DOI:10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2020. 08. 002

基于能源区块链的综合能源服务研究

Research on integrated energy services based on energy blockchain

杨晟[1],孙跃[2],龚钢军[1],杨佳轩[1],周波[1]
YANG Sheng[1],SUN Yue[2],GONG Gangjun[1],YANG Jiaxuan[1],ZHOU Bo[1]

(1.北京市能源电力信息安全工程技术研究中心(华北电力大学),北京 102206;
2.国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100045)
(1.Beijing Engineering Research Center of Energy Electric Power Information Security, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2.State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

摘 要:随着互联网信息技术、可再生能源技术以及电力改革进程的加快,开展综合能源服务已成为提升能源效率、降低用能成本、促进竞争与合作的重要发展方向。区块链作为产业创新发展的核心技术,与综合能源服务模式有着天然匹配性。对综合能源服务模式进行了分析,构建了基于区块链的主从多链结构的综合能源服务模型,介绍了主链节点的选举方法及能源区块链的区块结构,最后探究了区块链支撑下的综合能源服务运行模式,为区块链技术在综合能源服务中的应用提供参考。

关键词:综合能源服务;能源区块链;能源互联网;主从多链结构;紧急度;主链节点;选举方法
中图分类号:TP 311.13:F 426.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-1951(2020)08-0011-06

Abstract: With the accelerated progress on internet information technology, renewable energy technology and electric power reform, integrated energy service has become an important tactic to improve energy efficiency, reduce energy costs, and stimulate the competition and cooperation. Blockchain, as a core technology for innovative development in energy industry, is a good match for the integrated energy service model. By analyzing the service model, an integrated energy service model with master-slave multi-chain structure based on blockchain was constructed, and the election method for main chain nodes and the block structure of the energy blockchain were introduced, and finally the operation mode of the integrated energy service supported by blockchain was expounded. The analysis provides a reference for the development of the integrated energy model.

Keywords: integrated energy service; energy blockchain; energy internet; master-slave multi-chain structure; urgency; main chain nodes; election method

0 引言

随着能源结构的加快转型和电力体制改革进程的加速,国家电网有限公司在各省公司开展综合能源服务业务并明确提出要做强、做优、做大综合能源服务业务,推动公司由电能供应商向综合能源服务商转变。虽然综合能源服务前景广阔、空间巨大,但国内综合能源服务尚处于起步阶段,在业务开展的同时面临着覆盖业务类型多、客户需求差异大、协商机制和交易模式多样化、交易的安全性和服务实时性要求高、运行体系管控难度大等问题,故亟须建立一种安全高效的运行体系。

同时,随着信息技术的快速发展,要把区块链作为核心技术自主创新的重要突破口,明确主攻方向,加大投入力度,着力攻克一批关键技术,加快推动区块链技术和产业创新发展。而区块链在智能合约、分布决策、协同自治、拓扑形态、交易监管等方面与综合能源服务需求有着天然的匹配性,因此,通过构建能源区块链能够保障综合能源服务系统高效、稳定地运行。

随着高新技术产业的飞速发展,探究综合能源服务系统运行新模式已成为重要研究方向。文献[1]基于综合能源服务的服务能力与用户用能情况在时间维度和类属维度上的匹配关系,建立了服务效用模型;文献[2]对综合能源服务模式进行了分

收稿日期:2020-06-15;**修回日期**:2020-07-15
基金项目:国家电网有限公司科技项目(52018K190024)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析，提出了综合能源服务支撑的新型营销模式；文献[3]构建了基于源-网-荷-储-调的综合能源智慧管理系统及平台，打通综合能源服务体系底层至顶层，实现综合能源体系中能量流、信息流和价值流的全面融合。

以上文献在综合能源服务的效用与用户需求评估、营销精益化的商业模式等方面对综合能源服务进行了分析，建立了综合能源服务的体系架构，但未探究契合于综合能源服务系统的完整运行模式。因此，本文构建了基于区块链的综合能源服务模型，建立了具有主从多链结构的综合能源服务系统网络架构，介绍了主链节点的选举方式，设计了契合综合能源服务的能源区块链，并探究了能源区块链支撑下的综合能源服务系统的运行模式。

