

区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化

杨明通¹,周步祥¹,董 申¹,林 楠²,李祖钢¹,何飞宇¹

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘要:为了发挥微网电力市场的活力,实现清洁能源的优化配置,在区块链支持下,针对微网电力市场的调度优化进行了研究。基于微网市场和区块链相似的网络拓扑结构,构建了基于区块链的微网市场总体框架。通过区块链管理平台获取数据信息,结合模型预测控制(MPC)方法,对微网市场调度运行进行优化。以IEEE 33节点系统为算例进行分析,结果验证了区块链支持下的微网交易模型的有效性,表明通过区块链管理平台结合MPC进行优化调度,增强了微网市场的鲁棒性,提高了电力交易过程中负荷功率预测的准确性以及能源利用率。

关键词:区块链;微网;电力市场;MPC;智能合约;电力交易;调度优化

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911020

0 引言

随着全球能源急剧消耗,全球变暖、空气污染等环境问题日益严重,传统能源已经不能满足并适应社会的需求和发展,以可再生能源为主的混合能源将代替传统能源成为满足社会发展需要的主要能源^[1]。微网作为新能源就地消纳和并网远送的主要模式,其具有供电可靠、运行方式灵活、对环境友好等优点,因而得到了普遍的关注和研究^[2-4]。文献[5]建立了微网和用户的非合作博弈模型,对冷热电联供微网的运行进行了优化,提高了微网对可再生能源的消纳能力;文献[6]基于多代理控制模型,对孤岛运行方式下含多储能单元的微电网内各分布式能源及负荷的动态博弈模型进行了研究,并通过算例验证了模型的有效性。

目前,国内外学者将区块链技术引入新能源相关领域,并对其应用进行了研究^[7-8]。区块链具有去中心化、系统开放性等特点^[9-10],使得区块链技术在金融、医疗及政府相关方面也得到了广泛的应用^[11]。文献[12]对区块链技术在能源互联网诸多方面的应用进行设想,对碳排放权认证、信息物理系统安全、虚拟发电资源交易以及去中心化的多能源系统协同这4个典型应用场景进行说明。文献[13]对区块链在电力能源系统的展望中提到电力交易的构想,但没有实现具体应用。文献[14]对电力交易进行安全约束,利用区块链提供的信任机制进行阻塞管理。文献[15]对区块链在电力辅助服务领域的应用进行了综述,但没有对相应的机制做出有效性分析。文献[16]对区块链技术在大用户直购电中的应用进行了探索研究,但所做研究仅限宏观层面。虽然上述文献对微网能源交易的理论框架和支持技术进行了深入的研究,但缺乏明确的基于区块链的微网电力市场优化调度的研究。

本文对区块链支持下的微网电力交易模型进行研究,构建了微网市场架构。利用区块链智能管理平台(BCIM)获取交易信息数据,结合实时模型预测控制(MPC)负荷预测策略,根据价格信号优先级形成发用电计划,发送至管理平台实现最优匹配。这样可有效地发掘区域资源的配置能力,并在更可能大的空间内进行能源的地域性互补。

1 基于区块链的微网电力市场架构

1.1 总体架构

国外典型的区域现货市场模式分为统一平衡和分区平衡区域现货市场^[17-18]。在这2种现货市场模式中,分区平衡区域现货市场更符合我国“省为实体”的电力市场。因此,本文将分区平衡区域现货市场模式与区块链技术相结合应用在微网电力市场设计理念中。

微网电力市场的主体主要包括为了获取较低电价的普通用户、将过剩的分布式电能进行储存出售的分布式电能生产者、负责区块链管理平台运营和监管的微网运营商以及提供辅助服务和基础设施建设的地方电网公司。参与微网市场的主体在满足电力系统安全约束的条件下,根据自身需求进行日前、小时内及实时的电力交易,其交易的合规性由微网运营商和电力公司裁定,并将其违规交易操作记录在征信系统中。

选定以太坊 Balance 模型^[19]作为账户模型,Balance 的变化取决于市场参与者的账户数据和智能合约的状态变化。考虑到微网市场和能源交易的特殊性质,选取联盟链作为微网的区块链模型^[20],联盟链网络为授权节点间构成的网络,适用于电网等权限要求较高的场景,且各节点之间能建立独立的信息通道,能较好地保护供应商和用户的隐私,其联盟节点成员为符合准入条件的普通用户、分布式电能生产者和微网运营商;采用实用拜占庭容错(PBFT)

