pareto 最优化问题时有着优异的表现, 区块链网络与旅行商问题也具备相似性, 因此, 采用 ACO 求解基于区块链技术的多微电网市场竞争博弈模型具有可行性。为了更好地实现模型的求解, 得到 Pareto 最优结果, 本文在基本 ACO 的基础上从转移概率和信息素挥发因子两方面对其进行改进, 具体改进方法如下。

a. 自适应调整信息素挥发因子。

ACO 中挥发因子 ρ 的大小直接影响到 ACO 的全局搜索能力及其收敛速度, 当要处理的问题规模比较大时, 这种影响更为突出, 基于此, 本文引入了自适应调整信息素挥发因子, 旨在通过自适应地改变信息素挥发因子 ρ 来提高算法的全局搜索能力。

设 ρ 的初始值 $\rho(t_0) = 1$, 当 ACO 求得的最优值在 N 次循环后没有得到明显的改进时, ρ 按照以下公式进行调整^[19]:

$$\rho(t) = \begin{cases} 0.95\rho(t-1) & 0.95\rho(t-1) \geq \rho_{\min} \\ \rho_{\min} & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

其中, $\rho_{\min}$ 为 ρ 的最小值, 可以防止 ρ 过小而降低收敛速度, 一般设 $\rho_{\min} = 0.1$ 。

b. 转移概率的改进。

在模型求解中, 如果参数 a 、 b 选取不当的话会直接影响模型求解的速度和求解的效果, 为了提高 ACO 的计算效率, 可将参数 a 、 b 定义为^[20]:

$$a = 1 + e^{-0.1N_{\max}} \quad (31)$$

$$b = \frac{2.5}{e^{1-a} + 1} \quad (32)$$

其中, $N_{\max}$ 为最大迭代次数, 可以通过控制其中一个参数来控制 2 个参数, 增加了参数间的联动性。

3.2 基于 IACO 模型的各方主体竞争博弈流程

采用 IACO 求解区块链技术下多微电网市场各主体竞争博弈流程如下。

a. 设置各博弈主体参与竞争博弈的初始策略集合。针对市场主体 k , 在其报价范围内随机生成 n_a 个蚂蚁个体, 每个个体代表一种报价策略, 主体 k 在时段 t 的价格策略集合可表示为:

$$\eta_k(t) = \{P_{k1}(t), P_{k2}(t), \dots, P_{kn_a}(t)\} \quad (33)$$

$\eta_k(t=0)$ 表示市场主体 k 的初始策略。每个个体根据初始报价策略集计算主体 k 的目标函数初始值 $O_k^i(t)$ 。

b. 各市场主体根据自身需求向 EBN 发布购售信息。市场主体 k 通过预测时段 t 内的自身可控资源调节能力, 并向 P2P 网络发布购售信息。市场主体 k 利用公钥 $k_{\text{Publickey}}$ 和私钥 $k_{\text{Privatekey}}$, 生成带有时间戳的交易认证和信息传输地址 T_{address}^k , 然后市场主

体 k 向全网络广播购电需求或者售电信息:

$$I_{inB/S}^k = \{ [Q_{sell}^k \text{ or } P_{sell}^k] | [t, t+\Delta t], |k_{Publickey} | T_{address}^k \} \quad (34)$$

其中, $I_{inB/S}^k$ 为主体 k 的信息广播集合; Q_{sell}^k 和 P_{sell}^k 分别为主体 k 从时段 t 到 $t+\Delta t$ 期间发布的售电量和售电价格信息; $|k_{Publickey} | T_{address}^k$ 为主体 k 通过公钥计算得到的节点地址。

c. 各市场主体根据 EBN 已发布的信息更新自身的博弈策略。当市场主体 l 接收到市场主体 k 发送的信息后, 首先利用私钥 $l_{Privatekey}$ 对 k 的信息进行解密, 得到 $I_{inB/S}^k$ 的全部内容; 然后, 提取交易信息和签名内容进行对比, 验证市场主体 k 发布信息的真实性。根据市场主体 k 发布的信息和自身需求计算市场主体 l 的目标函数值 $O_l^i(t)$, 判断目标函数值是否满足条件, 若不满足, 则主体 l 调整策略, 向主体 k 要求提供二次报价策略或终止交易。二次报价策略即下一蚂蚁个体 j 的博弈循环。

d. 根据博弈策略更新目标函数值。若主体 l 接受主体 k 的购/售策略, 双方达成协议, 生成智能合约:

$$C_{trk-l}^i = [S_{signk} | S_{signl} || Q^i | [t, t+\Delta t] | P^i] \quad (35)$$