1 综合能源服务模式

在能源改革已被确立为一项国家发展战略的前提下，电力体制改革不断深化，售电市场逐渐由垄断市场向自由竞争市场过渡[4-5]。在此背景下，国家电网有限公司亟须扩展业务领域，形成新的盈利点。相比传统的能源消费习惯，综合能源服务在提高能源利用效率、提升新能源和可再生能源比重等方面的优势明显，能提供满足客户需求的多样化增值服务，顺应电力体制改革的大潮，符合国家电网有限公司的新发展方向。随着互联网信息技术、可再生能源技术的发展，电力改革进程加快，开展综合能源服务已成为提升能源效率、降低用能成本、促进竞争与合作的重要发展方向[6-9]。

综合能源服务是能源服务的新业态，它整合了不同的能源服务业务，不仅提供能源商品，还提供能源服务。能源服务是附着于能源商品之上的，对于供电企业来说，就是由单一售电模式转为电、气、冷、热等的多元化能源供应和满足客户需求的多样化增值服务模式。综合能源系统是指在规划、建设和运行等过程中，对各种能源的产生、传输、分配、转换、储存、消费、交易等环节实施有机协调与优化，进而利用能源转化过程中产生的冷、热等能量，实现多种能源流间的耦合与转供，并将产生的能源合理高效地传输到每个需要不同形式能源的终端用户[10-13]。综合能源服务将能源销售服务、分布式能源服务、节能减排及需求响应服务等三大类组合在一起，针对客户多样化的能源服务需求，为客户提供营利性的定制服务。

综合能源服务包括 综合能源供应、设备维护、能效检测和用能服务、节能设计、数据交易以及分布式能源服务等。

(1)综合能源供应业务是以电能供应为核心，为用户提供冷、热、电等多能源一体化服务，是最基础性的服务。

(2)设备维护业务逐渐向末端延伸，例如：将设备维护的业务逐步扩展到工厂、居民小区、校园等。

(3)综合能源服务能为用户提供能效检测和用能服务，通过检测耗能设备的能源利用率，出示相应的检测报告并提供各项能源使用及管理方案和运维服务，如提供园区能源规划、能源能效管理、热电联产等方案和商业化运营平台。

(4)节能设计是面向不同客户提供不同的节能服务，如面向工业用户可提供能效管理和设备改造等服务，面向居民可提供节能改造等服务。

(5)数据交易是指综合能源服务公司综合运用现代信息技术建设服务平台，收集处理分析各种数据，为用户提供各种信息和数据分析服务及相关增值服务。

(6)分布式能源服务是以分布式新能源、储能技术为支撑，在用户侧构建清洁微网并就近与居民用户进行能量交易，是综合能源服务的重点发展方向。

综合能源服务在国内刚开始发展，是有广阔前景的新业态，它意味着能源行业从产业链纵向延伸走向横向互联，从以产品为中心的服务模式转向以客户为中心的服务模式，是实现国家能源革命的新兴市场力量，探索与开展综合能源服务业务是当今能源变革时代背景下的大势所趋。目前，国家已出台相关政策予以支持，国家电网有限公司也将综合能源服务列为主营业务，其未来市场前景广阔。

2 基于能源区块链的综合能源服务

2.1 基于区块链的综合能源服务模型

综合能源服务是一种新型的、可满足终端客户多元化能源生产与消费需求的能源服务方式，其发展需要结合现有运营经验，采用新的模式、新的技术、新的方法来实现新的突破。而区块链在智能合约、分布决策、协同自治、拓扑形态、交易监管等方面与综合能源服务的需求具有天然的匹配性，通过区块链技术可以保障综合能源服务信息的准确性、及时性，提高服务质量和服务效率。

为保证综合能源服务系统高效稳定运行，构建如图1所示的基于区块链的综合能源服务模型。在源端、电网公司、综合能源服务公司(民营)以及荷端分别搭建业务联盟链，确保内部业务的高效协商。由于在综合能源服务中需要“源-网-售-荷”中的各类企业或用户之间进行协商，故属于不同业务

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

联盟链的节点间有大量的信息交互，因此需要在各业务联盟链中选出一个用于实现跨链传输与信息汇集的中继节点，各中继节点组成综合能源服务联盟链，以实现不同业务之间的协商。综合能源服务联盟链作为主链（各中继节点为主链节点），各业务联盟链作为从链（从链上除中继节点外的节点为从链节点），构成主从多链结构；同时，各从链节点具有其私有链（企业链、用户链等），用于记录企业或用户的内部数据。