作为共识机制^[21],该共识机制采用数学计算,不需要进行挖矿,实现了BCIM在最短的时间内达成共识,以此提高区块链的交易速度从而满足微网市场的效率需求。为了激励市场中理性的“经济人”参与记账过程以达成共识,搭配设计了2种激励机制:①直接收取交易各方的手续费,作为记账节点的收益;②在记账中,微网运营商可发行一定量的区块链代币作为奖励,当交易节点进行安全校核或阻塞管理等操作时,可选择支付代币换取交易优先权。

图1为区块链支持下的微网供需生态图,所有参与微网市场的产消者(生产者/消费者)作为系统节点具有相等的地位,均由BCIM授权进行统一管理。所有参与者在交易过程中的信息、所进行的操作及产生的结果都会反馈到区块链进行储存、处理,从而保证交易过程的正常进行及交易数据的安全性。

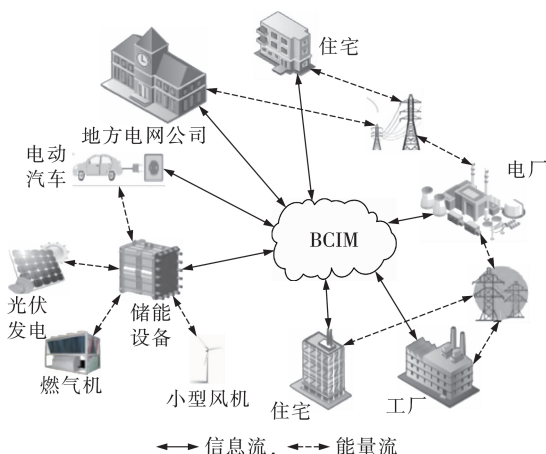


图1 区块链支持下的微网供需生态图

Fig.1 Supply and demand ecology of microgrid supported by blockchain

区块是用于记录电力交易信息的基本数据单元,由区块头、区块体两部分组成,其中区块头通过区块间的哈希值链接到前面的区块,区块体主要记录电力交易数据信息。区块链的数据结构见图2。

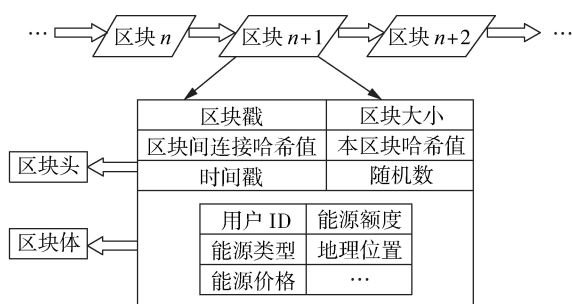


图2 区块链的数据结构

Fig.2 Data structure of blockchain

1.2 微网电力交易流程

微网中的每一个产消者都安装了智能电表,实时收集并记录生产、消耗电能的信息,并将信息传递

给BCIM。BCIM的搭建见附录A。微网通过公共耦合点与主网相连,当微网生产的电能不能够满足本地用户需求时,由主网进行电力供应;当微网电能过剩时,则由微网向主网进行能源外送。微网从主网购得电量的价格应该低于本地电价,消费者上报的购买电能的价格应该高于本地电价,通过这种激励机制刺激买卖双方进行交易。图3为微网电力交易流程图。

1.3 智能合约设计

本文提到的智能合约是一段预先编译协定并存储在区块链中的程序代码。在协定智能合约时,买卖双方均可选择一个代理进行电力交易或者自己参与市场进行交易。通过竞价交易,出价高的个体赢得那一轮电量。

智能合约是促进、验证和实现整体联系的协议,其使用的是正常合同的推理和结构,根据最低限度的人为干预条款,使合同裁决得以执行^[22]。此外,将智能合约中的用户用电量和运营数据与大数据平台相衔接,可以有效地提高负荷预测的准确性,使得发电计划更加匹配。

智能合约有5种基本的功能:①广播宣布每一个竞价交易的开始;②接收当前卖方待售资源给买方;③等待一段时间,直到收到所有买家的出价;④比较所有买家的出价,产生并宣布该轮电量的获得者;⑤将结算款从买家账户转入相应的卖家账户。在电力交易过程中,买家和卖家之间是由智能合约建立联系,买卖双方完全自治,对交易过程进行记录存储以便追溯,保证了交易的安全。智能合约算法流程图如图4所示。

2 区块链架构下微网电力市场实时调度优化

本文利用实时MPC算法结合智能交易云平台提供的数据,对分布式电源(DG)出力、用户负荷功率进行预测,在保证微网安全稳定运行的前提下,实现微网市场调度优化,增加微网经济收益,提高新能源利用率。图5为区块链架构下的微网市场运行过程。