其中, C_{trk-l}^i 为主体 k 与主体 l 之间形成的智能合约脚本; S_{signk} 为主体 k 的签署脚本; S_{signl} 为主体 l 的签署脚本; Q^i 为签约电量; P^i 为签约电价。

判断主体 k 是否满足自身需求, 若满足则跳出循环; 若不满足, 则蚂蚁个体 i 通过计算转移概率 $p_{k-g}^i(t)$ 向下一个目标主体 g 出发并完成博弈。当全部蚂蚁个体完成一次循环后, 更新并记录全部个体的目标函数值 $\{O_k^1(t), O_k^2(t), \dots, O_k^i(t), \dots, O_k^{n_a}(t)\}$, 通过比较记录当前代最优个体 λ 及其目标函数值 $O_k^{\lambda}(t)$ 。

e. 利用式 (30) 更新信息素的浓度, 令迭代次数 $N=N+1$; 若 $N \leq N_{max}$, 则转向步骤 b; 否则, 输出最优结果。

4 算例仿真

为了验证所构建博弈模型的相关特点, 本文利用 Python3.6 软件构建了区域多微电网市场竞争博弈仿真系统; 系统选取 3 组微电网运营商 M_i 、2 组分布式聚合商 A_j 以及 3 组大用户 U_m 作为市场博弈竞争主体, 各主体之间根据自身的目标相互竞争, 并规定各博弈主体的购电价格由对应的售电价格替代。设定各类型市场主体的竞价策略空间一致, 则各类型主体的竞价策略区间描述为: 微电网运营商主体的竞价策略区间为 0.5~1.1 元/(kW·h); 分布式聚合商主体的竞价策略区间为 0.5~0.95 元/(kW·h); 大用户的竞价策略区间为 0.5~1.05 元/(kW·h)。此外, 为了减少模型的计算维度和复杂性, 本文设定

分布式聚合商 A_j 在各时段收集的分布式能源的成本相对固定, 规定大用户主体 U_m 只购不售。各主体间的购售简易结构如图 3 所示。通过预测得到各主体 24 h 的电能需求如图 4 所示。微电网运营商和分布式聚合商的售电能力如图 5 所示。