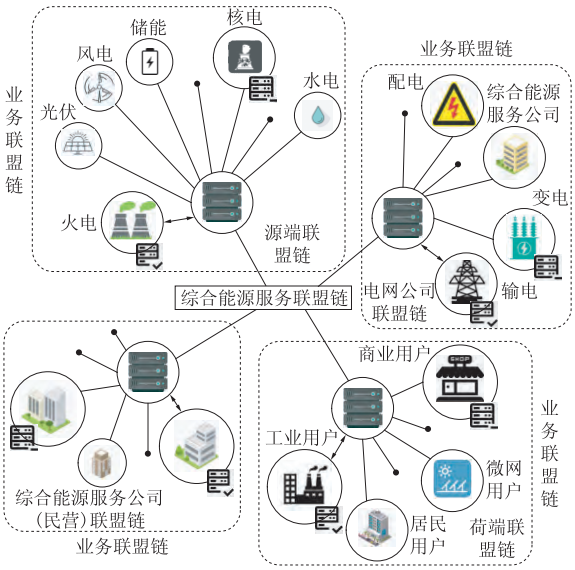

图 1　基于区块链的综合能源服务模型

Fig. 1　Integrated energy service model based on blockchain

在主从多链结构中，主链节点负责该业务联盟链上全部信息的发送与接收，从链节点负责本节点产生信息的上传与读取，具体协商信息暂存在主链节点上并在从链节点上保存，而交易信息永久保存在主链节点上。主链节点为具有大容量存储、高效传输功能服务器的企业，其他各企业、用户均为从链节点。根据各企业是否具有该类型的服务器以及是否有能力对服务器进行维护，确定候选人名单并最终选出主链节点[14-15]。主链节点的选择参考开放式最短路径优先（Open Shortest Path First，OSPF）协议中的选举方法并加以改进，如图 2 所示。

确定了业务联盟链中的候选人名单后，与 OSPF 协议中的选举方法相同，在候选人中同时选出该链的主链节点与备用主链节点。主链节点正常运行时，备用主链节点在功能上与从链节点相同；当主链节点发生故障时，备用主链节点能立即代替主链节点进行信息的汇集与中继，使系统恢复正常。同时，备用主链节点具有继承功能，主链节点正常连续工作 1 个周期后，由备用主链节点直接替代其进行工作。

为保证业务联盟链的弱中心化，在确定候选名单后，通过节点在担任主链节点期间的故障率，选择主链节点与备用主链节点，其数学描述如下

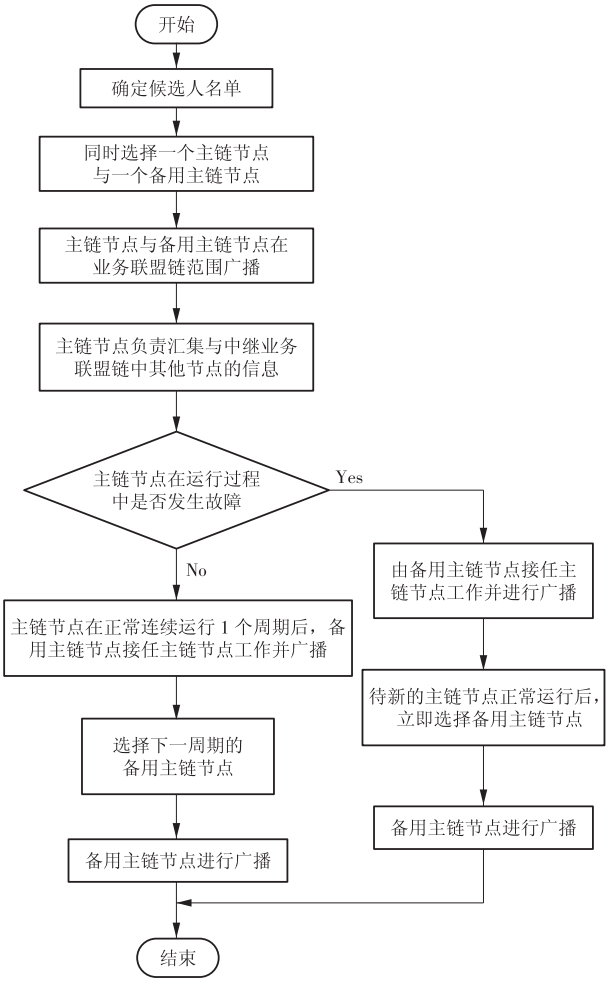

图 2　主链节点选举与更替流程

Fig. 2　Main chain node election and replacement flowchart

$$P'_k = f(E_k), \tag{1}$$

$$P_k = \frac{P'_k}{\sum_{i=1}^{n} P'_i}, \tag{2}$$

式中：E_k 为簇内节点 k 在担任主链节点期间的故障率；P_k 为簇内节点 k 被选为簇首的概率，在函数 $f(E_k)$ 中，P'_k 与 E_k 负相关，即簇内节点 k 在担任主链节点期间的故障率越低，其被选为簇首的概率越高。