微网电力市场的调度优化模型主要考虑经济收益,目标函数为:

$$\max Z = C_{BS} - C_{GE} - C_{AP} + C_0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{BS} = \sum_{t=1}^A \sum_{i=1}^2 c'_{GS,i} P^t_{GS,i} \Delta t \\ C_{GE} = \sum_{t=1}^A \left[\sum_{n=1}^N c_{o,n} P^t_{DG,n} + \sum_{m=1}^M (\alpha_c c_{ins} / x_m^t + c_{eo,m} P^t_{es,m}) \right] \Delta t \\ C_{AP} = K_1 \left(\min \{0, h_1\} \right)^2 + K_2 h_2^2 - (\omega_e - \omega_{e0}) R_b(t) + \\ c_{ex}(t) (H(t) - H(t_0)) + K_3 F \end{cases} \quad (2)$$

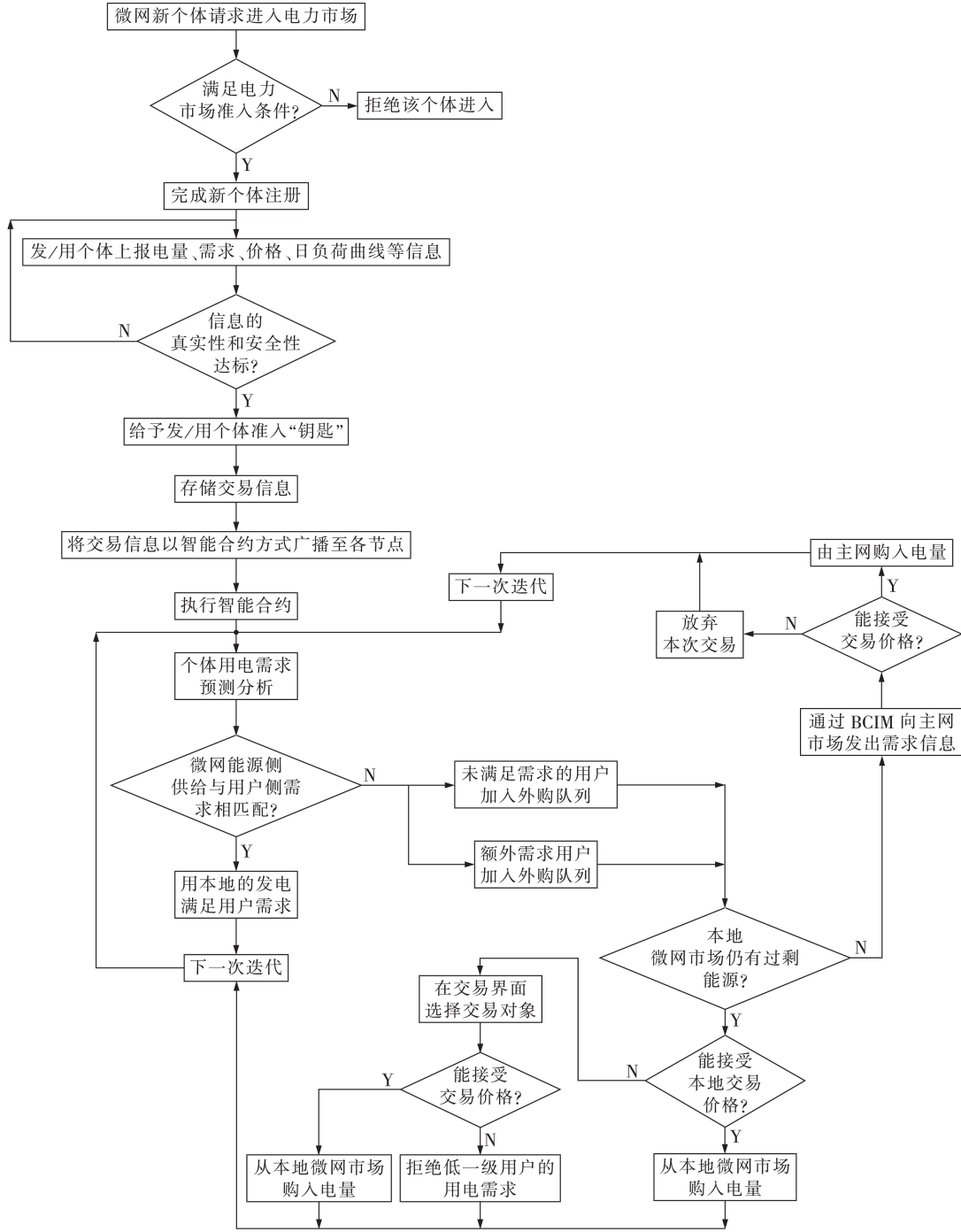


图3 微网电力交易流程图

Fig.3 Flowchart of microgrid power trading

其中, C_{BS} 为微网的购售电费用, 其值为负表示微网向主网或本地用户购电的费用, 其值为正表示微网向主网或本地用户售电的费用; C_{GE} 为分布式发电设备及储能设备的运维成本; C_{AP} 为奖惩费用; C_0 为微网运营商收取的区块链运营费用; A 为一天内的交易时段数, 因单位交易时段时长为 15 min, 所以 A 的取值为 96; Δt 为单位交易时段时长; $c_{GS,i}^t$ 为时段 t 内微网与主网或用户的交易电价 ($i=1$ 表示微网与主网的交易电价, $i=2$ 表示微网与用户的交易电价); $p_{GS,i}^t$

为时段 t 内微网与主网或用户的交易电量 ($i=1$ 表示微网与主网的交易电量, $i=2$ 表示微网与用户的交易电量), 其值为负表示微网向主网或本地用户购买电量, 其值为正表示微网向主网或本地用户出售电量; N, M 分别为分布式电源、储能设备的数量; α_e 为折旧成本; $c_{o,n}, c_{eo,m}$ 分别为分布式电源 n 、储能设备 m 发出单位功率的运维费用; x_m^t 为储能设备 m 在时段 t 内的循环次数; $p_{DG,n}^t, p_{es,m}^t$ 分别为分布式电源 n 在时段 t 发出的功率、储能设备 m 在时段 t 的充放电功率; K_1 、

