

# 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术

李彬<sup>1</sup>, 曹望璋<sup>1</sup>, 张洁<sup>1</sup>, 陈宋宋<sup>2</sup>, 杨斌<sup>3</sup>, 孙毅<sup>1</sup>, 祁兵<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省南京市 210024)

**摘要:** 能源行业中多种能源的整合对未来市场化交易提出了新的需求, 区块链作为一种新型的信息化技术能够有效地支撑能源领域产业新业态的创新服务模式拓展。为了拓宽未来多能互补控制技术的应用, 实现多能系统中多方信息资源和物理资源的整合, 解决互补集成控制过程中的交易安全问题, 文中基于多能系统互联交易需求及现阶段区块链的技术发展现状, 重点分析了区块链在多能系统中的应用适用性以及异构区块链所带来的信息互联互通问题, 提出了构建基于异构区块链技术的多能系统交易体系的必要性和方法。最后, 详细分析了异构区块链技术在多能系统中应用的关键技术以及后续业务发展的局限性, 并给出相关问题解决的技术方案和相应的建议, 有效地支撑了未来多能系统下多种形式的异构区块链交易结算的工作。

**关键词:** 多能互补控制; 区块链; 数据互通; 跨链交易

## 0 引言

区块链作为“互联网+”新业态的一种新型应用技术, 能通过调动全网的节点参与积极性, 实现多节点无差别记录, 保证数据安全性的同时, 提高数据的透明度<sup>[1]</sup>。2016年10月18日, 工业和信息化部与多个参编单位联合发布了关于开展中国区块链的技术路线规划文件——《中国区块链技术和应用发展白皮书(2016)》<sup>[2]</sup>。同年12月27日, 在国务院所印发的《“十三五”国家信息化规划》文件中也明确指出了区块链技术支撑中国核心产业发展的重要方向, 并将其与物联网、云计算、大数据、人工智能、机器深度学习等列入高新技术应用框架体系, 以支撑重要行业的发展需求<sup>[3]</sup>。国家电网公司在城市能源协调发展转型过程中提出了“再电气化战略”, 明确了电力与冷、热、气的系统优化及多品种能源的深度融合及协调发展, 其中区块链也被列入多元化城市能源互联、信息互联的关键技术, 以保障城市能源共享中无差别能源利用、公平化市场交易的目标。

2016年8月召开的中国能源互联网暨智慧能源产业博览大会上<sup>[4]</sup>, 多名专家就关于如何利用区块链开展电力市场能源交易问题进行了深入探讨。

随后文献[5]就具体能源互联网中的区块链技术框架和典型应用展开了探讨及论证。文献[6]也针对了售电侧放开后基于完全竞争市场条件下的多实体参与电力市场辅助服务交易结算的解决技术方案, 提出了利用区块链解决辅助服务安全信任问题的方法。文献[7]则分析了需求侧响应资源交易应用模式在区块链下联合开展的必要性。区块链中衍生的智能合约理念在文献[8]中也被提及。区块链在能源领域可用于构筑包含能源微网、金融输电权、线损公证、调度决策、智能售电、储电分享授权的业务体系<sup>[9]</sup>。未来区块链及其链上数据能够对具备数字化能力的业务系统交易提供重要支撑<sup>[10]</sup>。

区块链技术在多个领域相继提出了不同的应用及扩展方式, 多能源协作优化作为目前热点研究方向, 未来可促进多种能源有机整合, 集成互补, 其中还包括清洁能源生产和就近消纳, 减少弃风、弃光、弃水限电等。因此, 需要通过技术手段导向多能源协同发展, 结合多能互补控制增强能源供给侧和需求侧关联<sup>[11]</sup>。在多能系统业务模式方面, 文献[12]在分布式算法的基础上, 以分布式发电投资、运行成本等参数最小化为目标, 设计了对应优化模型, 设计了实现风/光/柴多能互补发电系统的经济运行策略。文献[13]以工业用户园区综合能源系统为研究基础, 设计了考虑价格、用能、需求特性的电网、用户与冷热电三联供(CCHP)机组多能互补优化调度方法。目前可明显预见的是, 多能互补研究领域未来

收稿日期: 2017-09-15; 修回日期: 2017-12-22。

上网日期: 2018-01-11。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901104); 国家电网公司科技项目“城区用户与电网供需友好互动系统项目”。

将更多集中于不同场景下的控制系统和平台相配合的控制策略设计及验证上<sup>[14-18]</sup>。目前,涉及多能系统交易结算的相关应用较少,造成该现象的原因在于,不同于常规的单一能源管理,多能系统是一个宏观的跨领域跨层级抽象实体,需要更多地考虑多种能量流与信息流的紧密结合<sup>[19]</sup>。

因此,考虑到多能系统运行过程中涉及众多的交互对象实体及不同的区块链类型,从能量流和信息流高频度无障碍的交互需求角度出发,本文设计了适用于多能系统的异构区块链交易体系。在此基础上,提出了用于支撑多能系统下异构区块链交易开展的侧链管理、数据检索和自治管理应用设想,给出了目前异构区块链交易数据互联互通问题的解决方法。

1 多能系统互联交易需求分析

1.1 多能系统核心交易需求

多能系统是一个高精度的自律控制体系,可配合区块链实现多能系统运行状态和计量数据在多个运行主体间的泛在信息交互。根据交互的实际需求制定合理的优化决策目标,有向地引导能源生产、传输和控制,完成多种组合业务的开展。根据当前多能系统功能,电网实际可以依托实现的业务包括:有序用电、需求响应、容量/调频辅助服务、微网优化控制、新能源消纳、电动汽车有序充放电以及风火打捆发电等。每个服务按照其实现过程可归纳成以下5个阶段。

1) 计量认证阶段: 计量认证需要的是对全网节点状态的实时感知,依据业务需求有选择性地获取历史和实时数据。

2) 数据透传阶段: 数据透传阶段旨在特定实体之间信息无阻碍的互通,在基于信任的基础上实现高频度信息交互。利用特定技术完成多主体设备和系统之间的数据调用,提升异构系统互操作架构的兼容性。

3) 信息发布阶段: 信息发布阶段主要是根据数据透传阶段的内容,智能地完成可信任数据的分析,生成可执行的优化决策。在有限的群体内部明确决策执行主体,去中心化地将执行决定权利赋予参与多能交易的单个或者多个实体。

4) 指令执行阶段: 在指令执行阶段,多个参与调配优化的主体,在数据发布阶段后,自主识别其生成的可执行优化决策。参与主体自动移交执行权,并确定是否参与执行优化决策指令。

