

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191145

泛在电力物联网背景下基于联盟区块链的电力交易方法

黄虹¹, 文康珍¹, 刘璇², 王晓婷³, 杨玺³

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077;
3. 国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430012)

摘要: 泛在电力物联网的建设, 推进电能的生产消费进一步向分布式发展, 出现了更多电力自由双边交易。中心化电力交易模式中, 市场主体互信度不够, 数据安全性不高。提出基于联盟链技术的电力交易方法以解决这些问题, 确保交易高透明度、可追溯性与不可篡改性。联盟链分布式存储与数据共识机制确保电力交易系统安全性。保留交易中心的监管权限、将调度中心安全校验与电网输送电能环节纳入电力交易, 提升联盟链技术应用于电力交易业务的可行性。最后设计交易平台中发、用电多方合作博弈交易情景, 多发电方共同完成电力需求。该方法有利于灵活调整交易电量, 增加合作收益, 避免单个发电方无法满足规定时间内过大电力需求的隐患, 为未来的弱中心化电力交易模式提供新思路。

关键词: 泛在电力物联网; 电力交易; 联盟区块链; 弱中心化; 分布式存储

Power trading method based on consortium blockchain under ubiquitous power internet of things

HUANG Hong¹, WEN Kangzhen¹, LIU Xuan², WANG Xiaoting³, YANG Xi³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 3. State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430012, China)

Abstract: With the construction of ubiquitous power internet of things, there will be more free bilateral energy trading in the future. In the centralized electricity trading mode, the mutual trust of market participants is insufficient, and the data security is not enough. Consortium blockchain is expected to solve these problems. This paper proposes a power trading method based on consortium blockchain technology to ensure high transparency, traceability and irreversible modification of power trading. The regulatory authority of the trading center is retained, the security check of the dispatching center and the power transmission of the power grid are integrated into the power transaction, and the system application feasibility is improved. Finally, a multi-party cooperative game trading scenario is designed, and a single power demand can be completed by multiple power generation parties. It is conducive to the flexible adjustment of trading power and the increase of cooperation revenue, avoiding the hidden dangers that a single power generator cannot meet the excessive power demand within a specified time. It provides new ideas for establishing of a weak centralized power trading model for the power market.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB1201002).

Key words: ubiquitous power internet of things; power trading; consortium blockchain; weakly centralized; distributed storage

0 引言

推动能源变革, 缓解能源供应压力已成为世界一流”的战略目标^[1], 将先进的物联网技术结合一系列新兴智能技术, 推动泛在电力物联网^[2]与坚强

性潮流^[3], 电网的建设是推动能源市场格局变化的有效途径。2019年国家电网提出“三型两网、世界智能电网、能源网络与信息网络深度融合^[4], 促使电力系统由单一电能供应商向智慧综合能源服务提供商转变, 促进电网运营部门向枢纽型、平台型、共享型企业转型。

泛在电力物联网的建设对新一代电力交易平台

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB1201002)

提出更高要求^[5]。越来越多产消者的接入将会产生新的商业模式, 形成电力自由双边交易^[6-7]。电力交易管理难度随着交易信息海量而逐渐增加。我国电力系统采用“采集+集中”的控制模式^[8]、私密且中心化的电力交易模式^[9], 使得交易主体沦为数据孤岛, 在市场机制、交易清算等方面还存在着诸多问题, 市场主体与交易主导机构间引发信任鸿沟^[10]等问题。这些问题产生的根源在于公平公正的电力市场双边交易本质上是分散决策, 与中心化电网管制方式格格不入。

国家大力推动泛在电力物联网建设、推进电力市场改革的背景下, 电力的生产消费将进一步向分布式发展。当前正是促进公平公正、高效管理电力市场交易的有利时机^[11]。区块链技术作为新兴的分布式的价值传输协议, 有利于电力市场参与主体的自发管理与互信^[12]。目前区块链技术迅速发展并被应用于贸易结算、人工智能等多个领域^[13-15], 也有学者尝试将该技术应用于能源领域^[16]。文献[17]分析了区块链与能源互联网的兼容性, 以及区块链技术在电力体制改革中的应用前景。文献[18]提出了基于区块链技术的电力自动需求响应系统的分布式管理思路。文献[19]提出区块链技术应用于配电网交易过程, 以实现更好的新能源消纳。文献[20]构建了区块链技术在电力市场需求侧改革背景下的大用户直购电的准入机制与交易框架。