的交易电量的修正值、储能设备 m 充放电功率的修正值、分布式电源 n 发出功率的修正值、微网的实际收益; Δp_{GS} 为微网向主网或用户交易电量的增量; ΔZ 为微网收益的偏差值。

3 实时 MPC 算法

本文针对微网交易市场实时运行状态,提出基于实时 MPC 算法的调度方法,实时调度结合超短期的负荷预测,保证了微网市场的稳定经济运行,实时 MPC 预测控制流程图如图 6 所示。实时 MPC 算法具有鲁棒性强、对模型的精确性要求不高等优点,使其在工业中得到了广泛的应用。

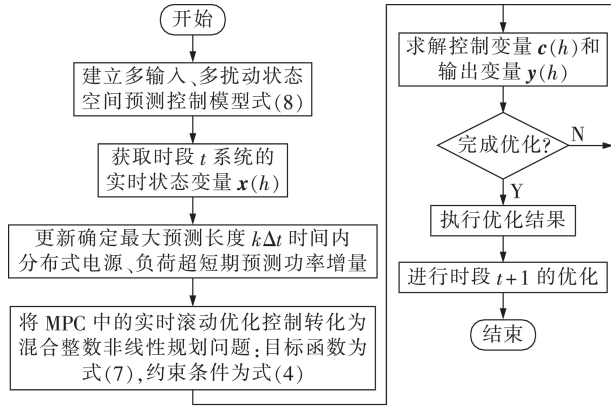


图 6 实时 MPC 预测控制流程图

Fig.6 Flowchart of real time prediction control based on MPC

为了使得微网在稳定安全、经济、能源利用率高的要求下进行实时调度,需要 BCIM 经过区域全局协调优化分析以给定的联络线功率 P_L 为参考值进行跟踪,在预测时间内使预测输出与给定的参考值间的偏差最小,则最优准则式为:

$$\min G(h) = (Y(h) - Y'(h))^2 + \rho \Delta u^2(h) \quad (7)$$

其中, $Y(h)$ 、 $Y'(h)$ 分别为预测输出序列、期望输出序列; ρ 为加权控制系数,取常数; $\Delta u(h)$ 为控制变量向量。

根据微网的功率平衡方程和储能设备的荷电状态方程,选取 p_{DG} 、 p_{GS} 、 p_{es} 、 S_{es} 构成状态变量 $x(h)$,以 Δp_{GS} 、 Δp_{es} 、 Δp_{DG} 构成控制变量 $c(h)$,以分布式电源、负荷超短期预测功率增量 Δp_{DGst} 、 Δp_{GSst} 构成扰动输入 $d(h)$,以 P_L 构成输出变量 $y(h)$,建立多扰动、多输出的状态模型为:

$$\begin{cases} x(h + \Delta t) = H_1 x(h) + H_2 c(h) + H_3 d(h) \\ y(h) = [P_L(h)]^T \end{cases} \quad (8)$$