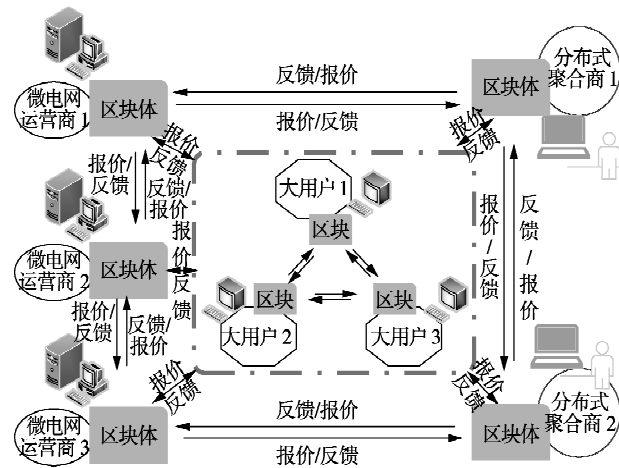


图3 各市场主体博弈简易结构

Fig.3 Simplified structure of market game players

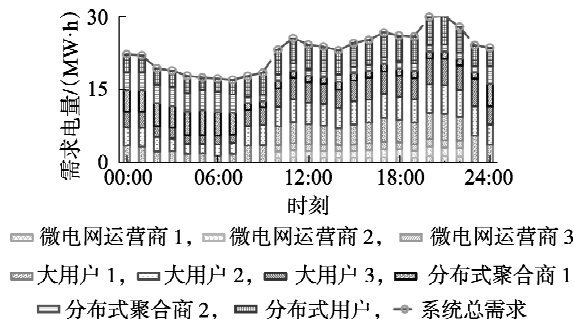


图4 各主体不同时段电力需求预测

Fig.4 Power demand forecast of each player in different time periods

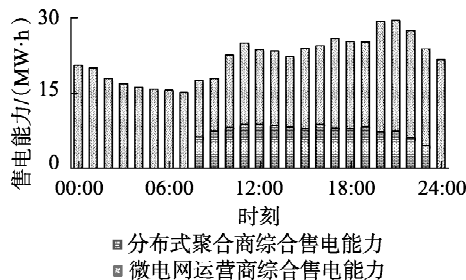


图5 各主体不同时段售电能力

Fig.5 Electricity selling ability of each player in different time periods

为了提高仿真计算效率, 本文所搭建测试平台环境包括 8 台 Intel(R)Core(TM)2Duo 系列 CPU, 并配置 Windows7 专业版系统和 8 GB 的 RAM, 每台计算机代表各博弈主体的区块, 以 IP 地址作为网络标识符实现竞价信息的交换和反馈。设置算法最大迭代次数为 $N_{max} = 200$; 各主体依据竞价策略区间随机生成蚂蚁个体数量为 $n_a = 35$, 由式 (31)、(32) 得到参

数 $a = 1.000\ 1$ 、 $b = 1.250\ 1$; 设定最小挥发系数 $\rho_{\min} = 0.1$ 。运行仿真系统,得到各主体在不同时段的竞价策略结果如图6所示(图中, $P_{M \rightarrow M}$ 为微电网运营商向微电网运营商的平均竞价策略; $P_{M \rightarrow A}$ 为微电网运营商向聚合商的平均竞价策略; $P_{M \rightarrow U}$ 为微电网运营商向大用户主体的平均竞价策略;其他依此类推),其中微电网运营商1各时段的竞价策略如图7所示(图中, $P_{M_1 \rightarrow A_1}$ 为微电网运营商1向聚合商1制定的竞价策略;其他依此类推)。

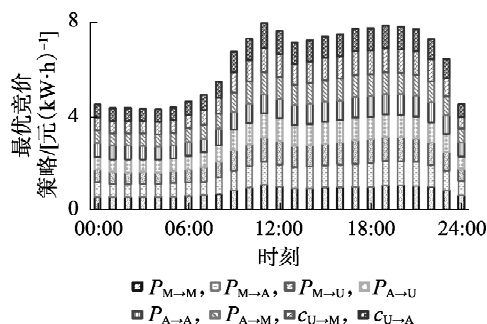


图6 各主体在不同时段的竞价策略

Fig.6 Bidding strategies of each player in different time periods

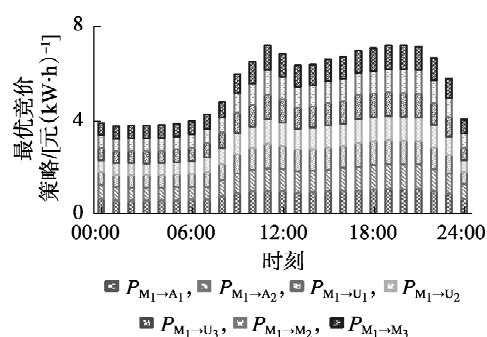


图7 微电网运营商1在不同时段的竞价策略

Fig.7 Bidding strategies of M_1 in different time periods

图6为各类主体针对其他市场主体的平均竞价策略,以11:00为例,通过博弈得出此时段的最优电价策略组合为: $P_{M \rightarrow M} = 1.05$ 元/(kW·h); $P_{M \rightarrow A} = 0.96$ 元/(kW·h); $P_{M \rightarrow U} = 1.04$ 元/(kW·h); $P_{A \rightarrow U} = 1.04$ 元/(kW·h); $P_{A \rightarrow A} = 0.82$ 元/(kW·h); $P_{A \rightarrow M} = 0.94$ 元/(kW·h); $c_{U \rightarrow M} = 1.04$ 元/(kW·h); $c_{U \rightarrow A} = 1.04$ 元/(kW·h)。