很多学者仅把电力交易当成普通商品进行直接交易^[21-22], 交易结束后调度电能^[23]。然而完全按照市场达成的电力交易可能不符合网络约束条件, 在实际应用中缺乏可行性^[24]。同时, 采用公有区块链技术容易导致过多的电力交易节点接入引发区块链架构剧烈波动, 产生计算繁杂、效率低下的缺点。

本文结合联盟区块链技术特性, 提出基于联盟链技术的电力交易模式, 以应对未来越来越多的电力自由双边交易业务场景。主要贡献在于: 将联盟链技术特性结合电力交易模式, 设定联盟链节点类型权限、交易数据的分布式存储与共识机制, 促进电力市场参与主体互信, 实现弱中心化电力交易的高效管理; 考虑到电能不仅仅是普通商品, 必须网络约束条件, 保留交易中心的监管审核、调度中心安全校核与电网企业电能输送功能, 提升系统应用可行性。最后设计多方发电企业合作合作博弈的应对电力需求的交易情景, 有利于灵活调整交易电量, 增加合作收益。

1 分布式电力交易模式下区块链技术选型

随着泛在电力物联网的建设与分布式能源的快

速发展, 电力系统常规业务不断融合新兴业务, 将深刻影响未来电网的运营模式^[25]。在能源电力交易领域, 交易模式也正在由集中式向分布式演化^[26]。泛在电力物联网中海量的设备接入, 多元、交融的节点交易及信用数据的使用和储存, 是泛在电力物联网技术发展的一大挑战。在这种形势下, 有必要寻求电力交易数据的高效管理方式。

1.1 区块链组织结构

区块链是由多个包含交易信息的区块逐级连接而成的链状分布式账本。如图1所示, 其最重要的两个部分是: (1) 区块头, 包含前一区块头 Hash 值, 随机数, Merkle 根等。Hash 值在区块间起到数字指纹作用, 促使区块连接成不可逆、不可篡改的区块链。(2) 区块体, 包含得到验证后的交易信息, 所有交易形成的 Merkle 根连接到区块头, 保证信息不被恶意篡改传播。

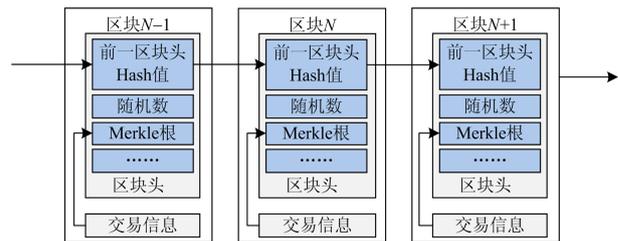


图1 区块链的组织结构

Fig. 1 Blockchain organization

1.2 区块链技术选型

区块链技术可以根据其应用模式将其分为公有链、私有链和联盟链, 三种类型区块链的比较总结如表1所示。

表1 三种类型区块链技术比较

Table 1 Comparison of three types of blockchain technology			
比较项目	公有链	私有链	联盟链
中心化程度	去中心化	中心化	多中心化
参与者	任何人	中心控制者 指定成员	预先设定具有 特殊特征的 成员
记账者	所有参与者	自定	协商决定
信任机制	工作量证明	自定	共识机制
特点	去中心化, 去信 任, 任何用户均可 访问, 程序容易部 署。但交易量受 限, 能耗高	网络能耗较低, 规 则修改容易, 交易 量和交易速度无 限制, 但接入节点 受限	容易进行权限 控制, 高度可 扩展性

电力交易主体并不局限于单个企业, 基于私有链技术的交易平台相对封闭。同时电力交易不能采用完全脱离电网公司管控的去中心化电力交易方

式，结合表 1 中三种区块链技术可知，联盟链是比公有链、私有链更合适的区块链类型。联盟链分布式计算、存储、验证数据等特性与电力自由双边交易业务在结构上有天然耦合特性，可通过融合区块链技术构建电力灵活自主、公平公正的交易平台。

