基于区块链技术的面向电动车充电权交易模型下的电网频率控制

（因为论文还在撰写，所以删除了频率控制部分）

摘要

传统电动车与电网之间充电交易模式存在透明度低、结算难的问题，同时，大量的电动车负荷并网也会导致电网的运行频率受到强烈扰动。针对以上问题，本文设计了基于区块链技术的需求侧响应充电权交易机制并在此基础上提出了面向电动汽车负荷扰动的频率控制方法。首先构建了配电网-充电站-电动汽车三方交易区块链体系，并建立了用户充电预约机制和诚信度评价机制对充电站功率配额进行调度，同时也设计了充电桩和电动汽车之间的智能交易合约。

**关键字**：区块链、充电汽车、充电权、频率控制

**1、引言**

随着全球变暖、温室效应等环境问题的加剧，节能减排引起了人们的重视。各国陆续制定相关政策降低碳排放，2015年12月12日全世界178个缔约方共同签署了《巴黎协定》，其目标是将全球平均气温较前工业化时间上升幅度控制在2摄氏度以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5摄氏度[1]。电动汽车的使用对减少温室气体的排放有显著的作用[2]，大力扶持电动汽车产业的发展成为趋势[3]。在“碳达峰、碳中和”的双碳背景下[4]，电动汽车产量持续增长，到2030年，全球电动汽车产量预计占新车市场的三分之一[5]。

大规模电动汽车并网给电力系统的安全运行带来了诸多挑战**错误!未找到引用源。**，尤其是给电网带来了大规模的负荷增长，增加了配电网的运行控制难度[6]。设计充电机制引导电动汽车进行有序充电，是实现电动汽车充电有序调控的重要手段，也是电动汽车领域研究的重点问题之一。国内外已有众多学者展开了对电动汽车充电调度问题的研究。文献[8]采用分时电价的方式调整电动汽车的充电行为，引导用户在用电高峰时段放电，在低峰时段充电，有效达到了削峰填谷的作用。文献[9]将充电行为的随机性纳入到充电成本，以最小化长期平均成本为目标，通过动态规划求解最优调度策略。文献[10]将电动汽车的充电问题表述为一个最优控制问题，并提出了一种分布式算法来求解此问题，以实现电动汽车的充电优化调度。随着电动汽车数量的激增，充电行为的随机性和不确定性愈发严重。以上研究[8-10]中心化的协调方案，存在充电交易结算公平性、透明度低，以及用户的隐私安全问题。

区块链技术作为一种去中心化、可信任的新兴互联网技术，具有可追溯性、不可篡改性等基本特征，在能源交易领域发挥了极其重要的作用[11]。文献[12]在智能社区中的电动汽车充电问题中引入了能源区块链，该方案无需第三方介入，通过执行智能合约为电动汽车提供安全充电服务。文献[13]基于区块链技术提出了一种用于私人充电桩的能源交易策略，以促进电动汽车和私人充电桩的能源共享服务。文献[14]将区块链引入到车载能源网络(Vehicular energy network)中，以分布式账本的方式，为电动汽车和能源节点提供能源交付服务。文献[15]利用区块链网络中实现了电动汽车与充电站之间的动态电价决策协议。文献[16]提出的闪电网络(lightning network)和智能合约与能源调度机制相结合，增强了电动汽车和充电桩之间交易的安全性。以上研究[12-16]很好地解决了电能交易的信任问题和安全问题，但却忽略了电动汽车用户主体的意志，没有将用户侧的需求考虑到能源的调度中。

为解决上述问题，本文提出了基于需求侧响应的电动汽车充电交易方案。首先，本文为充电站引入了充电权的概念，充电权代表了某充电站在某时段内的充电功率配额[17]。为根据需求侧响应灵活地为各充电站下放充电权，本文设计了充电预约方案作为充电站功率配额的依据，实现了电力资源配置优化。其次，考虑到电动汽车充电行存在大量的随机和不确定因素，本文建立了用户诚信度评价机制，诚信度高的充电站的充电需求将得到优先保障，以此实现充电功率配额的合理调度。最后，本文将区块链技术引入到充点权交易过程中，利用区块链技术记录交易信息，对用户的信用度进行存证，并基于智能合约实现交易结算。

**2、基于区块链技术的需求侧响应充电权交易机制**

电动汽车的充电行为具有随机性、分散性等特点，大规模电动汽车负荷接入电网，给电网能源的调度带来了巨大挑战。配电网运营商提前预测各充电站的充电需求，并以此给各充电站下放充电裕度，是优化充电资源配置的有效途径之一。本文将区块链技术应用于充电权计划管理和市场分配，利用区块链记录交易信息，并对用户的信用值进行存证，在此基础上，建立了一种基于需求侧响应的电动汽车充电权交易机制。基于区块链的充电权交易框架如图1所示。