5) 交易结算阶段: 在指令执行完成时,每个参与决策指令执行的主体可自动结算获取单次激励,该

阶段的操作必须保障多能系统所有交易的不重复性和无争议性。

1.2 区块链技术在多能系统中的适用性分析

按照区块链目前的普适范围,电网内未来发展的区块链类型由面向的受众客户不同,分成公有链、联盟链以及私有链<sup>[20]</sup>3类。3种区块链的应用模式分别如图1所示。每个模式所包含的客户类型有完全开放用户节点、半开放用户节点和不开放用户节点。

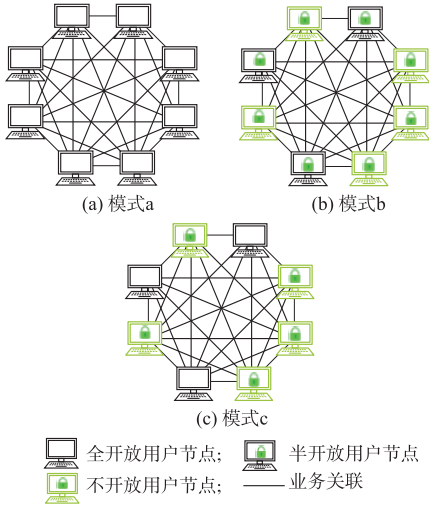


图1 适用于电网不同业务的区块链类型  
Fig.1 Different blockchains for different grid businesses

公有链的应用模式(模式a)里,全开放用户节点(矿工)在公有链中对每个区块记录数据具有可读写权限,能够根据计算力,采用挖矿方式获取每个区块交易记录的权利。其数据对于所有公有链内的用户节点可见,也是最接近于公众服务的形式,目前该方式在能源领域大规模应用还存在难度。主要原因在于公有链的特点是对所有参与实体开放,任何实体都可以参与,比特币是公有链应用的代表案例。虽然此类区块链不可逆且稳定性最高,不容易伪造,但是维护的成本相对较大,对于多能系统大规模应用并不适应。

模式b中的联盟链则与模式a稍有不同。首先是联盟链中参与的用户主要是特定的机构组织,用户节点都进行了权限设定的确认。权限的大小决定用户节点是否能够对区块链数据进行读取和记录。不开放用户节点对联盟链具有可读及写入权限,半开放节点则需经由联盟链内部的授权后才能参与读取和写入,而且读写权限也并非完全授予,其开放度有所限制。通常联盟链可为特定类型的能源服务商提供限制级服务。不同能源服务商参与多能系统互

动时,能源的协调优化会涉及利益的分配,而联盟链可支持多个能源互补系统中完成不同能源服务商的利益分配、交易核算、跨服务商资金转移等应用。

最后就是模式 c 中的私有链,私有链内只有不开放用户节点拥有区块链的读写权限,其他节点则无法参与。由于私有链的权限可以完全控制,通常其处理速度较快、成本较低,因此非常适合于某一种特定类型的能源交易服务,另外私有链可用于统计和同步数据,实现多能系统中的数据检索功能。

区块链的划分方式有效地将多能系统可能存在的多种交易模式按照信息开放程度、交易规模以及实际交易量大小进行了分类,具体如表 1 所示。

表 1 多能系统下不同类型区块链的典型特征  
Table 1 Typical characteristics of different blockchains in a multi-energy system

区块链	适用群体	交易成本	安全要求等级	数据开放程度
私有链	小众	低	高	低
公有链	大众	高	低	高
联盟链	小众	中	高	低

1.3 区块链在多能系统中应用的问题分析

在多能系统中,区块链面向的行业存在着不同的特性,需要结合私有链、公有链、联盟链以及网络等特点去进行区块链与不同领域的业务特征匹配。如多能系统下的电力行业辅助服务实施可能仅仅适用于私有链的内部结算,而类似于多能系统支撑下的政府公共服务、综合能源服务与分布式能源交易等大多会采用联盟链和公有链两者相结合的方式。在多能系统互补实施过程中,必然涉及多种形式能源的互动以及行业内部各个部门各个层级之间不同类型区块链的配合。能源交易记录过程中也必然有部分的数据是电网和其他形式能源所有者不希望在内部共享和外部公开的,涉及具体的数据隐私及安全问题。例如,仅针对多能系统中电能或者天然气资源费用之类的计量认证,这类交易记录数据不会轻易对外开放,电能数据一般仅仅会掌握在电能服务商的自组织矿池中,不会随意开放给其他能源服务商。同样,正常情况下,天然气公司在未来组建了区块链记账的矿池后,即便多能系统存在互动需求,亦不会随意将天然气数据开放给电能或者其他第三方能源服务商。而位于多能系统上的多个电能服务商之间也不可能真正意义上做到完全实时的信息互联共享。

考虑到未来多能系统是建立在多种能源服务商的合作下开展实施的,每个服务商未来建立了区块链后,内部本身就有多多种类型区块链,外部组织之间

也存在多种不同的区块链。区块链实现的物理架构或者基础和技术差异化巨大。这不仅仅是未来服务商内部多种业务类型的区块链之间数据互联互通问题,更是未来服务商与服务商之间开展多能互补交易结算的区块链之间数据互联互通、共享同步的问题。在设计适应多能互补交易需求的区块链交易模式时必然会涉及信息共享调用同步等。支撑多能系统的底层区块链技术要建立数据交互共享渠道,确保多能系统所设计的区块链交易模式能够协同完成不同业务,保障不同能源服务商所持有的区块链主链之间同步数据读出写入以及对应虚拟币资金转移对账。

2 异构区块链交易模式设计

2.1 跨领域主体联合开展

基于多能系统开展异构区块链的必然趋势,本节在传统多能系统的功能实现基础上,分别从智能合约以及交易结算两个角度开展异构区块链的交易模式设计。其中考虑到多能系统下异构区块链执行过程中数据同步等问题,智能合约执行结算后不具备直接自动结算功能,因此本处将智能合约以及交易结算分开说明,分别对应到上文中的信息发布以及交易结算两个重要阶段。此处的智能合约与交易结算属于并列关系,需要说明的是这里的智能合约与信息发布阶段并非一一对应,信息发布阶段可能还包括区块链的其他延伸应用。

1) 基于智能合约的业务实现方式

在正常情况下,多能系统需要动态实时监控所有参与实体的状态,同时结合供需间的平衡关系,判断是否集成多种类型能源,协调配合电网实现削峰填谷、新能源消纳、节能等目标。而智能合约作为辅助性应用,可结合特定业务需求,制定成为某种支撑业务开展的嵌入式脚本<sup>[21]</sup>。图 2 给出了以智能合约为中心化管理的多能系统结构示意图。多能系统中任意实体发起业务需求时,智能合约可作为一种可编程的逻辑代码嵌入,多能系统可选择性地将与合约相关的交易信息写入区块。当交易结束且区块记录成功时,自动触发智能合约的执行代码,从而完成多能互补控制的规定行为(如发送指向性控制指令等)。