2 基于联盟链技术的电力交易平台实现

2.1 市场成员管理

基于联盟区块链技术的电力交易平台，具体包含发电企业、用电企业、监管中心、调度中心以及电网企业。电力交易市场成员管理过程如图 2 所示，监管中心的角色由电力交易中心承担，发电企业、用电企业，符合市场准入机制后才能进行电能交易。发电企业与用电企业向监管中心提交相关信息用户注册，在注册成功后获得数字证书。

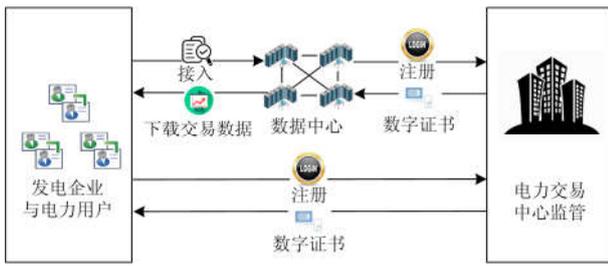


图 2 电力交易市场成员管理

Fig. 2 Power trading market member management

2.2 电力交易数据分布式存储与数据共识机制

区块链分布式存储框架如图 3 所示。基于联盟链技术的电力能源交易平台，可按照节点的权限将所有节点分为数据中心节点与扩展节点。交易数据分布存储在各个数据中心节点，每个数据中心节点拥有全量的交易合同数据。同时，每个数据中心可以扩展至若干扩展节点，扩展节点从数据中心上传、下载相关数据，这样极大减少了系统的存储负担。

在区块共识方面，系统预先选定联盟链中一定数目的数据中心节点，实现交易数据的分布式存储与共识。其他发电企业、用电企业、监管中心、调度中心以及电网企业担任扩展节点的角色。发电企业与用电企业在参与电力交易前，需要接入一个数据中心，发电企业与电力用户将自己的账户上传至数据中心，同时从数据中心的数据库中下载最新的交易数据。区块链的共识算法由预选数据中心节点执行，而非全网所有节点，从而大大减少网络开销。预选数据中心节点共识机制采用拜占庭容错机制，数据更改或者新增需求的系统响应步骤如图 4 所示。数据中心发起的数据更改或者新增需求，需要全网数据中心共同决策，根据赞成节点比例来决定