该主链节点的选择方法需在各业务联盟链中达成共识，形成共识机制并写入智能合约中，每当系统检测到主链节点出现故障或正常连续工作 1 个周期后，其会自动更换主链节点并在剩余候选人中随机选取备用主链节点，从而保证基于区块链的综合能源服务系统的自主性与高效性。

2.2　能源区块链的区块结构

构建适配于综合能源服务场景的能源区块链是建立基于能源区块链的综合能源服务系统的关键[16-17]。根据 2.1 章节中基于区块链的主从多链结构的综合能源服务系统网络架构可知，应构建在主

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

链与从链上具有不同区块结构的能源区块链，如图3所示。

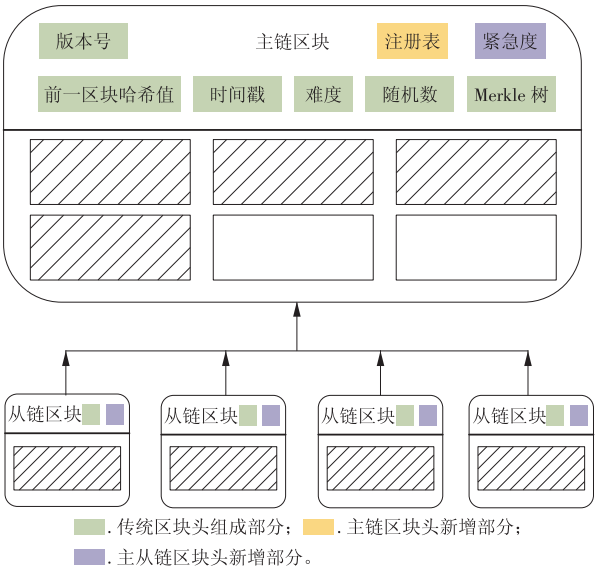

图3　能源区块链的区块结构

Fig. 3　Block structure of the energy blockchain

从链区块是在业务联盟链中使用的区块，其保持原有区块容量1 Mbit不变，并在原有区块头组成部分的基础上增加了1 bit的紧急度部分。紧急度是区块体中信息紧急程度的度量，对于以能源供应为首要任务的综合能源服务模式，能源供应业务的紧急程度最高，而设备维护、能效检测、节能设计等派生业务的紧急程度其次。因此，在区块头中设置1 bit的紧急度部分，1表示紧急业务，0表示非紧急业务。

主链区块是在综合能源服务联盟链中使用的区块，其区块容量扩容成8 Mbit，并在原有区块头组成部分的基础上新增了紧急度与注册表2个部分。从链节点将需要交互的数据打包进从链区块，将其上链并上传至主链节点处。主链节点读取从链区块头部的信息，并将其区块体中的数据添加到主链区块中，同时更新主链区块的区块头部分。其中，注册表中记录了该主链的公钥、地址以及该主链下的全部从链的公钥、地址，当有新的节点加入业务联盟链时，该链上的主链区块更新区块头的注册表部分。随着从链区块中的数据添加到主链区块中，其区块头中的紧急度也逐位添加到主链区块的相应部分。

主链节点负责生成主链区块并在综合能源服务联盟链中进行上链与广播。由于主链节点间有大量的信息交互，为尽可能避免其发生拥塞，应参考传输控制协议（Transmission Control Protocol，TCP）中的传输策略设置窗口数n。窗口数的设定应参考当前网络水平与主链区块与从链区块的相对大小。若设置当前窗口数为6，包含非紧急数据的从链区块（区块头中的紧急度为0）添加进主链区块后，主链区块并不立即发送，而是等待6个从链区块添加后一起发送；若在等待过程中添加包含紧急数据的从链区块（区块头中的紧急度为1）则立即发送。设置紧急度和窗口数既保证了综合能源服务系统中信息传递的效率，又减少了在信息传递过程中发生拥塞的概率。

3　区块链支撑的综合能源服务的运行模式

在建立了基于能源区块链的综合能源服务模型后，探究其运行模式有重要意义。区块链支撑的综合能源服务的运行模式包括新节点的接入、节点间紧急数据的传递与节点间非紧急数据的传递等部分，具体如下。