从以上数据可以看出,该时段的电力需求量在上午时段达到顶峰,各市场主体均以较高价格出售电量以获取最大利润。在向用户定制竞价策略时,微电网运营商的售电电价定为1.04元/(kW·h),而分布式聚合商此时向用户的定价应当不得高于1.04元/(kW·h),如果分布式聚合商的竞价策略过低,将不会获取高额利润,因此分布式聚合商的定价策略也为1.04元/(kW·h),这种策略下的用户购电成本最小,与此同时微电网运营商和分布式聚合商也达到了最佳收益。

另外,由于系统需求量较大,部分微电网运营商会出现缺电情况,需向其他主体购取电量。虽然此时段微电网运营商的需求量不大,但是分布式聚合商和其他微电网运营商为了追求最大化的利润而会参与竞价。多电微电网运营商向缺电微电网运营商的平均竞价策略为1.05元/(kW·h),而分布式聚合商向缺电微电网运营商的平均竞价策略为0.94元/(kW·h)。尽管分布式聚合商的竞价策略低于多电微电网运营商,但其供应能力有限,所以多电微电网运营商制定了较高电价以获取高额利润。图7为微电网运营商1在不同时段的最优竞价策略,其售电策略制定过程与图6类似,在此不再赘述。

微电网运营商和分布式聚合商在各时段向其他市场主体的售电量结果分别如图8和图9所示(图中, $Q_{M \rightarrow M}$ 为微电网运营商向微电网运营商的全部售电量; $Q_{M \rightarrow A}$ 为微电网运营商向分布式聚合商的全部售电量; $Q_{A \rightarrow M}$ 为分布式聚合商向微电网运营商的全部售电量;其他依此类推)。其中,大用户主体购电量为分布式聚合商和微电网运营商向大用户主体售电量的总和。

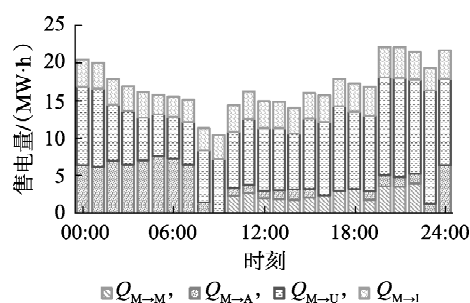


图8 微电网运营商售电量

Fig.8 Electricity sales of microgrid operators

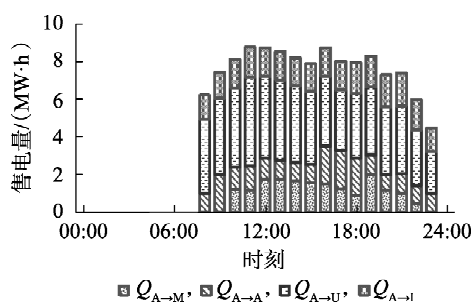


图9 分布式聚合商售电量

Fig.9 Electricity sales of distributed aggregators

从图8可以看出,系统在00:00—09:00时段为用电低谷阶段,各微电网系统的用电需求量为0,在此时段内各售电主体不会向微电网运营商售电。00:00—07:00时段属于分布式聚合商储能电池充电时段,此时电池充电需求量较大,微电网运营商的竞价策略不但可以起到填谷的作用,还能够最大化的向分布式聚合商出售电量以获取利润,而分布式聚合商也能够以较低的价格获取电能,双发均能达到

最优目的。此外,因在白天时段(08:00—23:00)受到分布式聚合商竞争影响,微电网运营商对大用户的售电效益也会受到一定的挤压;而00:00—07:00时段内,微电网运营商则成为了大用户用电的主要供应者,并相应地收获较好的效益。

如图9所示,分布式聚合商储能电池在00:00—07:00时间段处于充电状态,不参与任何市场行为;在其他时间段则会与其他市场主体形成竞争,通过制定最优竞价策略来实现自身利润最大化。

为了说明具体市场主体的售电能力,图10和图11分别展示了微电网运营商1和分布式聚合商1在各个时段的售电情况(图中, $Q_{M_1 \rightarrow M_2}$ 为微电网运营商1向微电网运营商2的售电电量; $Q_{M_1 \rightarrow A_1}$ 为微电网运营商1向聚合商1的售电电量; $Q_{A_1 \rightarrow M_1}$ 为分布式聚合商1向微电网运营商1的售电电量; $Q_{A_1 \rightarrow U_1}$ 为分布式聚合商1向大用户1的售电电量;其他依此类推)。以16:00时向大用户1售电为例,微电网运营商1的售电电量为1064 kW·h,分布式聚合商1的售电电量为881 kW·h,而此时二者向大用户的竞价策略分别为0.95元/(kW·h)和0.96元/(kW·h),说明微电网运营商以较低售电电价使其售电电量和收益均有所增大,获得较高于分布式聚合商1的售电电量和收益。