修改是否进行。

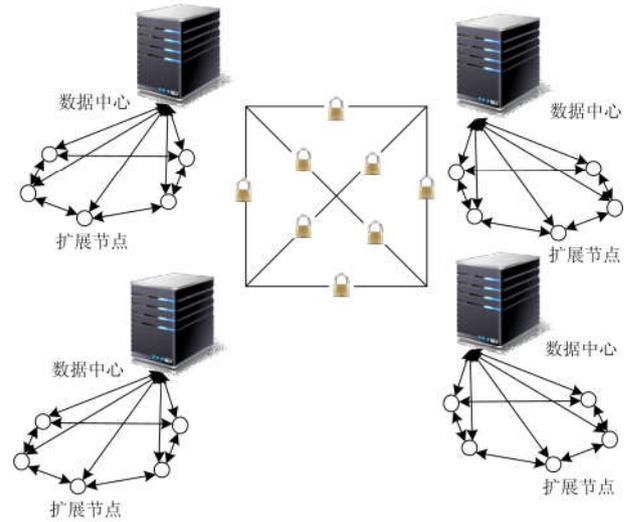


图 3 联盟链分布式存储框架

Fig. 3 Distributed storage framework of consortium blockchain

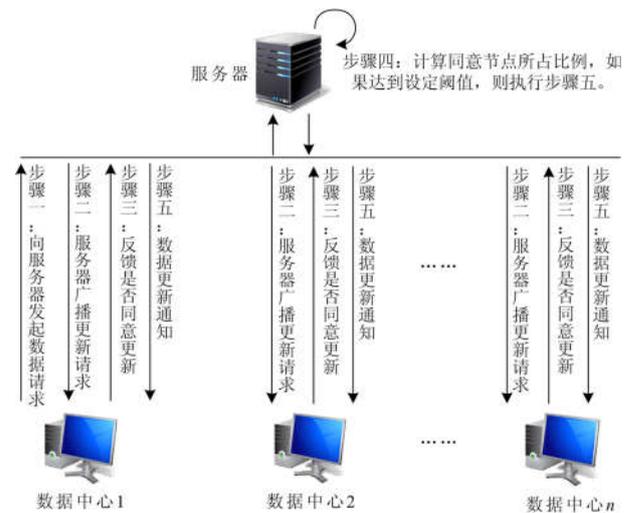


图 4 数据更改或新增需求时的系统响应步骤

Fig. 4 System response steps when data changes or when new requirements are met

3 基于联盟链技术的电力交易平台

3.1 软件系统设计

基于联盟链技术的电能调度交易平台，系统架构如图 5 所示，主要分为基础层、数据层、服务层和展示层四个部分。基础层是系统运行所需的计算资源、存储资源，如硬件服务器、硬盘存储等。数据层是本系统的业务数据库，存储系统业务处理过程中产生的各种数据。服务层是根据用户的需求，对数据库里的数据进行各种逻辑处理，满足实际的功能需求，实现系统的功能设计。展示层将服务层

处理之后的数据以网格、报表、单据等形式呈现给用户。

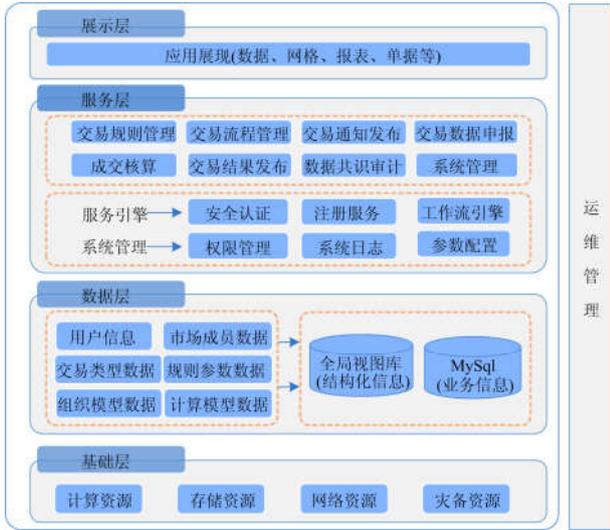


图5 基于区块链技术的电力交易调度平台系统架构
Fig. 5 System architecture of power trading scheduling platform based on blockchain technology

3.2 基于联盟链技术的电力交易平台工作流程

若是仅把电能当成普通商品，按照市场意愿直接进行电力交易^[21-22]，可能不符合网络约束条件，在实际应用中缺乏可行性^[24]。本文考虑实际电力交易过程中调度中心安全校核过程，提出如图6所示的基于联盟链技术的电力交易流程，具体涉及的操作有：电力市场主体注册与登录，发布自身信息，交易发起，交易审核，合同归档，业务清算等。

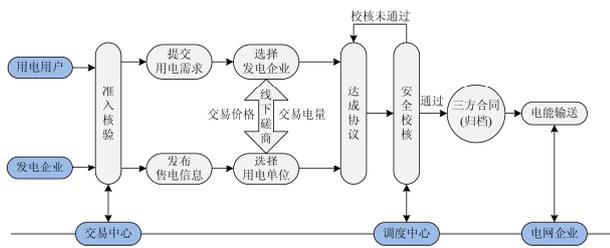


图6 电力交易调度流程

Fig. 6 Power transaction scheduling process

通过准入核验成功注册的发电企业与电力用户，可以登录客户端发布发电规划与用电需求。发、用电企业在平台上商定交易电量、价格、分月安排等信息，并将依据协商结果在平台上发起交易申请。一单交易可以由用电、发电任何一方主动发起，交易单的内容包含创建者、创建时间、发电方信息、用电方信息、交易电量、交易电价、交易时间等。

通过交易审核与安全校核的交易单，电力用户、

发电企业和电网企业3方签订直接购售电合同及委托输电合同。购售电企业、交易中心、调度中心电网企业对合同用私钥签名，并进行加密。本系统选定交易发起方所连接的数据中心节点将签名加密后的交易合同生成区块，广播到系统中其他数据中心节点，区块被其他数据中心节点一致共识后将记录到联盟链中，电网企业按规定提供输电服务。任何事件一经变动，全网数据中心节点共同决策，根据节点赞成比例来决定是否产生变动。通过决策的交易信息在联盟链网络中以新区块的形式被广播、共识、重新记录到联盟链中。