3.1　新节点的接入

（1）当有一新节点期望加入某业务联盟链时，其发送意愿信息至该链的任一节点，该节点向其返回当前业务联盟链中主链节点的地址。

（2）新节点向主链节点发送加入申请、公钥地址及身份认证信息。

（3）主链节点核查其身份后，将其公钥地址写入主链区块头部的注册表，并用其私钥加密新节点的公钥，在业务联盟链中进行广播。

（4）链上各节点用主链节点的公钥进行解密，得到新节点的公钥。

（5）新节点用自己的私钥加密申请信息，并广播至该链上的所有节点。

（6）链上的从链节点用得到的公钥进行解密，若解密成功则回复回执信息。

（7）当新节点收到所有从链节点的回执信息，则接入成功。

3.2　节点间紧急数据传递（以荷端与源端间的直购电为例）

（1）源端从链节点a供大于求时，其将供应电能的具体信息打包进从链区块并上传至源端主链节点。

（2）源端主链节点收到该信息后，将该信息打包进主链区块后立即进行发送。

（3）荷端主链节点接收该信息后，在荷端联盟链上进行广播。

（4）荷端从链节点b有意愿达成交易，通过主链节点间回复信息至源端节点a。

（5）源端节点a通过主链节点将该交易信息发送至电网公司主链节点，电网公司主链节点在电网公司业务联盟链内广播该交易信息，电网公司从链

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

节点进行内部协商。

（6）电网公司联盟链内部达成一致后，发送回执信息给源端从链节点a与荷端从链节点b。

（7）参与该次交易的所有节点通过主链节点在全网广播该交易信息，直购电达成。

3.3　节点间非紧急数据传递（以数据交易为例）

（1）荷端节点d期望出售本季度用电数据，其将该数据进行哈希得到摘要并附上该数据的简介打包成从链区块，上传至主链区块。

（2）主链节点将区块中的数据打包进主链区块，等待窗口数已满或有紧急数据到达。

（3）主链节点将主链区块发送至综合能源服务联盟链。

（4）综合能源服务公司主链节点收到该主链区块后，接收其中数据交易的相关信息，并在从链上进行广播。

（5）综合能源服务公司从链节点e有意愿达成交易，通过主链节点回复信息至荷端节点d。

（6）2节点达成交易后，通过主链节点在全网广播该交易信息，数据交易完成。

4　结束语

互联网技术的不断发展加速了各行业的数字化转型，区块链作为核心技术自主创新的重要突破口，推动了综合能源服务模式的快速发展。本文基于区块链与综合能源服务的融合应用分析，在建立主从多链结构下的综合能源服务网络架构与主链节点的选举方法的基础上，设计了契合于综合能源服务的能源区块链，探讨了能源区块链支撑下的综合能源服务运行模式，希望能为区块链技术应用于综合能源服务提供参考。

参考文献：

[1]王静雯，李华强，李旭翔，等.综合能源服务效用模型及用户需求评估[J].中国电机工程学报，2020，40（2）：411-425.
WANG Jingwen，LI Huaqiang，LI Xuxiang，et al. Integrated energy service utility model and user needs assessment[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40（2）：411-425.

[2]杨晟，王浩淼，才思远，等.面向电力营销精益化的综合能源服务研究[J].华电技术，2019，41（11）：5-8，21.
YANG Sheng，WANG Haomiao，CAI Siyuan，et al. Research on integrated energy service for lean electricity marketing[J].Huadian Technology，2019，41（11）：5-8，21.

[3]范来富，戴晶晶，张建浩，等.基于智慧管理云平台的区域综合能源服务体系架构[J].农村电气化，2019（12）：57-60.
FAN Laifu，DAI Jingjing，ZHANG Jianhao，et al. Regional integrated energy service system architecture based on smart management cloud platform[J]. Electrification in Rural Areas，2019（12）：57-60.

[4]宋永华，包铭磊，丁一，等.新电改下我国电力现货市场建设关键要点综述及相关建议[J].中国电机工程学报，2020，40（10）：3172-3187.
SONG Yonghua，BAO Minglei，DING Yi，et al. Summary of key points for construction of my country's power spot market under the new electricity reform and related suggestions[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40（10）：3172-3187.

[5]黎启明.电力体制改革形势下售电侧应对策略[J].电工技术，2020（6）：131-134.
LI Qiming. Coping strategies for the power sale side under the reform of electric power system[J]. Electrical Technology，2020（6）：131-134.