根据图 2 所示的多能系统结构互补优化需求以及 1.1 节所提出的多能系统业务实现基本流程,本文提出了多能系统下的业务实现流程框图(如图 3 所示),并在实现流程框图中以虚线框的方式标注出



了智能合约写入、执行后结果导出结算的对应部分。其中多能系统主要负责优化目标及约束条件设计,并完成计量认证阶段的数据采集,完成优化决策设计及对应最优值求解。然后,将执行指令及对应阈值写入区块链智能合约,在多能系统对参与交易的实体执行响应完成后,在交易结算阶段由多能系统上区块链的智能合约自动结算。整个流程中智能合约涉及了数据发布阶段的录入和交易结算阶段的自动结算,因为智能合约的特性决定了其基本实现方式为布尔逻辑条件形式,可以通过将特定的结算规则固化在软件程序逻辑中实现,从而可避免不同参与实体间的违约风险。

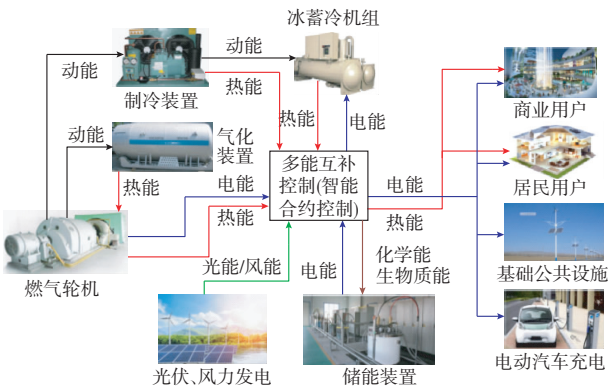


图 2 承载智能合约的多能系统  
Fig.2 Multi-energy system with smart contract

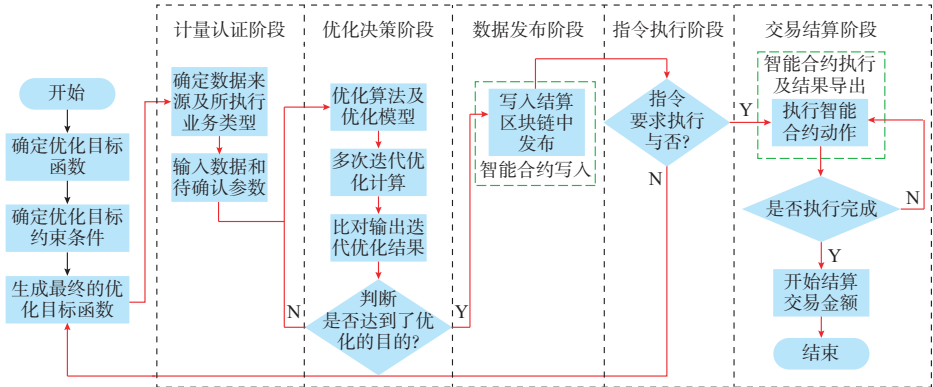


图 3 多能系统下基于智能合约的业务实现流程  
Fig.3 Flow chart of service implementation process based on smart contract in a multi-energy system

2)业务实现实例分析  
多能系统的优化配置在前文提到,跨层级跨领域的信息流以及能量流是必不可少的。要实现区块链智能合约技术在多能系统上的承载,需要多方参与实体的配合。其前提就是明确最终每个实体的需求目标。必须开放与合约相关的数据表项,将其对应的需求作为单笔交易的记录,发布给区块链中的矿工并记录成区块,在满足合约触发条件时才能够自动执行该智能合约对应的动作。

不失一般性,本文以文献[22]中的不同时间尺度下虚拟微网优化调度场景模式为例,结合多能系统图的业务流程进行说明。

首先,确定优化目标,如整体收益  $C$  最大化,其相关因素包括向主网的购售电费用  $C_{SN}$ 、微网向自身用户售电收益  $C_{SM}$ 、可控和非可控分布式电源运行成本  $C_{DG}$  和  $C_{UDG}$  以及储能装置运营成本  $C_{ESS}$ 。具体表达式如下:

$$\max C=C_{SN}+C_{SM}-C_{ESS}-C_{DG}-C_{UDG} \quad (1)$$

式(1)将作为多能系统确认优化目标的主体。其次是设计环境成本函数约束条件  $C_{ac}$ (见式(2)),该函数包含 5 类参数  $S_r, Q_{i,r}, P_{DG,i}, n, L$ 。其中:  $n$

为可控分布式电源的个数;  $L$  为废气种类数;  $S_r$  指的是第  $r$  种气体造成的环境成本;  $Q_{i,r}$  为第  $i$  类可控分布式电源在排放  $r$  类气体的容量大小;  $P_{DG,i}$  指的是第  $i$  类可控分布式电源发出功率。

$$C_{ac}=\sum_{i=1}^n\sum_{r=1}^LS_rQ_{i,r}P_{DG,i} \quad (2)$$

最后是微电网的电压  $f_v$  控制约束条件:文献[22]中设定  $a$  和  $b$  两个权重系数进行调节,以维持虚拟微网的稳定运行为主要目的,如式(3)所示。在多能系统中也可以根据业务的需要对其优化目标及约束条件进行相应的替换。

$$f_v=\frac{1}{H}\sum_{t=1}^H\sqrt{a\sum_{i=1}^N(1-V_{i,t})^2-b(1-V_{PCC,t})^2} \quad (3)$$

式中:  $H$  为总时长;  $N$  为节点数;  $V_{i,t}$  与  $V_{PCC,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  电压标幺值和虚拟微网并网点电压。

式(2)和式(3)作为多能系统的优化目标约束条件。多能系统在确认优化目标及约束条件后,进行计量认证获取异构区块链数据,在优化决策阶段利

用相关优化算法求解最优解,本处示例采用整数线性规划(ILP)模型,也可以采用对应的启发式算法进行替代。求解相关结果后在数据发布阶段将其转化为对应的合约标准形式写入区块链,指令执行阶段根据执行状态的偏离程度不断更新后续智能合约的规则,最后在执行结束后可将智能合约结果进行导出对比,在交易结算阶段自动结算。其中区块链的交易结算核心功能体现主要位于交易结算阶段。区块链的延伸应用,即智能合约主要涉及数据发布

阶段和交易结算阶段。

多能系统智能合约中的需求构建依赖于对应的服务映射,每笔交易所包含的智能合约均需将需求映射成对应能源系统的具体业务操作。多种支撑业务明确的同时才能确定具体数据透传和指令执行方式。图 4 给出了交易结算阶段时理想情况下的电网与多能互补控制协作实现多能源应用集成的交易及服务映射关系。