其中, H_1 、 H_2 、 H_3 为系数矩阵,具体见附录 B。

4 算例分析

在改进的 IEEE 33 节点网架中接入分布式电源、储能、无功补偿等装置进行微网市场实时调度的有效性验证,其系统拓扑结构见图 7,各设备的具体参数见附录 C 中表 C1—C3。实验表明,目前读写并发的每秒交易数 TPS (Transactions Per Second) 为 1000 次及以上,该交易速度可以满足微网规模电力网络的效率要求, MPC 单次优化时间见附录 C 中表 C4,优化时间交易周期设为 15 min。取 06:00—08:00 时段中任意交易周期进行微网负荷功率预测。

图 8 对比了一个交易周期内的实际负荷功率、BCIM 短期负荷预测功率、BCIM 与实时 MPC 两者相结合的负荷预测功率。由图可以看出, BCIM 与实时 MPC 两者相结合预测得到的负荷功率与实际负荷功率间的偏差较小。经计算, BCIM 短期负荷预测功率与实际负荷功率之间的偏差率范围为 9%~15%, BCIM 与实时 MPC 两者相结合预测得到的负荷功率偏差率范围为 3%~5%, 结合算法在很大程度上提高了负荷功率预测的准确率。

为了更好地验证微网市场实时调度优化结果,分别选取 08:00—09:00、11:00—12:00、13:00—14:00、15:00—16:00 这 4 个时段进行对比分析。微网中装置成本、年限等参数见附录 C 中表 C1。

不同时段内各增量变化对比如图 9 所示。由

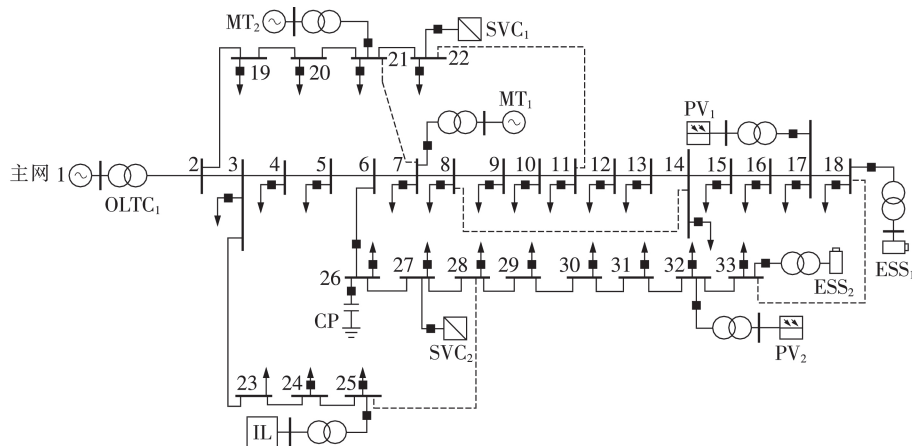


图 7 含分布式电源接入的 IEEE 33 节点系统结构图

Fig.7 Structure diagram of IEEE 33-bus system with distributed generation

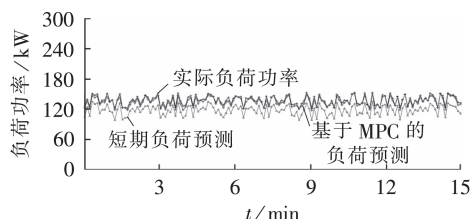


图8 负荷功率对比

Fig.8 Comparison of load power

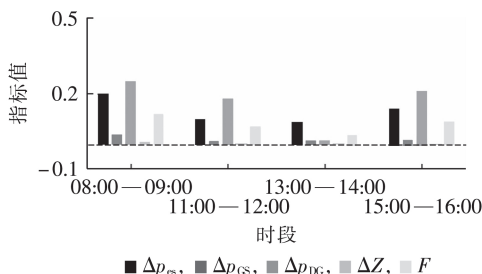


图9 不同时间段内各增量变化对比图

Fig.9 Comparison diagram of incremental changes in different time periods

图可知,在08:00—09:00时段中,由于光照强度不大,增量 Δp_{DC} 的变化主要依靠燃气轮机出力调节;在11:00—12:00、13:00—14:00时段内,光照变强并且趋于稳定,增量 Δp_{DC} 的变化主要依靠光伏出力调节,因为光照强度及用户用电规律逐渐趋于稳定,各增量变化值与目标指标值均呈现下降趋势;在15:00—16:00时段内,光照强度减弱,燃气轮机出力调节增强,各增量变化值及目标指标值有所增长。虽然燃气轮机的发电成本低于光伏发电成本,但考虑到污染气体排放的惩罚费用、光伏发电补贴以及能源利用率的提高,应更多地鼓励光伏发电。