[6]林俐，蔡雪瑄.基于风电消纳需求的综合能源服务商源荷协同运行策略[J].电网技术，2019，43（7）：2517-2527.
LIN Li，CAI Xuexuan. Source-charge cooperative operation strategy of integrated energy service providers based on wind power consumption demand[J]. Grid Technology，2019，43（7）：2517-2527.

[7]胡静哲，王旭，蒋传文，等.计及综合能源服务商参与的电力系统低碳经济调度[J].电网技术，2020，44（2）：514-522.
HU Jingzhe，WANG Xu，JIANG Chuanwen，et al. Low-carbon economic dispatch of power system considering the participation of integrated energy service providers[J]. Grid Technology，2020，44（2）：514-522.

[8]龚钢军，王慧娟，杨晟，等.区块链技术下的综合能源服务[J].中国电机工程学报，2020，40（5）：1397-1409.
GONG Gangjun，WANG Huijuan，YANG Sheng，et al. Integrated energy services under blockchain technology[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40（5）：1397-1409.

[9]韩峰，张衍国，严矫平，等.综合能源服务业务和合作模式[J].华电技术，2019，41（11）：1-4.
HAN Feng，ZHANG Yanguo，YAN Jiaoping，et al. Integrated energy service and cooperation modes[J]. Huadian Technology，2019，41（11）：1-4.

[10]孙强，高松，谢典，等.协调可靠性与经济性的园区综合能源系统优化规划[J].电力系统及其自动化学报，2020，32（4）：76-82.
SUN Qiang，GAO Song，XIE Dian，et al. Optimized planning of integrated energy system in the park coordinating reliability and economics[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation，2020，32（4）：76-82.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[11]黄子硕,何桂雄,闫华光,等.园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J].电力自动化设备,2020,40(1):10-18.
HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huaguang, et al. Overview and prospect of park-level integrated energy system optimization model functions [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(1):10-18.

[12]陶静,徐武,李逸琳,等.基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J].科学技术与工程,2019,19(33):200-205.
TAO Jing, XU Wu, LI Yilin, et al. Operation optimization of combined cooling, heat and power integrated energy system based on multi-objective algorithm [J]. Science Technology and Engineering,2019,19(33):200-205.

[13]孙思宇,于成琪,孙涛,等.冷热电三联供分布式能源系统研究进展[J].华电技术,2019,41(11):26-31.
SUN Siyu,YU Chengqi,SUN Tao,et al. Advance in study on CCHP distributed energy system [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 26-31.

[14]陈作汉,曹洁,赵付青.基于NSGA-Ⅱ的无线传感网络簇首选择算法[J].控制与决策,2019,34(11):2358-2365.
CHEN Zuohan, CAO Jie, ZHAO Fuqing. NSGA-Ⅱ-based cluster head selection algorithm for wireless sensor networks[J].Control and Decision,2019,34(11):2358-2365.

[15]王林,梁濛.基于多属性决策TOPSIS的簇头选择[J].计算机工程,2019,45(1):45-49,54.
WANG Lin, LIANG Meng.TOPSIS cluster head selection based on multi-attribute decision making [J]. Computer Engineering,2019,45(1):45-49,54.

[16]田秀霞,陈希,田福粮.基于区块链的社区分布式电能安全交易平台方案[J].信息网络安全,2019(1):51-58.
TIAN Xiuxia, CHEN Xi, TIAN Fuliang. Community distributed electric energy security trading platform based on blockchain[J].Information Network Security,2019(1):51-58.

[17]赵曰浩,彭克,徐丙垠,等.能源区块链应用工程现状与展望[J].电力系统自动化,2019,43(7):14-24,58.
ZHAO Yuehao, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current status and prospect of energy blockchain application engineering [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(7):14-24,58.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

杨晟(1995—),男,河北张家口人,在读硕士研究生,从事综合能源服务与区块链等方面的研究(E-mail:yangsheng18hebut@163.com)。

孙跃(1990—),男,河北任丘人,工程师,工学硕士,从事电力系统通信技术、区块链技术、能源互联网安全技术和网络与信息安全防护技术等方面的研究(E-mail:641348552@qq.com)。

龚钢军(1974—),男,河南济源人,副教授,工学博士,从事区块链技术应用、能源电力信息安全等方面的研究(E-mail:gong@ncepu.edu.cn)。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net