4 应用与分析

4.1 电力交易应用情景

本节描述了基于联盟链技术的电能交易情景。用电用户在交易平台中提交用电需求， n 个发电企业参与交易申报。电力交易过程采用区块链方式进行组织、传递、共识与存储。发、用电方在电力交易平台上进行多边合作博弈交易，并不仅限于两方交易。

各发电企业机组生产成本函数 $f(p_i)$ 如式(1)所示。报价函数 $r(p_i)$ 进一步边际成本与报价系数的乘积，具体如式(2)所示。

$$f(p_i) = a_i p_i^2 + b_i p_i + c_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$r(p_i) = k_i (2a_i p_i + b_i), \quad k_i > 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 个企业的发电机组(Generator Unit, GU)发电成本函数系数； p_i 为机组 i 的实际出力； k_i 是报价函数系数； $(2a_i p_i + b_i)$ 是边际成本。

第 i 个企业发电机组实际出力 p_i 需满足实际出力上下限 $p_{i\min}$ 、 $p_{i\max}$ 约束。

$$p_{i\min} < p_i < p_{i\max} \quad (3)$$

为确保所有机组利润非负，采用边际定价法确定市场出清价格 $r \geq r(p_i), (i=1, 2, 3)$ 。依据市场出清价格给出收益最优的发电企业合作博弈与收益分配方案。采用Shapley值分配局中人参与市场交易合作博弈产生的共同利润^[27]，局中人 i 分得的收益 x_i 表示为

$$x_i = \sum_{S \subseteq N} \frac{(n-|S|)! (|S|-1)!}{n!} [v(S) - v(S-\{i\})], \quad i = 1, 2, \dots, |S| \quad (4)$$

式中： N 为博弈的局中人集合，有 n 个元素； S 为从 N 中产生的联盟，有 $|S|$ 个元素； $v(S) - v(S-\{i\})$ 表示局中人 i 对联盟 S 的边际贡献。

发、用电企业达成一致的意愿后在系统上形成

交易单,记录交易发用电方信息、创建时间、交易电量、交易电价、交易时间等信息。交易单通过交易中心审核与电网企业安全校核后,电力用户、发电企业、电网企业签订购售电合同及委托输电合同。电力交易信息在系统中以区块链的形式被记录下来。

4.2 效果与分析

设用电用户在系统中提交规定时间段内的用电需求 160 MWh, 3 家发电企业申报交易。机组发电成本函数系数 a_i 、 b_i 、报价函数系数 k_i , 以及机组 i 出力上下限 $p_{i\min}$ 、 $p_{i\max}$ 参数如表 2 所示。

表 2 发电企业机组参数表

机组序号	$a_i /$ (\$/MWh ²)	$b_i /$ (\$/MWh)	$p_{i\min} /$ MW	$p_{i\max} /$ MW	k_i
GU ₁	0.01	8.4	30	100	1.3
GU ₂	0.02	8.2	35	90	1.2
GU ₃	0.01	8.8	20	105	1.1

由表 2 中的参数, 可得 3 台机组的竞价总量区间为[85, 295] MWh。图 7 示出了式(1)、式(2)结合表 2 参数求得的机组出力范围与报价。3 台机组从竞价范围最低值 85 MWh 起, 边际价格为 3 个机组在出力范围内的报价最高值。