表1对比了BCIM统一调度与实时调度2种不同调度方式下的指标值。由表可以看出,经过实时调度优化后,微网收益在08:00—09:00、11:00—12:00、13:00—14:00、15:00—16:00时段分别提高了2.74%、3.6%、3.76%、3.01%,新能源利用率分别提高了2.6%、2.9%、3.17%、2.8%。在仿真分析中发现,微网并网节点的电压有所提高,线路损耗也有不同程度的降低,结果见附录C中表C5。

表1 微网指标值对比

Table 1 Comparison of microgrid index values

时段	经济效益/元		新能源利用率/%	
	BCIM 统一调度	实时调度	BCIM 统一调度	实时调度
08:00—09:00	3753.7	3859.4	85.6	88.2
11:00—12:00	4169.4	4325.1	88.4	91.3
13:00—14:00	4342.9	4512.6	89.2	92.4
15:00—16:00	3999.4	4123.5	87.7	90.5

综上所述,在智能交易云平台协调优化的基础上,对分布式电源出力、储能充放电功率进行实时修

正,增加了微网经济收益,提高了微网新能源利用率。

5 结论

本文研究了区块链支持下的微网电力市场运行模型,在区块链支持下微网供需生态关系的基础上设计了微网市场总体框架,对微网框架内电力交易的具体流程进行介绍,并将电力交易区块链化与智能合约相结合,保证电力交易的安全性、实时性。通过对实时交易调度模型进行优化,提高了微网能源利用率,并增加了微网经济收益。希望本文工作能为区块链在微网中的进一步应用提供有价值的参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 袁博,邵华,贺春光,等. 智能配电系统规划关键问题与研究展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):65-73.
YUAN Bo, SHAO Hua, HE Chunguang, et al. Key issues and research prospects of smart distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 65-73.
- [2] 曾鸣,杨雍琦,向红伟,等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):102-111.
ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111.
- [3] 周晓倩,余志文,艾芊,等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):26-33.
ZHOU Xiaolian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 26-33.
- [4] 陈洁. 考虑三相不平衡潮流的微网分相优化调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):184-193.
CHEN Jie. Optimal single-phase scheduling for microgrid considering unbalanced three-phase power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 184-193.
- [5] 林凯骏,吴俊勇,郝亮亮,等. 基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):25-32.
LIN Kaijun, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Optimization of operation strategy for micro-energy grid with CCHP systems based on non-cooperative game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 25-32.
- [6] 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,2016,52(7):75-81.
LIU Yanbo, QIU Xiaoyan, QIU Gao, et al. Multi-agent game model of micro-grid containing energy storage system in islanding operation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 75-81.
- [7] KISHIGAMI J, FUJIMURA S, WATANABE H, et al. The blockchain-based digital content distribution system[C]//2015 IEEE Fifth International Conference on Big Data and Cloud Computing. Dalian, China; IEEE, 2015: 187-190.
- [8] WATANABE H, FUJIMURA S, NAKADAIRA A, et al. Blockchain contract: a complete consensus using blockchain[C]//2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Osaka, Japan; IEEE, 2015: 577-578.
- [9] 谭磊,陈刚. 区块链[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2015:25-28.

- [10] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):191-203.
MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 191-203.
- [11] 张健. 区块链:定义未来金融与经济新格局[M]. 北京:机械工业出版社,2016:41-45.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 马莉,范孟华,郭磊,等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):1-9.
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9.
- [18] 周明,严宇,丁琪,等. 国外典型电力市场交易结算机制及对中国的启示[J]. 电力系统自动化,2017,41(20):1-8,150.
ZHOU Ming, YAN Yu, DING Qi, et al. Transaction and settlement mechanism for foreign representative power markets and its enlightenment for Chinese power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 1-8, 150.
- [19] 邹均,张海宁,唐屹,等. 区块链技术指南[M]. 北京:机械工业出版社,2016:157-169.
- [20] 王惠洲,于艾清. 基于联盟区块链技术的V2V电力交易研究[J]. 现代电力,2019,36(3):34-41.
WANG Huizhou, YU Aiqing. Study on V2V electricity trading based on consortium blockchain technology[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(3): 34-41.
- [21] 崔金栋,王胜文,辛业春. 区块链联盟链视角下智能电网数据管理技术框架研究[J/OL]. 中国电机工程学报. (2019-03-07) [2019-05-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.181971>.
- [22] VITALIK B. A next-generation smart contract and decentralized application platform[R]. [S.l.]: ETH, 2014.
- [23] 任佳依,顾伟,王勇,等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1397-1407.
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.