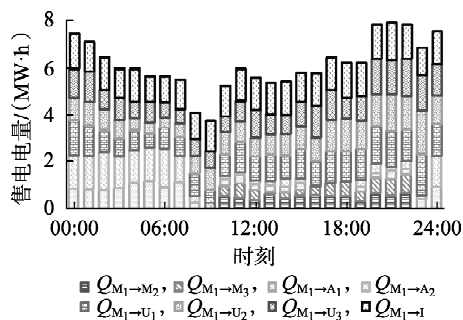


图10 微电网运营商1的售电情况

Fig.10 Electricity sales of M_1

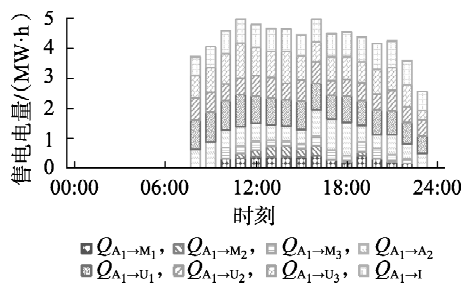


图11 分布式聚合商1的售电情况

Fig.11 Electricity sales of A_1

图12为IACO每次迭代后产生的Pareto最优值散点图,说明IACO能够找到满足条件的解,算法全局优化能力较强。另外,从图12中可以看出,在微电网运营商高效益、大用户低成本和分布式聚合商

高效益区域并不存在Pareto最优点,说明三者的目标函数之间存在矛盾性,各方之间形成竞争博弈之势,使得三方在高收入、低成本区域并不存在满足条件的解。比如微电网运营商获取较高收益的同时,会挤压分布式聚合商的效益,而大用户成本也会随之增加;然而市场竞争博弈使得市场主体之间相互制约,有效地杜绝了低成本、高收入这种情况的发生,从而提高了市场运营效率。

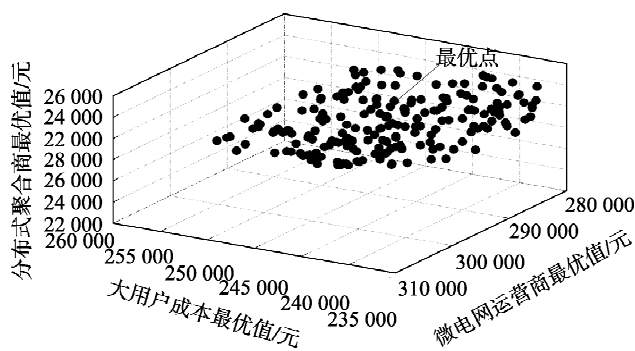


图12 各主体 Pareto 最优散点图

Fig.12 Pareto optimal scatter plot of each player

图13为不同时段各类市场主体的Pareto最优前沿(分布式聚合商最优效益为标么值)。从图13中可以得出以下结论。①微电网运营商对应的Pareto最优前沿利润范围为4629.9~21434.9元,利润最小值和最大值分别发生在07:00和20:00。因为在07:00时,系统中分布式聚合商的需求逐渐降到最低,同时用户的需求也相对较低,则影响了微电网运营商的售电效益;而在20:00时,系统的需求达到顶峰,分布式聚合商的供电能力也在逐渐下降,此时系统用电需求则主要由微电网运营商提供,使得利润增加。②Pareto最优前沿对应的大用户主体成本范围为2856~16640.6元,最小值和最大值对应的时间分别为04:00和20:00。因为在04:00时,大用户主体的需求较小,加上微电网运营商的低电价策略,使得此时大用户的用电成本最低;而在20:00时,大用户主体的电量需求和系统电价均相对较大,则大用户主体的用电成本也随之增加。③Pareto最优前沿对应的分布式聚合商利润范围为-3939.7~5354元,由于分布式聚合商的储能电池在00:00—07:00时段内处于充电状态,并不具备对外供电能力,因此,其利润值为负值,只需保证以最小成本完成储能电池充电;而在08:00—23:00时间段内,分布式聚合商储能设备可以满足系统其他主体用电需求,通过制定最优竞价策略于11:00达到了最大利润值。