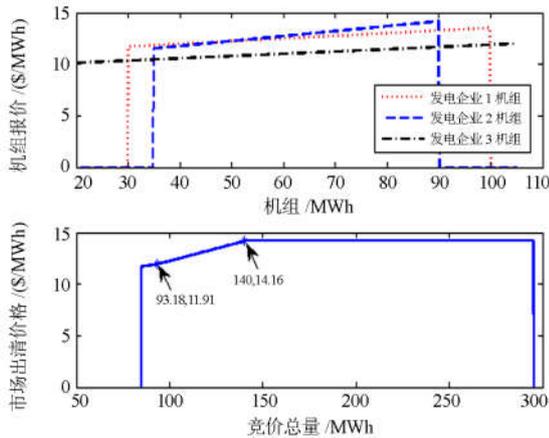


图 7 机组报价与市场出清价格

Fig. 7 Generator quotation and market clearing price

由图 7 可以看出市场出清价格整体变化趋势随着竞价总量上升非降。竞价总量为 85~93.18 MWh 时, 市场出清价格由报价最高的 GU₁ 决定; 竞价总量为 93.18~140 MWh 时, 市场出清价格由报价最高的 GU₂ 决定; 竞价总量为 140~295 MWh 时, 报价最高的 GU₂ 可能已处于满负荷运行状态, 故市场出清价格保持不变。在用电用户 160 MWh 的需求条件下, 市场出清价格为 \$ 14.16。

建立市场交易参与者的多边合作博弈交易模

型。采用 Matlab 求解发电企业在不同联盟组合方式下的合作收益与机组出力对比, 具体如表 3 所示。

表 3 机组联盟合作收益与出力分配对比

Table 3 Comparison of unit alliance cooperation revenue and output distribution

联盟组合	市场出清价格 r (\$/MWh)	联盟最大 收益/\$	{GU ₁ , GU ₂ , GU ₃ } 出力/MW
{GU ₁ , GU ₂ }	14.16	589.60	{100, 60, 0}
{GU ₁ , GU ₃ }	14.16	634.60	{85, 0, 75}
{GU ₂ , GU ₃ }	14.16	549.77	{0, 58, 102}
{GU ₁ , GU ₂ , GU ₃ }	14.16	699.40	{67, 36, 57}

由表 3 可知, 当 3 个发电企业组成的联盟 {GU₁, GU₂, GU₃} 共同完成本次电力需求时, 联盟收益比其他合作方式的收益更大。基于式(4)进行 Shapley 值进行收益分配, 得机组 i 对应的收益 x_i 分别为: $x_1 = \$ 253.91$, $x_2 = \$ 211.49$, $x_3 = \$ 234.00$ 。

基于联盟链技术的电力交易平台, 不仅满足了交易中心的监管, 调度中心的安全校核等可控性需求, 有利于发、用电方高效、安全地协同地电力交易量。此外, 提供了发、用电企业多方合作博弈平台, 单一电力需求可由多发电方共同完成, 有利于更加灵活调整交易电量, 节省生产成本, 增加合作收益, 避免了单个发电方无法在规定时间内满足过大电力需求的隐患。

5 结论

关于区块链技术和电力交易的研究方兴未艾, 但较少涉及结合联盟链技术特性的弱中心化电力交易模式。本文提出联盟区块链技术在未来分布式电力交易业务方面的应用, 为未来弱中心化电力交易模式提供新的思路, 解决了完全去中心化的电力交易带来的数据集中于统一服务器导致公信力下降、集中式数据存储方式数据丢失破坏风险、单一机构少数人员有权篡改数据等安全隐患。满足电力交易中心审核市场主体的身份信息数据的可控性需求; 多数据中心、多机构共同维护, 分布式存储与数据共识机制确保电力交易系统安全性; 区块链准确记录电力交易数据, 确保交易的高透明度、可追溯性与不可篡改性^[28]; 提供发、用电企业多方合作博弈平台, 有利于电力市场交易主体安全高效地协同合作, 节省生产成本, 增加合作收益。

目前区块链技术还处于发展初期阶段, 相较于当前支付宝等主流的中心化交易模式, 在效率及响应速度方面有待提升; 在信用体系建设方面, 可以整合社会信用资源建立信用链系统, 完善电力交易市