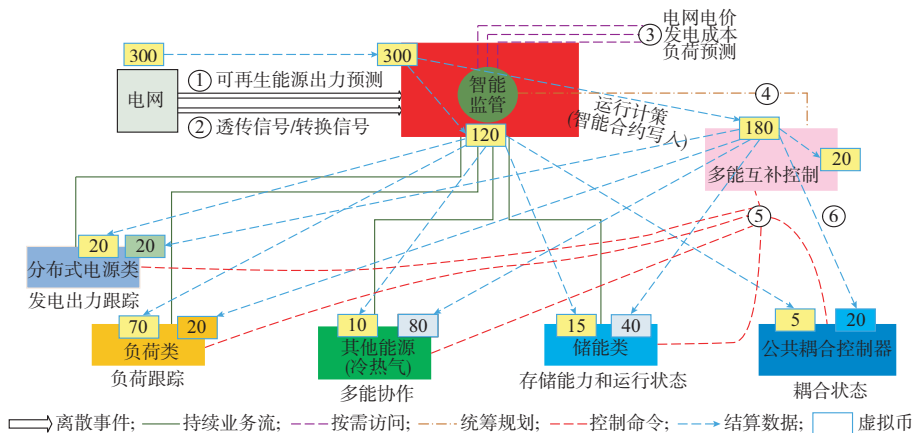


图 4 基于区块链的多能系统协作交易

Fig.4 Collaborative transaction of multi-energy system based on blockchain

如图4所示,电网经由智能监管机构获取微网内部发布的实时可再生能源等出力情况,发送300单位虚拟代币交托给智能监管机构,并利用透传信号向多能系统发送控制请求。智能监管机构将300单位的虚拟币分成两部分。一部分用于多能系统对下级分布式电源、柔性负荷、储能、冷热气能源以及公共耦合控制器类统一规划调配的激励结算,相应的虚拟币  $Q_2=180$ 。另外一部分则用于智能监管机构与这些能源类运行状态和负荷的数据交易结算,相应的虚拟币  $Q_1=120$ ,即计量认证。多能系统计算出参与交易的实体相关执行动作指令要求和阈值,反馈给智能监管机构将其数据作为输入,写入智能合约规定的模板中并嵌入多能系统,形成一个智能监管(监督)-多能系统(统筹调配)-微网(协调配合)的关联关系。多能系统对其他能源统一调配规划的激励指令发布的同时,在每笔激励交易中嵌入智能合约,当交易完成时,自动触发每笔激励交易当中对应区块的智能合约动作。其中用于多能互补控制的激励和其他数据交易结算分别转移120单位和180单位虚拟代币。

然而,智能监管机构与多种能源类实体结算  $Q_1$  虚拟币是电网内部统一的,而多能系统  $Q_2$  虚拟币则不一样。主要在于智能监管机构与多种能源类实

体之间结算记录的仅仅是单个交易实体的负荷运行参数和运行状态等,最多再包含单笔交易的金额大小。区块记录交易的内部不需要太过翔实,因为电网对该类数据的应用就是作为输入写入智能合约中。但是对于多能系统及各个实体之间,由于最终是数据驱动的智能合约,所需要记录和确认的数据包括单次控制负荷设备类型、所属关系、功率大小、数量以及运行等多种隐私数据,这些数据原先只记录在对应类群体内部区块链,并不会对外开放,此时为了保障交易顺利进行,需要通过多能系统进行统一协调管理。

## 2.2 多能互补交易体系设计

多能互补交易体系设计过程中,按照自上而下的原则共分为 4 个层次,分别为能源层、服务映射层、业务层、交易支撑层(如图 5 所示)。其中,能源层包括了多能系统实际控制的能源类,如火电、水电、分布式电源、混合储能、天然气等。这些能源类由多个参与交易主体组成。能源层配合多能系统实现能源集成及统一资源规划调配。服务映射层则承载在多能系统中,将来自于电网或者其他第三方实体的需求作为输入  $D_i$ ,由多能系统进行服务映射转换成相应的业务组合  $D_o$ 。多能系统将组合业务所需数据类型和格式回馈至电网,由云服务平台计

量认证底层的多个负荷节点状态及运行数据,并将其数据移交多能系统。多能系统的业务层在接收到数据后将其按照两种类型数据分开处理,一个是  $s_i$  非异构数据,另一个是异构数据  $s_{in}$ 。写成智能合约可读取的数据格式类型  $s_o$  和  $s_{out}$ 。交易支撑层是保障业务顺畅进行的核心,可将服务的所需智

能合约集成至多能系统,多能系统将决策指令以智能合约的方式一同发布到区块上。在交易开始或者交易结算时自动执行智能合约动作,完成区块记录。交易支撑层同时需要完成跨异构区块链交易以及数据获取,为下一次执行多能互补控制提供参考数据支撑。

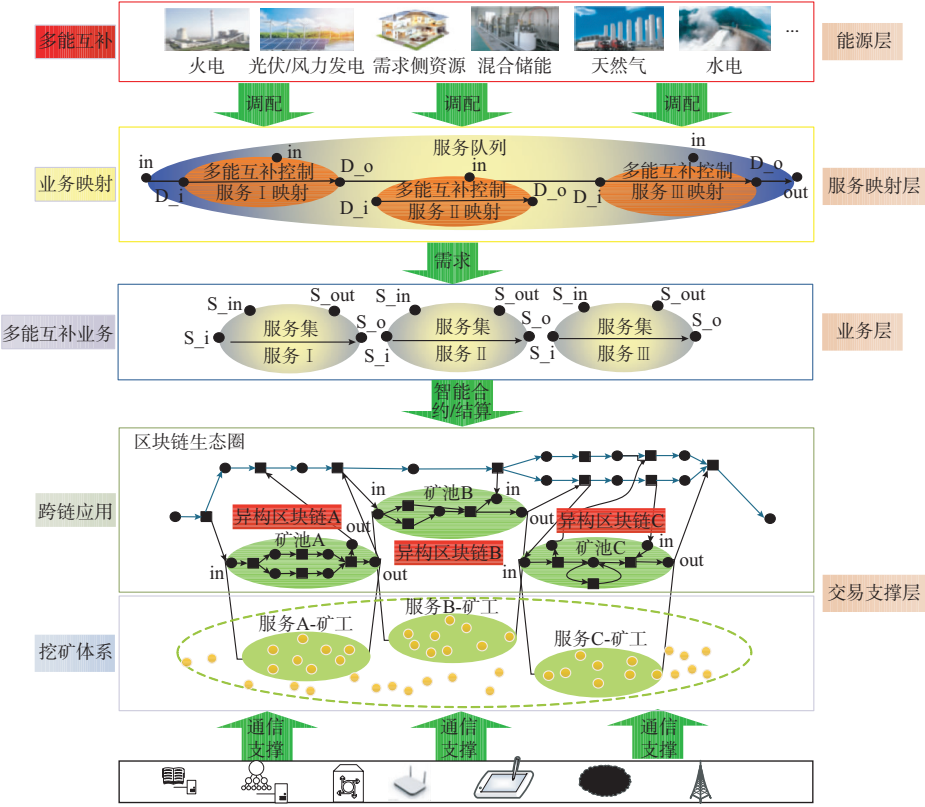


图 5 多能互补分层交易体系  
Fig.5 Hierarchy transaction architecture for multi-energy complementarity