图1：基于区块链的充电权交易框架

**2.1配-售-购区块链体系**

本文首先构建了配-售-购三位一体的区块链体系，示意图如图2所示。配电环节由配电网运营商执行，售电环节由各个充电站实行，购电用户则为电动汽车持有者。因此，在区块链网络中的交易主体包括配电网运营商和充电站、以及电动汽车用户，他们分别通过智能电表接入区块链网络成为节点，各节点需要履行的事务如下：

**配电网：**作为配电方**，**分配充电功率给各个充电站，为电动汽车与充电站的电能交易提供辅助服务，对交易结束后不能平衡的电能“兜底”，监管电能交易市场是否合规，核实真实交易结果等。

**充电站：**作为售电方，为电动汽车提供充电服务，同时预测本站未来时间段的充电负荷，提前向电网上报需要的充电功率。

**电动汽车：**作为购电方，提前向充电站提出充电预约申请，上报相关信息：1.所需充电功率大小 2.充电站地点，3.充电时间段。

本文将区块链网络作为交易主体的信息交互通道，能够实现安全透明的交易，区块链的不可篡改性保证了所有交易信息真实有效，同时，区块链的去中心化特性让交易无需第三方介入，确保了交易的透明性，有利于电力市场的统一价格调控。



图2 配-售-购三方区块链体系

**2.2基于需求侧响应的充电权交易过程分析**

近年来，电动汽车的数量激增，在保证电网电压稳定的前提下，最大限度保障电动汽车用户充电需求成为当下的研究热点。电动汽车负荷接入电网的时间和状态都具有不确定性，而配电网容纳充电设施能力是有限的，尤其是在用电高峰时段，充电负荷过高，将会给电网的稳定运行带来明显的冲击。例如，在负荷高峰时段，如果充电站在某时间段所有充电桩满载，可能会超过该充电站的容量，从而给电网的安全运行带来威胁。因此，需要设计灵活的充配电策略避免从配电设备的过载。本文针对充电站充电权配置的问题，设计了考虑需求侧响应的充电权交易机制，在充电权的市场分配中，引入了用户诚信档案，将电动车用户的信用值作为配电网给充电站在某时间段内分配充电权的参考。



图3：考虑需求侧响因的电权交易

本方案根据电动汽车用户与充电站以往的交易信息记录，作为电动汽车用户诚信等级评定的依据。充电站需要提前规划不同时段的所需功率，电动汽车预约充电后若没有来，会造成电力损失。所以，如果电动车每次按照约定守信充电，就会增加信用度，反之，则就会降低信用度。配电网在下放充电裕度的时，会优先满足预约用户诚信度高的充电站功率需求。

由于所有的交易都在区块链网络中实现，交易的真实性得到了保证，因此，根据区块链中记录的历史交易订单来建立用户的充电信誉档案具有较高的可靠性。区块链上记录的历史交易信息包括：1.用户计划到达预测地点的时段.3.用户选择充电的充电站。3.用户车辆所需的电量。

在本方案下，电动汽车用户根据在应用平台上的预约信息在指定的时间段到指定的地点充上指定的电量，因此，信用度的计算方式如下：



其中，



其中代表用户在预约时间、地点、电量三个方面的满足情况，若用户的实际行为与约定符合，的值为1，若不符合，则为-1。代表预约时间、地点、电量三个方面对用户信誉度的影响权重，采用层次分析法（AHP）[19]计算。首先确定预约时间、地点、电量的重要程度，其中，时间最为重要，因为充电时间决定了什么时候分配充电裕度，其次为地点，地点决定了局部电网之间功率调度，重要程度为比较重要，最后为电量，电量决定了配电功率的大小，重要程度为稍微重要。采用层次分析法(方根法)对权重进行计算，可以得到预约电量的权重为8.096%，预约地点的权重为18.839%，预约时间的权重为73.064%。最后，可以得到某充电站的信誉总和为：