为了验证IACO的性能,本文分别采用ACO、遗传算法(GA)和粒子群优化(PSO)算法对目标函数完成200次优化求解。不同算法计算得到的最佳迭

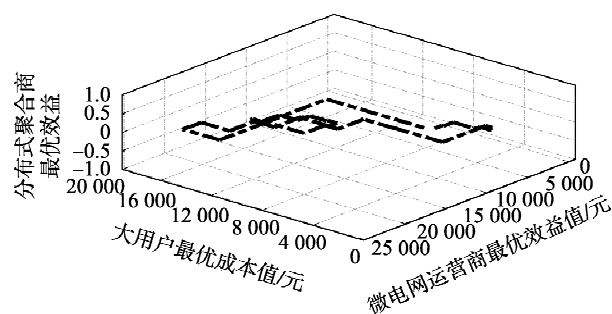


图13 各市场主体不同时段 Pareto 最优前沿

Fig.13 Optimal Pareto frontier of each player in different time periods

代次数、微电网运营商利润最大值(Π_{M0})、分布式聚合商利润最大值(Π_A)以及大用户成本最小值(C_U)如表1所示(其中平均收敛次数为各博弈主体目标函数收敛次数的平均值)。

表1 各算法多目标优化结果对比

Table 1 Comparison of multi-objective optimization results among four algorithms

算法	平均收敛次数	$\Pi_{M0}/\text{元}$	$\Pi_A/\text{元}$	$C_U/\text{元}$
IACO	62	293 296.3	27 219.6	239 033.7
ACO	75	267 138.5	25 381.5	271 041.3
GA	93	246 757.8	23 185.9	303 251.7
PSO	96	247 751.6	22 895.4	308 937.5

从表1可以看出,IACO和ACO的平均收敛次数小于GA和PSO算法,说明ACO的全局收敛能力优于GA和PSO算法,ACO模型与区块链去中心化特征的相似性,加强了ACO在求解问题时的收敛能力。此外,IACO和ACO的 Π_{M0} 、 Π_A 和 C_U 均优于GA和PSO算法,说明ACO的全局搜索能力要优于GA和PSO算法,再次证明了ACO在区块链网络中求解最优化问题时体现的强大搜索能力和效率性。IACO的平均收敛次数少于ACO,且IACO的 Π_{M0} 、 Π_A 和 C_U 也要优于ACO,说明对挥发因子 ρ 和控制参数 a 、 b 的改进提高了普通ACO的全局搜索能力和收敛性能,提高了运算效率,可以得到更优的结果。

此外,本文亦对IACO、ACO、GA和PSO算法在求解区块链技术下多微电网各主体竞争博弈模型时的求解效率进行了对比。图14对比了4种算法在不同网络节点下的求解效率。由图14可以看出,当网络节点数为8时,IACO稍优于其他算法,但随着网络节点数的增加,模型复杂程度越来越大,ACO的求解效率也越来越高,同等规模下的计算时间要远远小于GA、PSO算法,说明ACO的去中心化特征加强了区块链主体间的沟通效率,使得模型的求解效率更高、速度更快。另外,随着节点规模的增加,IACO的求解效率高于ACO,说明通过算法的改进加强了ACO的全

局搜索能力和快速收敛能力,从而提高了IACO的求解效率。

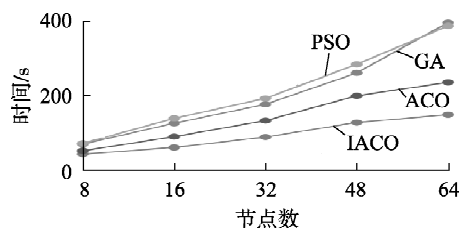


图14 各优化算法求解效率对比

Fig.14 Comparison of computation efficiency among four optimization algorithms

5 结论

a. 本文研究了局域多微电网系统中市场竞争博弈问题,通过分析微电网运营商、大用户以及分布式聚合商等多个市场主体的需求,基于区块链技术建立了局域多微电网市场竞争博弈模型,并充分考虑了多方主体之间的竞争关系和各自的目标。