2.3 关键技术支撑

基于区块链的业务系统涉及非对称数据加密处理、点对点(P2P)数据流管理、智能合约管理、工作量证明、共识机制等多项核心技术。上述技术大多属于成熟度较高的通用技术,本节重点针对一些未来在短期内可能在多能系统中应用的关键技术开展研究。结合区块链的现有跨链技术,针对多能系统侧链管理技术、异构区块检索技术以及自治管理技术,分析多能系统中异构区块链的数据交互关键技术,并剖析异构区块链实现跨链数据互通的可行性。

2.3.1 多能系统侧链管理技术

电网企业可以利用已经构建的已建区块链主链进行延伸并逐步扩展多能系统的侧链<sup>[23]</sup>,侧链作为一种新型的区块链,主要用于锚定已有的主链,可以有效解决现阶段多能系统异构区块链间的资金转移和信息互通问题。通过侧链技术规避主链功能及表现形式单一化的局限性,解决主链短时间内数据易

膨胀、同步成本高的问题。

具体实现思想如下,假定多能系统接收到了来自电网的备用容量辅助服务请求,经智能决策优化后,确定能源协调方式和参与调配优化的主体后,需要将补偿激励资金发放给参与的个体。此时多能系统与多个参与实体之间产生交易,由于不同实体所处的系统和所在区块链不同,因此结算的区块链主链也不一致。此时不可能再为多能系统与其他参与实体间单独建立一套费用结算体系,应当依赖费用结算数据驱动其他参与主体执行资源配置。多能系统侧的区块链主链单独针对某个应用新建特定功能并不经济,因此借助侧链技术进行主链功能扩展。而转移的资产在侧链上或者转移的目的主链上可作为触发智能合约的输入,启动相关资源调配的程序。

该过程实现的思想主要利用到了简单支付验证(SPV)证明。SPV 证明是一种动态成员多方签名(DMMS)的技术。该技术目前在区块链上的主要



功能是使得验证者检查区块链上某个输出能够被一定的工作量证明<sup>[24]</sup>,从而确保主链上转移资产的行为和记录是合理的。侧链与多能系统侧的主链相连后,需要经过如下步骤处理。首先,主链内部的虚拟代币需要等待一定的转移确认期。这是由于主链生成了资金转移输出序列后,需要在侧链上作为输入,才能形成一个以该资金转移的输出序列为输入的区块工作量证明,也即 SPV 证明。随后所有侧链上的相邻用户都会启动工作量证明。竞赛期间侧链的工作量证明确认后,形成新的区块,主链的原先锁定的虚拟代币将会被解锁,并可转移至侧链,而侧链和主链之间资金转移数据将会实时同步。而侧链上的资金需要转移回主链时,与之前主链的资金转移至侧链上的步骤同理,侧链生成一条资金转移的输出序列,此时资金仍然锁定在侧链上。当其他主链上的用户节点完成以该输出序列为输入的区块工作量证明之后,由侧链将资金转移至主链中的对应地址。

### 2.3.2 异构区块数据检索技术

为了高效地整合全网数据节点,提高未来多能系统的集成和协调优化能力,现有的数据记录、共享及存储技术亟待革新。需要考虑采用针对异构区块链的新型数据检索方式<sup>[25]</sup>,支撑异构区块链数据记录的快速匹配查询,使用户有选择性地获取所关注的信息<sup>[26]</sup>。参与多能系统调配的实体可将个人用户资产认证、可调配资源容量大小、调配时间段或者所属管辖区等私人信息记录到对应的索引表。在将其信息数据映射到对应的处理进程列表后,生成多能系统对应的信息条目(entries)。交易条目根据特别的规则生成 Hash 值,Hash 值及其所处列表的索引(index)将会记录到区块链中对应的特定位置并生成条目区块(entry blocks),这些条目区块按照系统分配的 ID(chain ID)存储到目录区块中(directory blocks),并锚定到区块链中对应位置。

当多能系统需要对这些数据进行检索时,只需要通过特定规则有目的地遴选出当初按照特定 Hash 函数生成的条目对应的目录区块 ID,查询相关 Hash 值以及对应所处列表等信息,即可反向获取系统内部的条目数据。查询用户的主要获取方式是根据多能系统内嵌的可编程逻辑,通过程序识别特定规则的条目,该规则是在双方协商过程中所确定的(如参与互动的补贴结算、惩罚金额等)。若多能系统查询对应某个特定的用户数据,则需要按照当初协商的解析方式检索筛选数据,而不按照规则记录的条目则不会被检索到。既保证数据的安全性,又提高了用户节点数据的透明度,同时还可为其其他平台所用。

记录到区块链中的最终仅仅是多能系统交易数据对应条目的 Hash 值以及对应服务器所处列表的索引。最终将电网内部参与多能系统调配的实体所需记录的数据行为作为单次区块记录的内容,并不将实体用户的数据直接放到区块链中,仅仅维护某个实体是否发生过数据记录的动作。该技术可支撑未来多能系统可能面临的高并发业务的快速读写操作,服务器在数据记录的同时也对数据记录条目的索引进行更新。

### 2.3.3 多能区块链自治管理技术

在多能系统中,由于不同类型的设备资产归属权不同,因此在多能系统中非常适合采用无需任何第三方授权且具备自治管理能力的区块链技术<sup>[27]</sup>。自治管理方案的起初设计思想理念和目前以以太坊的实现方案有类似之处。同样是构建主链以外的另外一条区块链,由另外一条区块链来实现与外界系统对接。