场主体的信用评级工作。期待相关专家未来在基于区块链技术的电力交易应用领域做出更深入的研究。

参考文献

- [1] 何建坤. 能源革命是我国生态文明建设和能源转型的必然选择[J]. 经济研究参考, 2014(43): 71-73.
HE Jiankun. Energy revolution is the inevitable choice for the construction of ecological civilization and energy transformation in China[J]. Economic Research Reference, 2014(43): 71-73.
- [2] 王秀强. 国网转型:掘金泛在电力物联网[J]. 能源, 2019(4): 28-30.
WANG Xiuqiang. National network transition: nuggets ubiquitous in the power internet of things[J]. Energy, 2019(4): 28-30.
- [3] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [4] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2..
- [5] 刘瑞丰, 陈天恩, 李焰. 西北新能源消纳和省间交易运营高质量发展的实践与思考[J]. 中国电力企业管理, 2019(19): 44-47.
LIU Ruifeng, CHEN Tian'en, LI Yan. Practice and thoughts on the high-quality development of new energy consumption and inter-provincial transaction operation in Northwest China[J]. China Power Enterprise Management, 2019(19): 44-47.
- [6] 谈竹奎, 程乐峰, 史守圆, 等. 能源互联网接入设备关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 140-152.
TAN Zhukui, CHENG Lefeng, SHI Shouyuan, et al. Discussion on key technologies of energy internet access equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 140-152.
- [7] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [8] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化. 2019, 43(13): 9-20.
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20.
- [9] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [10] 肖凌. 从区块链技术到企业管理的变革[J]. 环球市场信息导报, 2016(14): 43.
XIAO Ling. Change from block chain technology to enterprise management[J]. Global Market Information Report, 2016(14): 43.
- [11] 周敬东. 城市能源互联网的技术架构及在厦门市的实践探索[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 165-176.
ZHOU Jingdong. Technical framework of urban energy Internet and its practical exploration in Xiamen city[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 165-176.
- [12] 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.
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.
- [13] CHAPRON G. The environment needs cryptogovernance[J]. Nature, 2017, 545(7655): 403.
- [14] 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 applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.
- [15] SWAN M. Chapter five-blockchain for business: next-generation enterprise artificial intelligence systems[M]. Advances in Computers, Raj P, Deka G C, Elsevier, 2018: 111, 121-162.
- [16] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3729-3736.
SHE Wei, HU Yue, YANG Xiaoyu, et al. Virtual power plant operation and scheduling model based on energy blockchain network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,

- 37(13): 3729-3736.
- [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] 李彬, 卢超, 曹望璋, 等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3691-3702.
LI Bin, LU Chao, CAO Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3691-3702.
- [19] 朱文广, 熊宁, 钟士元, 等. 基于区块链的配电网电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 165-172.
ZHU Wenguang, XIONG Ning, ZHONG Shiyuan, et al. Power trading method for distribution network based on block chain[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 165-172.
- [20] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大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 blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [21] ALAM M T, LI H, PATIDAR A. Bitcoin for smart trading in smart grid[C] // 2015 IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN). IEEE, April 22-24, 2015, Beijing, China: 1-2.
- [22] MIHAYLOV M, JURADO S, AVELLANA N, et al. NRGcoin: virtual currency for trading of renewable energy in smart grids[C] // 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14), May 28-30, 2014, Krakow, Poland: 1-6.
- [23] 张栋珀. 基于区块链的电能交易平台设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
ZHANG Dongpo. Design and implementation of electric energy trading platform based on blockchain technology[D]. Chengdu: University of Science and Technology, 2018.
- [24] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638.
- [25] 曾鸣, 王雨晴, 李明珠, 等. 泛在电力物联网体系架构及实施方案初探[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 1-7.
ZENG Ming, WANG Yuqing, LI Mingzhu, et al. Preliminary study on the architecture and implementation plan of widespread power internet of things[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 1-7.
- [26] 曾鸣, 舒彤, 李冉, 等. 能源互联网背景下可交易能源实施的关键问题及展望[J]. 电力建设, 2018, 39(2): 1-9.
ZENG Ming, SHU Tong, LI Ran, et al. Key problems and prospects of transactive energy implementation under energy internet[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 1-9.
- [27] 刘名武, 万谥宇, 吴开兰. 碳交易政策下供应链横向减排合作研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(3): 28-35.
LIU Mingwu, WAN Miyu, WU Kailan. Research on supply chain horizontal cooperation for emission reduction under the cap and trade policy[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(3): 28-35.
- [28] 颜拥, 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.

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-11-20

作者简介:

黄虹(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网, 电力系统规划与经济运行, 电网新技术的应用。E-mail: honghuang010@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)