b. 本文基于区块链网络和ACO共有的去中心化特征,提出了基于IACO求解局域多微电网市场竞争博弈的一般方法和流程。与ACO、GA和PSO算法相比,IACO在求解区块链技术下多目标问题时的全局搜索能力和收敛能力更强、求解效率更高。

c. 本文采用IACO对多微电网市场竞争博弈模型进行算例仿真分析,通过求解Pareto最优解结果表明:在微电网运营商高效益、大用户低成本和分布式聚合商高效益区域并不存在Pareto最优点,说明三者的目标函数之间存在矛盾性,多微电网系统电力市场各方主体之间形成明显的竞争关系,使得各方主体在高收入、低成本区域并不存在满足条件的解。

参考文献:

- [1] 曾鸣,杨雍琦,李源非,等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):681-691.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CESS, 2016, 36(3):681-691.
- [2] ZKOU K, YANG S, SHAO Z. Energy internet: the business perspective[J]. Applied Energy, 2016, 178:212-222.
- [3] ZHAO M, YU Q. Research of voltage control strategy for power management system in DC microgrid[C]//IEEE International Conference on Energy Internet. Beijing, China: IEEE, 2017:338-343.
- [4] 刘敦楠,曾鸣,黄仁乐,等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术,2015,39(11):3050-3056.
LIU Dunnan, ZENG Ming, HUANG Renle, et al. Business models and market mechanisms of E-Net(2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3050-3056.

- [5] 赵敏,沈沉,刘锋,等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
ZHAO Min, SHEN Chen, LIU Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [6] 江润洲,邱晓燕,李丹. 基于多代理的多微网智能配电网动态博弈模型[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3321-3327.
JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan. Multi-agent system based dynamic game model of smart distribution network containing multi-microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3321-3327.
- [7] 刘一欣,郭力,王成山. 多微电网参与下的配电侧电力市场竞争价博弈方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2469-2476.
LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Optimal bidding strategy for microgrids in electricity distribution market[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2469-2476.
- [8] 刘延博,邱晓燕,邱高,等. 孤岛运行下含储能系统的微电网多代理博弈模型[J]. 高压电器, 2016(7): 75-81.
LIU Yanbo, QIU Xiaoyan, QIU Gao, et al. Multi-agent game model of microgrid containing energy storage system in islanding operation[J]. High Voltage Apparatus, 2016(7): 75-81.
- [9] 陈健,刘玉田,张文,等. 基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 45-52.
CHEN Jian, LIU Yutian, ZHANG Wen, et al. Optimal sizing analysis of multilevel microgrids in distribution network based on game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 45-52.
- [10] 李会利,刘传清. 微电网联盟博弈模型与控制算法研究[J]. 智能电网, 2016, 4(3): 291-296.
LI Huili, LIU Chuanqing. A study on the model and control algorithm for coalitional game of microgrid[J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 291-296.
- [11] 黄顺杰,方华亮,许沛东. 基于博弈的多微网需求响应[J]. 南方电网技术, 2017, 11(2): 34-40.
HUANG Shunjie, FANG Hualiang, XU Peidong. Demand response of multi-microgrid based on game theory[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(2): 34-40.
- [12] 马天男,牛东晓,黄雅莉,等. 基于Spark平台和多变量L2-Boosting回归模型的分布式能源系统短期负荷预测[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1642-1649.
MA Tiannan, NIU Dongxiao, HUANG Yali, et al. Short-term load forecasting for distributed energy system based on Spark platform and multi-variable L2-Boosting regression model[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1642-1649.
- [13] 武赓,曾博,李冉,等. 区块链技术在综合需求侧响应资源交易中的应用模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3717-3728.
WU Geng, ZENG Bo, LI Ran, et al. Research on the application of block chain in the integrated demand response resource transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728.
- [14] 欧阳旭,朱向前,叶伦,等. 区块链技术在用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, et al. Preliminary applications of block chain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [15] 张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.
- [16] 颜铂,赵俊华,文福拴,等. 能源系统中的区块链:概念、应用与展望[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 12-20.
YAN Yong, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Blockchain in energy systems: concept, application and prospect[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 12-20.
- [17] 杨德昌,赵肖余,徐梓潇,等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3664-3671.
YANG Dechang, ZHAO Xiaoyu, XU Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3664-3671.
- [18] 朱荏,王海波,赵振宇,等. 大规模分布式能源博弈竞争模型及其求解算法[J]. 电力建设, 2017, 38(4): 135-143.
ZHU Jiang, WANG Haichao, ZHAO Zhenyu, et al. Game competition model of large-scale distributed energy system and its solution algorithm[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(4): 135-143.
- [19] 袁亚博,刘羿,吴斌. 改进蚁群算法求解最短路径问题[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(6): 8-12.
YUAN Yabo, LIU Yi, WU Bin. Solving shortest path problem with modified ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(6): 8-12.
- [20] 刘立,王建兴,秦书硕,等. 一种改进蚁群算法在配电网优化规划中的应用[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(24): 5801-5803.
LIU Li, WANG Jianxing, QIN Shushuo, et al. A kind of application of improve ant colony algorithm in power distribution network optimization planning[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(24): 5801-5803.