该技术的主要核心思想是将传统的多个区块链一致性与有效性进行剥离分立。这里的一致性是指区块中的记账唯一性,在工作量证明和分布式记录之后不会再次出现另外一条虚假的区块,该区块链在全网中的记录是相同且一致的。而有效性则指的是每个区块交易的数值大小是确定且合理的。二者进行独立分离后,不同能源系统的账本所处的区块链分别被视为主链,并继续保留其原有的一致性,主要记录其是否发生过交易。而对应这些主链配套的其他区块链则继承其有效性,主要记录其交易发生的金额或者虚拟币转移情况。各业务系统主链主要负责原有的工作量证明机制,用于确认其全网分布式记账的一致性,而数据记录则交由配套的链条进行管理和维护。既保证了数据和证据隔离,也保证了多能系统交易链之间的统一管理,在深化了多种业务融合的同时还可进一步提升数据的共享性。其具体实现架构如图 6 所示。

通过自治化管理,可以达成 3 个目标:①减轻了不同区块链搭建新的工作量证明(PoW)挖矿体系所带来的开支,避免过多地为了维护其他交易记录和数据交互而产生新的交易链条。每构建一个新的 PoW 挖矿体系,都意味着需要大量的用户节点去维护,最终可能造成的后果就是降低对应区块链所含代币的价值,真正参与维护该代币的用户节点偏少,没有被大众所认同。②其他已有和新建的区块链间的功能优化,如上文所提及的有效性功能。这里的有效性不仅仅指单笔交易数额大小,亦可指区块链中某些特定数据集。③完成了多能系统交易链的资源整合,并将数据与交易证据进行了有效分离。

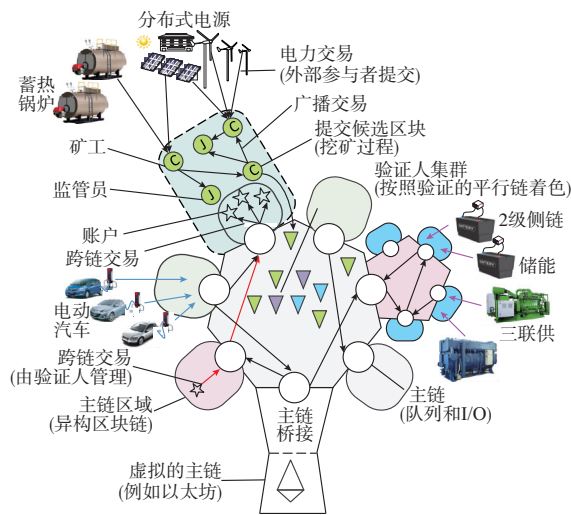


图 6 异构区块链自治管理技术示意图  
Fig.6 Schematic diagram of autonomous management technology of heterogeneous blockchain

3 实践难题和技术瓶颈

随着电力 9 号文件《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9 号文)的发布<sup>[28]</sup>,可以预料的是未来电网更多的盈利点依赖于新型服务方式及增值业务拓展<sup>[29]</sup>。不同类型参与实体间高频度的市场化交易<sup>[30]</sup>,对多能系统的统筹调配将会是一个巨大的冲击与挑战。构建高效的电网区块链生态圈,将异构区块链与多能互补业务相关联,灵活支撑多种业务的灵活开展,是目前电网构建区块链所需重点考虑的问题。在构建适应多能互补控制区块链生态圈的同时,还需要防范跨链连接管理过程中可能带来的额外问题,具体如下。

3.1 风险问题规避

在构建适应多能互补区块链高连通度的生态圈时,需要正视跨链连接技术所带来的数据开放安全风险问题。该安全风险问题来自两方面。其一是单条区块链的自身安全风险,其二是多个区块链互联后的安全问题<sup>[31]</sup>。

首先是单条区块链自身可能带来的安全风险问题,该问题并非完全是由区块链所引发。众所周知,区块链 PoW 共识算法和非对称加密机制在一定程度上保证了区块链的不可篡改性和数据有效一致性。以现有计算能力而言,其本身的安全问题不大。但真正带来的威胁是在其基础上衍生的其他应用如智能合约、数字货币、资产管理等。此前就曾发生过利用了智能合约漏洞进行攻击的 DAO 事件<sup>[32]</sup>。目前现有的基于区块链的延伸应用技术相对不稳定,且具有一定风险。整合后的异构区块链延伸应用如

智能合约的部署实施主体权责是在电能服务商还是其他形式能源服务商,衍生应用的风险的责任主体和筹划规避难以确认,未来需要相关的法律法规保障。

其次,为了适应多能系统下的多个异构区块链之间交易和数据互联互通需求,增加了侧链,这意味着新增了配套区块链的挖矿体系。此时需要更多的挖矿用户节点去维护该新增的区块链。配套区块链的增加必然要求主链将部分数据对外开放,这无疑会引入新的风险成本。而且在出现安全性问题后,事故责任归属难以界定。但是,无论是主区块链还是配套区块链带来的额外风险,最终仍然是主区块链承担。目前普遍认为,一条区块链愈加封闭和独立,与其他系统互通次数越少则愈加安全。举个简单的样例,侧链技术可能存在欺骗性的转账,上文提及由区块工作量 SPV 证明来保障基本的区块链资金转移的记录有效性。在竞赛期间,虽然其他节点的工作量能够稀释攻击者的工作量证明所带来的收益,但是对于攻击者而言还是有可能制造出工作量证明远大于其他挖矿用户节点工作量的情况。此时,攻击者可将绑定在主链的资金转移至侧链,而该结果必将导致最终的损失由其他侧链或者主链上的用户来承担。因此,在多区块链互联场景下,可以引入第三方监管机构,对接入多能系统的侧链进行安全认证。

3.2 参与主体协作

前面提到了构建电网内部的区块链生态圈,促进多能互补业务的发展,由区块链推动用户的消费,形成新的业务增长点。但由于多能系统参与交易主体多元化,许多业务并非完全依托于电网所搭建的主区块链,不同的参与主体固然会根据自身的需求选择区块链体系,而不同结算方式则会由多个不同的“志向相投”的主体聚集在一起,组成新的挖矿群体。假定要使某个群体中的参与主体为了实现与多能系统的业务对接,而采用其他区块链的结算方式,则其公平性亦难以保障。甚至多能系统还要对其他区块链结算的用户数据进行核验。唯有数据调用成功的情况下,才能保证多能系统跨领域、跨层级的业务开展。但即便是基于跨链连接技术的电网区块链生态圈,也未必能一定保证这些用户会完全响应该数据调用请求。该过程需要多个参与主体用户的配合,还需要通过管理制度来保障。多能系统下的单笔交易可能涉及多个能源服务商,需要多个能源服务商相互配合。一方面,各个能源服务商所持有的异构区块链之间信息交互的协议、接口的兼容、计量认证的合理性,参与交易与否并开放其区块链的数



据管理权都能决定交易是否能顺利完成。另一方面,异构区块链的开放时限、程度是否满足快速完成多能系统的交易结算需求,交易数据是采用推送还是自行提取的方式获取都是目前无法商榷和定论的。