作者简介:



杨明通

杨明通(1992—),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网和电力市场(E-mail: 1228970075@qq.com);

周步祥(1965—),男,江苏兴化人,教授,博士,主要研究方向为调度自动化和电网规划(E-mail: hiway_scu@126.com)。

(编辑 陆丹)

Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain

YANG Mingtong¹, ZHOU Buxiang¹, DONG Shen¹, LIN Nan², LI Zugang¹, HE Feiyu¹

(1. School of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to give full play to the vitality of microgrid electricity market and realize the optimal allocation of clean energy, the dispatch optimization of microgrid electricity market is studied with the support of blockchain. Based on the similar network topology structure between microgrid market and blockchain, the overall framework of microgrid market based on blockchain is constructed. Data information is obtained through the blockchain management platform, combined with MPC (Model Predictive Control) method, the dispatch operation of the microgrid market is optimized. Taking the IEEE 33-bus system as an example, the results verify the validity of the proposed microgrid trading model supported by blockchain. It shows that the optimal dispatch based on the blockchain management platform and MPC enhances the robustness of the microgrid market, and improves the accuracy of load power prediction and energy efficiency in the power trading process.

Key words: blockchain; microgrid; electricity market; MPC; smart contract; electricity transaction; dispatch optimization

附录A

为了保证微网市场各主体交易平等、自由、公正、合理，实现微网电力资源的统筹优化规划，搭配构建了面向微网电力交易的区块链智能云平台，并分析了各区块链可独立完成功能以及区块链之间交互功能。

(1) 微网数据存储与服务区块链（简称数据区块链）：数据区块链是微网交易云平台的存储单元，为电力交易平台提供数据支持和文件服务工程。其他区块链可以从中读取需要的信息数据，并将分析处理结果存储在数据区块链中。

(2) 智能资产管理区块链：可实现大规模分布式“无信任”资产管理。交易平台上每笔交易均在监管区块链的严格监督下，按照智能合约执行，交易达成并完成结算后，资金通过“密码”的形式，经旧所有人确认后转入新所有人余额，同时将交易信息记录在数据区块链及征信系统中。

本文应用Melon协议对该种分布式数字资产进行管理。Melon协议是基于以太坊平台的区块链协议，包含以下基础模块。

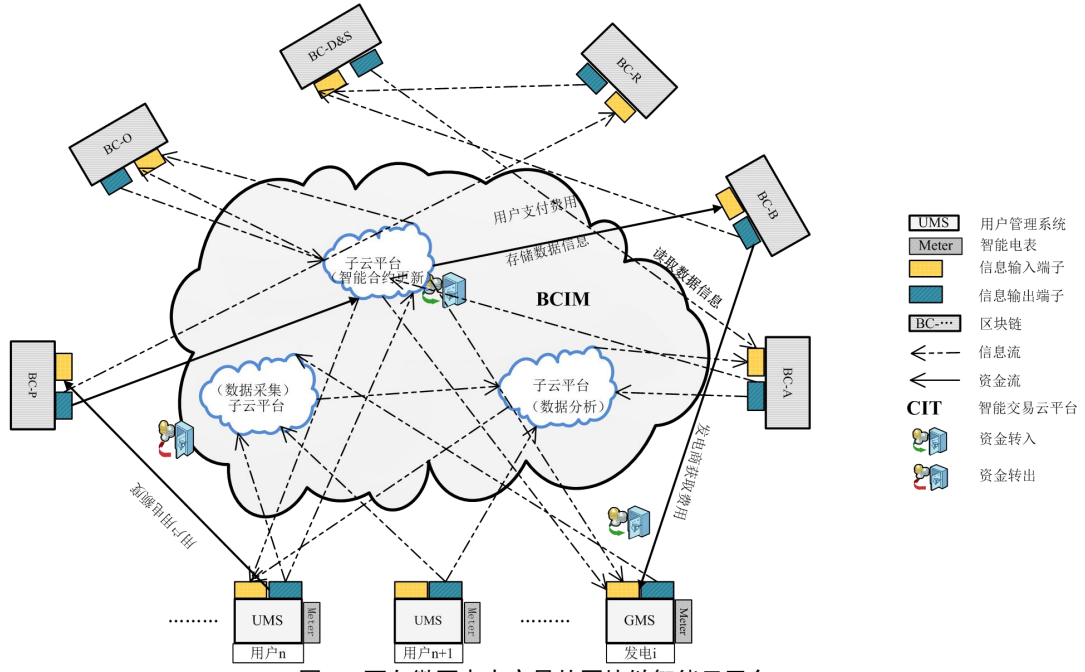
- a. 注册：为了交易，连接资产和价格流。
- b. 功能性：打造资产的特殊功能性。
- c. 价格流：为资产的价格提供一个或多个数据源。
- d. 交易所：一个或多个可进行资产交易的链上交易所。
- e. 交易：设置如何交易的一些规则。
- f. 管理费：固定支付给微网运营商的费用。
- g. 业绩费：不固定支付给微网运营商费用。