其中j代表第j个用户，一共有N个预约用户。综上，所以电力交易模型流程如下：

Step1：统计各个站点电动汽车用户预约情况.。

Step2：结合用户预约情况和历史负荷曲线，预测各个充电站的未来功率需求。

Step3：充电站向微电网上报预约用户诚信度和充电功率需求 。

Step4：微电网根据各个站点信息下放充电权，优先满足可靠度高的站点，并完成配电交易。

Step5：充电站与电动车完成点对点的充电交易。

**2.3基于智能合约的充电权交易流程**

智能合约是部署在去区块链上可以由计算机自动执行的程序，智能合约可以在没有第三方机构参与的情况下实现电动汽车可信的充电权交易，并保证交易结果的真实性和可追溯性。本文设计了电动汽车充电权交易智能合约，该合约分为市场准入阶段、充电预约阶段、充电需求上报阶段、充电权P2P交易阶段、交易结算阶段。

市场准入阶段：配电网运营商、充电站管理者和电动汽车用户首先需要在应用平台注册，系统会为注册的用户生成密钥对（公钥和私钥），为了保证交易节点的真实性，所有用户需要在市场监管机构进行备案，符合准入条件并获得相应的数字签名证书才能进入交易市场。

充电预约阶段：电动汽车用户提前提出充电请求，预约需要充电的时间、地点以及电量，经过Hash加密后生成加密字符串上报到智能合约中。为了避免无效的预约信息被打包进区块，智能合约会对站点、电量、时间信息验证是否符合规定。时效性在智能合约中借助时间戳判断，不合规的预约信息均不会被打包进区块中。

充电需求上报阶段：充电站统计未来时间段本站内的用户预约情况，并结合历史负荷曲线，预测本站所需要的充电功率。同时，智能合约在该阶段会调用信誉函数，计算充电站的信誉度总和。充电站将电量需求和用户诚信度状况上传至区块链系统，同样经过Hash加密传送给配电网运营商。配电网根据上报的信息给分配给每个充电站一定的充电额度，信誉度高的充电站将会优先得到满足。

充电权P2P交易阶段：在交易阶段，系统会对购售主体的信息进行匹配，用户对匹配结果进行签名验证，签名验证过程保证了端对端的唯一确认，确保双方对交易负责，避免产生交易纠纷。签名验证成功后，交易信息会在区块链上进行广播以达成节点间的共识，此后，智能合约将自动执行达成共识的交易。

交易结算阶段：当交易双方签订了有效订单后，智能电表根据签约的订单完成电能的传输，同时将实际交易信息上传到智能合约，智能合约自动执行充电费用的结算，并根据预先设定好的条件判断用户的充电行为是否与预约一致，根据本文提出的信用度计算方式，更新电动汽车用户个人的信用度值。最后，一定时间节点的交易信息会被打包成区块并发送给所有节点，完成数据的上链操作。



图4 基于智能合约的充电权交易流程

参考文献：

1. Agreement P. Paris agreement[C]//Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris). Retrived December. HeinOnline, 2015, 4: 2017.
2. Ercan T, Onat N C, Keya N, et al. Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 112: 103472.
3. Barkenbus J N. Prospects for electric vehicles[J]. Sustainability, 2020, 12(14): 5813.
4. 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报 (社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
5. 陈琦. 中国新能源汽车产业迈入高速成长阶段[J]. 汽车与配件, 2022.
6. Sortomme E, Hindi M M, MacPherson S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE transactions on smart grid, 2010, 2(1): 198-205.
7. Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on power systems, 2009, 25(1): 371-380.
8. Zheng Y, Luo J, Yang X, et al. Intelligent regulation on demand response for electric vehicle charging: a dynamic game method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 66105-66115.
9. Xu Y, Pan F, Tong L. Dynamic scheduling for charging electric vehicles: A priority rule[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(12): 4094-4099.
10. Gan L, Topcu U, Low S H. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(2): 940-951.
11. Yan M, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Blockchain for transacting energy and carbon allowance in networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4702-4714.
12. Su Z, Wang Y, Xu Q, et al. A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(3): 4601-4613.
13. Wang Y, Su Z, Li J, et al. Blockchain-based secure and cooperative private charging pile sharing services for vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(2): 1857-1874.
14. Wang Y, Su Z, Zhang N. BSIS: Blockchain-based secure incentive scheme for energy delivery in vehicular energy network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3620-3631.
15. Knirsch F, Unterweger A, Engel D. Privacy-preserving blockchain-based electric vehicle charging with dynamic tariff decisions[J]. Computer Science-Research and Development, 2018, 33(1): 71-79.
16. Huang X, Xu C, Wang P, et al. LNSC: A security model for electric vehicle and charging pile management based on blockchain ecosystem[J]. IEEE access, 2018, 6: 13565-13574.
17. 王浩然, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的电动汽车充电站充电权交易: 机制, 模型和方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 425-435.