协作过程中的多领域参与主体对其中部分权益需要进行割舍,例如将部分关键数据和交易内容开放给其他群体或者电网。过渡的权益受体可以是电网或者社会公信水准高的第三方机构,区块链关键交易数据转让、系统对外接口适配许可等均需要利益相关方协商。在多能系统不同交易链间的互通过程中,最终参与交易的多方主体协作是跨链管理的重点。

### 3.3 操作性能取舍

将区块链应用到多能系统中参与能源交互的主体较多,且种类繁多。在进行能源交易过程中,某些主体交易次数少、面向的用户不多,交易金额数偏大,要求的数据信息安全等级偏高,此时可采用私有链或者联盟链实现;有些主体则交易次数多、面向用户广、交易金额偏少,这些用户可采用公有链实现。对于不同类型的业务、群体及场合,可采用不同类型的区块链技术。但无论是何种区块链类型,都不应该忽视现在区块链记录效率低的问题。以典型比特币的交易效率为例,单笔交易记录需要记录到区块中的时间约为 10 min 左右,而提供该区块记录的工作量证明确认时间最长需要等待 5~6 h<sup>[33]</sup>。这种分布记账和竞争挖矿行为方式,对应地需要一定的竞争周期去保障挖矿的正确性,需要一定数量的用户节点对该区块链的记账进行维护。对于单个区块链而言,固然可以在降低数据有效性验证性能的前提下,提高交易记录快速写入时间和缩小证明工作量周期,2017 年 3 月发布的新一代清算系统实测平均交易速度已能够支持 4 000 笔/s,最新的实验系统已经具备 33.34 亿次/s 的交易能力。但并非所有的区块链都需如此,具体区块链性能取舍应视具体情况而定。

未来多能系统大规模推广应用后,其交易频率、交易数量将会十分庞大,单位时间内可能会达到成千上万级的交易量。交易过程服务商与服务商、服务商与用户之间不同业务类型对交易的处理需求不同。交易类型种类繁多、系统对接时限要求不一、交易数据类型不一致都是开展多能系统区块链交易时存在的潜在问题。针对多能系统需要考虑如何根据不同类型参与主体之间的需求,确定最终所搭建的区块链和配套区块链的框架。在保障多能系统效率的前提下,还应当考虑主区块链和配套区块链之间

的同步交易速率、数据读写、交易透明传递等问题。

### 3.4 智能合约规范

多能系统区块链跨链连接技术和区块链生态圈的建设目的,都是为了实现多方数据资源整合,以达到全网共识和多业务联合开展的目标。通过全网数据整合,多能系统才能够根据实际数据进行优化决策分析。在多能系统交易体系中确定智能合约的统一形式,可将对应的执行逻辑嵌入多能系统,通过多方参与资源调配主体实现交易。在实现过程中,可将智能合约写入每个交易的区块中,由区块链在交易过程中自动触发完成交易。

但是智能合约目前并没有统一的规范<sup>[34]</sup>,就其本质上而言,智能合约是个由某种代码或者可编程的脚本组成。其本身不具备任何的自我约束和自检的能力,只能用于执行某个特定的动作。看似其在制定成功并发布锚定到区块链后,具有不可篡改的特性,但合约本身仍具有潜在的安全性问题,在业务实现时需要考虑。而且,随着多能系统业务的逐步深化,智能合约规则的设定将更为复杂,需要具备远端配置和更新维护的能力,支撑未来多能系统的复杂业务应用。

智能合约通常是一个 0-1 逻辑或者程序代码组成的用例,用于指导参与用户主体如何执行动作,而且智能合约的参与双方需要事先约定好信息的写入方式,作为输入,这些信息必须应该被双方所认可。但是对于多能互补控制的一些强制性决策而言,智能合约本身可能无法达成。同时,发布智能合约的用户或主体应确保合约内容的正确性和可信性。智能合约制定期间,编写者的主观因素、智能合约制定过程中的逻辑错误都是无法完全避免的。多能互补控制在管理多种参与多能交易的主体时,需要构建完善的管理体系,以保障智能合约交易编码的公平性,而且还需要通过法规或者管理制度约束,以保障智能合约的规范性及有效性,防止类似“逻辑炸弹”事故的发生。因此,负责多能互补的智能合约编写以及审核主体必须被智能合约参与方和各种能源服务商认同,共同组织编写和实施规范,保障其公信力。

## 4 结语

本文分析了多能系统互联交易的典型需求,提出了基于异构区块链的多能系统交易体系。通过多能系统跨链资源整合,实现不同层级和应用领域的信息交换,提高多能源交易的信息透明度,最终促进多种能源协调发展。通过可编程的智能合约逻辑设定,可以保障多能系统中复杂交易的实现,从技术角

度解决了未来可能发生的潜在争议问题。同时本文还分别从单链以及多链角度出发,论述了区块链开展的实际难题和技术瓶颈,并提出了对应的解决方案,为未来发展多能互补领域下的区块链生态圈发展设想提供理论支撑。需要指出的是,本文虽然提及了多能系统在异构区块链下数据互通问题及解决方案,但未来多能系统下的异构区块链的运营管理机制、数据开放程度、关键数据脱敏性、安全问责方式等问题仍有待进一步结合实际情况深入探讨。

参 考 文 献

[1] 斯万.区块链:新经济蓝图及导读[M].北京:新星出版社,2016: 90-93.

[2] 信息化和软件服务业司.中国区块链技术和产业发展论坛成立大会召开[EB/OL].(2016-10-18)[2017-06-27].http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146402/n1146440/c5290031/content.html.

[3] “十三五”国家信息化规划[EB/OL].[2017-06-27].http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/27/content\_5153411.htm.

[4] 贾常艳.智慧能源产业发展进入新阶段——2016 中国能源互联网大会暨智慧能源产业博览会在秦皇岛隆重开幕[J].电器工业,2016(9):65-66.

[5] 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): 4011-4023.

ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023.

[6] 李彬,曹望璋,祁兵,等.区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J].电网技术,2017,41(3):736-744.

LI Bin, CAO Wangzhang, QI Bing, et al. Overview of application of block chain technology in ancillary service market [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 736-744.

[7] 武庚,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 blockchain in the integrated demand response resource transaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728.

[8] 平健,陈思捷,张宁,等.基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3682-3690.

PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.

[9] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报, 2016,42(4):481-494.

YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.

[10] KISHIGAMI J, FUJIMURA S, WATANABE H, et al. The blockchain-based digital content distribution system [C]// IEEE Fifth International Conference on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), August 26-28, 2015, Dalian, China;

187-190.

[11] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.

TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.

[12] 宋旭日,叶林.风/光/柴多能互补发电系统优化配置研究[J].电网与清洁能源,2011,27(5):66-72.