(3) 微电网系统分析区块链：主要运用分布式估计方法对微网中各节点的状态进行估计和分析，并结合负荷预测曲线和价格信号形成发用电计划，为微网系统运行、决策和调度提供依据，将运行结果存储在数据区块链中，并将微网进行区域细分，每个小区域配备1台服务器，用于将智能计量设备采集的数据写入区块链，最后通过大数据技术统一汇总分析。

(4) 智能合约执行区块链：通过程序化脚本约定执行。考虑到电力交易安全校核与区块链运行时间，设定交易周期为15 min。智能合约在经过产消者确认后，通过P2P网络广播到每一个节点，等待触发条件执行合约。在智能合约执行过程中，为了保证系统扩展性，即在合理时间内实现对大量节点的协调，选择分布式控制作为控制方式，根据分析区块链对各个节点做出的状态估计分析，状态节点进行判断并做出相应动作。

(5) 电力交易结算区块链：主要功能是实现价值转移，每当交易时间到达时，该区块链按照竞价博弈确定的电价和智能电表的电量读数，将结算费用发送到资金管理区块链，以完成本轮电力交易。如果在交易过程买卖双方有一方违约，则按照智能合约规定的规则自动执行考核，违约方应缴纳罚金，对未违约方进行补偿，并将违规行为记录在征信系统中。智能合约中的协议及交易规则等内容都以脚本的形式存储在区块链中，资金通过区块链自动结算出清。

(6) “弱中心化”监管区块链：主要对于微网市场主体的交易行为是否合规进行监管，在该区块链中设置征信系统，对用户良好与违规行为进行储存，保证电力交易有序性、合理性、公正性。



图A1 面向微网电力交易的区块链智能云平台

Fig.A1 Blockchain intelligent cloud platform oriented to power transaction of micro grid

附录B

多输入、多扰动状态空间模型为:

$$\mathbf{x}(h+\Delta t) \begin{bmatrix} p_{DG}(h+\Delta t) \\ p_{GS}(h+\Delta t) \\ p_{es}(h+\Delta t) \\ S_{es}(h+\Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{DG}(h) \\ p_{GS}(h) \\ p_{es}(h) \\ S_{es}(h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{S_{bat}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_{DG}(h) \\ \Delta p_{GS}(h) \\ \Delta p_{es}(h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_{DGst} \\ \Delta p_{GSst} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{S_{bat}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

预测输出序列为 $\mathbf{y}(h) = [P_L(h), P_L(h+\Delta t), \dots, P_L(h+k\Delta t)]^T$ 。

期望输出序列为 $\mathbf{Y}(h) = [P'_L(h), P'_L(h+\Delta t), \dots, P'_L(h+k\Delta t)]^T$ 。

附录C

表C1 各设备成本参数

Table C1 Cost parameters of each equipment

分布式电源	使用年限/a	安装成本/(万元·kW ⁻¹)	运维成本/[元·(kW·h) ⁻¹]
光伏	20	6.72	0.0102
燃气轮机	15	1.56	0.0290
储能设备	15	2.83	0.0015

表C2 各设备容量参数 Table C2 Capacity parameters of each equipment	
设备	容量/kW
PV ₁	160
PV ₂	80
MT ₁	150
MT ₂	75
ESS ₁	96
ESS ₂	96

表C3 储能装置参数 Table C3 Parameters of ESS	
参数	数值
容量/(kW·h)	96
充放电效率/%	85
初始蓄电量/(kW·h)	55
SOC	0.45

表C4 MPC的平均相对误差及单次优化时长 Table C4 Average relative error and single optimization duration of MPC		
仿真系统	平均相对误差/%	单次优化时长/s
33 节点	3.47	0.8316
65 节点	4.86	1.3740

表C5 不同调度方式下微网指标值 Table C5 Microgrid index values under different scheduling modes								
时段	经济收益/元		新能源利用率%		网络损耗/kW		并网节点电压	
	统一调度	实时调度	统一调度	实时调度	统一调度	实时调度	统一调度	实时调度
08:00—09:00	3753.7	3859.4	85.6	88.2	22.2	21.3	0.9964	0.9971
11:00—12:00	4169.4	4325.1	88.4	91.3	19.7	18.2	0.9973	0.9982
13:00—14:00	4342.9	4512.6	89.2	92.4	19.1	17.4	0.9979	0.9984
15:00—16:00	3999.4	4123.5	87.7	90.5	21.3	20.1	0.9962	0.9971

注：并网节点电压为标么值。