作者简介:



马天男

马天男(1992—),男,宁夏吴忠人,工程师,博士,从事电力技术经济评价、电力负荷预测、大数据分析和电力市场等方面的研究工作(**E-mail**: matiannan_1234@126.com);

彭丽霖(1991—),女,四川达州人,工程师,博士,从事电力技术经济、电力市场、能源互联网等方面的研究工作(**E-mail**: penglilinbj@126.com);

杜英(1972—),女,四川成都人,高级经济师,从事技术经济评价、造价管理方面的研究工作(**E-mail**: duyong72@gmail.com);

苟全峰(1976—),男,四川成都人,高级经济师,从事造价管理、电力技术经济评价方面的研究工作(**E-mail**: 2394737812@qq.com);

王超(1991—),男,内蒙古呼伦贝尔人,经济师,硕士,从事电力技术经济、输变电工程风险管理方面的研究工作(**E-mail**: chaochao91812@126.com);

郭小帆(1990—),女,宁夏吴忠人,经济师,硕士,从事技术经济管理、电力市场等方面的研究工作(**E-mail**: guoxiao-fan1990@126.com)。

Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm

MA Tiannan¹, PENG Lili², DU Ying¹, GOU Quanfeng¹, WANG Chao¹, GUO Xiaofan³

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Power Exchange Center Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

3. Sichuan Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Block chain technology as a new distributed database technology has great application potential in the energy filed. As an important component of the energy internet, the research on the competition game of multi participants in the multi-microgrid system is of great significance to the development of energy internet technology. The market demand and profits of microgrid operators, big consumers and distributed aggregators are comprehensively analyzed, and the competition game model for the local multi-microgrid system is proposed based on the block chain technology, which is solved by the IACO (Improved Ant Colony Optimization algorithm). The proposed competition game model and the solution algorithm are simulated and results show that, the optimal electricity price strategy of each period obtained by the proposed model can effectively balance the benefits among market participants, realizing the win-win and coordinated development, and the adaptability and effectiveness of IACO in solving the multi-objective optimization problem based on the block chain technology are verified.

Key words: block chain; multi-microgrid; energy internet; competition game; electricity market; ant colony algorithm; models

(上接第 170 页 continued from page 170)

Faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network

GAO Jie¹, CHENG Qiming¹, CHENG Yinman², YU Deqing¹, TAN Fengren¹, ZHANG Yu¹

(1. Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory, College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at single phase to ground fault in the distribution network with DG (Distributed Generation), a faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network with DG is proposed. Firstly, the potential function parameters of bistable system are optimized by cross correlation cosine and quantum genetic algorithm, and the optimized bistable system is used to extract transient zero-sequence current of each line in noise background. Then, the normalized energy coefficient of transient zero-sequence current and cosine factor are calculated for each line. Finally, the feature angle is defined according to normalized energy coefficients and cosine factors, the line with feature angle bigger than 90° is judged as the faulty line. A large number of simulation experiments prove that immune to Gauss white noise intensity, fault resistances and fault distance and so on, the proposed method has the feasibility, effectiveness and applicability.

Key words: distributed power generation; distribution network; single-phase ground fault; transient zero-sequence current; faulty line selection; bistable system