SONG Xuri, YE Lin. Optimization configuration of wind/solar/diesel hybrid power generation system[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2011, 27(5): 66-72.

[13] 姜子卿,郝然,艾芊.基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):260-267.

JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-267.

[14] 程林,张靖,黄仁乐,等.基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):282-287.

CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.

[15] 丁伯剑,郑秀玉,周逢权,等.微电网多能互补电源容量配置方法研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(16):144-148.

DING Bojian, ZHENG Xiuyu, ZHOU Fengquan, et al. Research on method of capacity configuration for hybrid power in microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 144-148.

[16] LI C, XU Y, YU X, et al. Risk-averse energy trading in multi-energy microgrids: a two-stage stochastic game approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2620-2630.

[17] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated electrical and gas network flexibility assessment in low-carbon multi-energy systems [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, USA: 718-731.

[18] 白学祥,曾鸣,李源非,等.区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(5):65-72.

BAI Xuexiang, ZENG Ming, LI Yuanfei, et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 65-72.

[19] WANG Luhao, LI Qiqiang, SUN Mingshun, et al. Robust optimisation scheduling of CCHP systems with multi-energy based on minimax regret criterion [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(9): 2194-2201.

[20] 陈志东,董爱强,孙赫,等.基于众筹业务的私有区块链研究[J].信息安全研究,2017,3(3):227-236.

CHEN Zhidong, DONG Aiqiang, SUN He, et al. Research on private blockchain based on crowdfunding [J]. Journal of Information Security Research, 2017, 3(3): 227-236.

[21] BOGNER A, CHANSON M, MEEUW A. A decentralised sharing APP running a smart contract on the Ethereum blockchain[C]// 6th International Conference on the Internet of Things, November 7-9, 2016, Stuttgart, Germany: 177-178.

[22] 黄伟,熊伟鹏,闫彬禹,等.不同时间尺度下虚拟微网优化调度

- 策略[J].电力系统自动化,2017,41(19):12-19.DOI:10.7500/AEPS20170409001.
- HUANG Wei, XIONG Weipeng, YAN Binyu, et al. Multi-time scale optimization scheduling strategy for virtual microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 12-19. DOI: 10.7500/AEPS20170409001.
- [23] BACK A, CORALLO M, DASHJR L, et al. Enabling blockchain innovations with pegged sidechains [EB/OL]. [2017-09-10]. <http://www.blockstream.com/sidechains.pdf>.
- [24] ZHENG Z, XIE S, DAI H, et al. An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends [C]// IEEE International Congress on Big Data (Big Data Congress), June 25-30, 2017, Honolulu, USA: 557-564.
- [25] SNOW P, DEERY B, LU J, et al. Factom: business process secured by immutable audit trails on the blockchain[EB/OL]. (2014-11-07) [2017-06-30]. [https://github.com/FactomProject/FactomDocs/blob/master/Factom\\_Whitepaper.pdf](https://github.com/FactomProject/FactomDocs/blob/master/Factom_Whitepaper.pdf).
- [26] ZYSKIND G, NATHAN O, PENTLAND A S. Decentralizing privacy: using blockchain to protect personal data [C]// IEEE Security and Privacy Workshops (SPW), May 21-22, 2015, San Jose, USA: 180-184.
- [27] WOOD D G. Polkadot: vision for a heterogeneous multi-chain framework draft1 [EB/OL]. [2017-09-10]. <https://github.com/w3f/polkadot-white-paper/raw/master/PolkaDotPaper.pdf>.
- [28] 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL].(2015-03-31)[2017-12-27].<http://news.ncepu.edu.cn/xyxd/llxx/52826.htm>.
- [29] 赵豫,于尔铿.电力零售市场研究:(一)充满竞争的电力零售市场[J].电力系统自动化,2003,27(9):20-23.  
ZHAO Yu, YU Erkeng. Study on retail electricity market: Part one competitive retail electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 20-23.
- [30] 张晓萱,薛松,杨素,等.售电侧市场放开国际经验及其启示[J].电力系统自动化,2016,40(9):1-8. DOI: 10.7500/AEPS20151128001.
- ZHANG Xiaoxuan, XUE Song, YANG Su, et al. International experience and lessons in power sales side market liberalization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20151128001.
- [31] ROTTONDI C, VERTICALE G. A Privacy-friendly gaming framework in smart electricity and water grids [J]. IEEE Access, 2017, 5: 14221-14233.
- [32] CASTILLO M D. The DAO attacked: code issue leads to \$60 million ether theft [EB/OL]. (2016-06-17) [2017-09-10]. <https://www.coindesk.com/dao-attacked-code-issue-leads-60-million-ether-theft>.
- [33] 李董,魏进武.区块链技术原理、应用领域及挑战[J].电信科学,2016,32(12):20-25.  
LI Dong, WEI Jinwu. Theory, application fields and challenge of the blockchain technology[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(12): 20-25.
- [34] MARINO B, JUELS A. Setting standards for altering and undoing smart contracts [C]// International Symposium on Rules and Rule Markup Languages for the Semantic Web, July 6-9, 2016, Stony Brook, USA: 151-166.

李 彬(1983—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:智能电网通信技术、电气信息技术。E-mail: direfish@163.com

曹望璋(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力自动需求响应等相关技术。E-mail: caowangzhang1@163.com

张 洁(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力信息通信相关技术。E-mail: 744232927@qq.com

(编辑 蔡静雯)

## Transaction System and Key Technologies of Multi-energy System Based on Heterogeneous Blockchain

LI Bin<sup>1</sup>, CAO Wangzhang<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, CHEN Songsong<sup>2</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>, SUN Yi<sup>1</sup>, QI Bing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Multi-energy integration has put forward the new requirements for future market transactions within the energy industry. The blockchain can effectively support the innovative service pattern of new industries in the energy area as a new information technology. To extend the applications of multi-energy complementary control technology in the future, achieve the integration of multiple information resources and physical resources in the multi-energy system, and ensure the transaction information security in the integrated control process, this paper focuses on analyzing the applicability and the problem of data sharing in blockchain for multi-energy system, based on the transaction demand in the multi-energy system and current situation of the heterogeneous blockchain technique. The necessity and the method of constructing transaction system of multi-energy system based on heterogeneous blockchain technology are proposed. Finally, the key technologies of blockchain in the multi-energy system and the constraints on the follow-up business development are summarized. In addition, some technology schemes and relative suggestions are given to solve the problems of blockchain limitation and support the work of transaction between different heterogeneous blockchains in the future multi-energy system.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901104) and State Grid Corporation of China.

**Key words:** multi-energy complementary control; heterogeneous blockchain; data sharing; cross-chain transaction