

基于区块链的电能质量数据管理平台设计

查 蕾, 龚文青, 黄军浩

杭州意能电力技术有限公司, 浙江 杭州
Email: thomasyao@zju.edu.cn

收稿日期: 2021年8月21日; 录用日期: 2021年9月16日; 发布日期: 2021年9月26日

摘 要

实现电能质量的准确监测、评估和分析, 对于保障电力系统的安全运行和维护电力用户的利益起到非常关键的作用。为了实现电能质量的管理并深度挖掘数据的潜在价值, 本文提出了一种基于区块链的电能质量数据管理平台设计方案。相比于传统的平台, 该方案将区块链技术应用到电能质量数据的采集、融合、激励、维护和分析等领域, 并重点设计了电能质量数据的处理和分析流程。该方案可以有效解决电能质量数据的多源异构性和数据真实性等问题, 并实现对电能质量数据的接入、监控、并行处理和挖掘等功能。实验证明本文设计的平台在数据处理速度和监测精度等方面和现有平台相比均具有更好的性能, 有助于促进电力系统向自动化和智能化发展, 进而提高资源的利用效率。

关键词

区块链, 电能质量, 去中心化, 故障定位

A Blockchain Based Power Quality Data Management Platform

Lei Cha, Wenqing Gong, Junhao Huang

E.Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang
Email: thomasyao@zju.edu.cn

Received: Aug. 21st, 2021; accepted: Sep. 16th, 2021; published: Sep. 26th, 2021

Abstract

The realization of accurate monitoring, evaluation and analysis of power quality plays a very key role in ensuring the safe operation of power system and maintaining the interests of power users. In order to realize the management of power quality and deeply mine the potential value of its data, this paper proposes a design of power quality data management platform based on block-

chain which comprehensively integrates the blockchain technology into the fields of power quality data acquisition, fusion, incentive, maintenance and application, and focuses on the processing and analysis process of power quality data. This design can effectively solve the problems of multi-source heterogeneity and data authenticity of power quality data, and realize the functions of access, monitoring, parallel processing and mining of power quality data. The experiments demonstrate that our platform has better performance than the existing ones in terms of data processing speed and monitoring accuracy and it is useful to promote the automatic and intelligent development of power market and improve the utilization efficiency of resources.

Keywords

Blockchain, Power Quality, Decentralization, Fault Localization

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电能质量评估指的是在通过测量或仿真得到的电力系统运行参数基础上,对电能质量的各项指标进行科学评估并判断其是否满足电力部门的规范要求这一分析过程,其在整个电能质量体系中占据举足轻重的位置。目前,电能质量问题开始得到越来越多人的关注,究其原因其不仅牵涉到发电部门和供电部门,而且还涉及到基数庞大的电力用户。因此,为了共同维护上述三方的利益,确保电网安全有序运行,必须强化电能质量的管理,建立完整的电能质量检测、评估与分析体系,关系到电网和用电的安全问题。

与此同时,随着电力市场的发展和电网信息化水平的日益提高,比如新型售电公司和新能源汽车等新生事物陆续接入电网,电能质量数据的价值愈发重要。并且,越来越多精密电力设备的运行必须依赖于功率输出的稳定性,因而对电能进行按质定价也已成为一大趋势。不过,迄今为止的研究基本上针对电能质量数据的检测,评估和分析等各个独立领域,而在宏观层面基于电能质量数据管理的顶层设计和平台设计相关的研究工作还很少开展。除此之外,现有的电能质量数据管理平台对于多源异构的数据处理以及数据的可靠性等方面均存在明显不足,尤其是对于已存储的大规模电能质量数据的后期价值利用和挖掘方面的工作还做得不够[1][2],而这对于当今电力行业发展而言愈发成为刚需,具有重要的意义。

2. 国内外研究现状

目前,电能质量分析的研究主要分为以下几个方向:1)电能质量扰动定位。短路故障是造成电压暂降的主要原因,其源头的定位对划清责任和解决纠纷十分重要,而通过对电能质量的监测有助于定位该类型故障[3][4];2)电能质量扰动数据的关联性分析。随着电能质量数据的规模越来越庞大,如何利用大数据分析技术获取数据间的关联信息,进而达到优化决策的目标成为了核心议题[5][6];3)利用电能质量扰动数据建立动态负荷模型。该模型有助于推进电力系统中暂态稳定、静态稳定、电压稳定等领域的研究[7][8];4)电压暂降综合评估。电压暂降会影响精密设备的工作,容易造成设备的故障乃至损坏。因此,基于电压暂降的综合影响评估也得到了大量关注[9][10]。

区块链作为一个分布式数据库,存储于其中的数据具有不可篡改、可追溯和公开透明等特征,并在金融,数字版权,物流和保险等领域得到了快速的推广[11]。如今,区块链技术已经开始在金融,物流,公共服务,数字版权和保险等诸多领域开始得到广泛应用。其中,区块链在电力行业的应用已快速延伸

至结算、支付、微电网和能源交易等多个领域[12]。虽然目前我国该领域的研究起步较晚,不过迄今为止也有了一些不错的进展:杨德昌等人阐述了能源互联网领域区块链技术的应用,并针对其在电力行业的发展提出了设想[13];丁伟等人针对能源互联网中区块链应用所存在的信息安全问题进行了深入分析并提出了相应的解决方案[14];梅文明等人就电力行业中区块链技术的应用场景进行了深入探讨[15];张震宇等人提出了一种基于区块链的电力资源管理方案,有助于降低能耗和交易成本的同时确保信息安全[16];张宇帆等人则从数据驱动的角度分析了电能质量分析现状机器关键的制程技术[17]。

不难发现,电能质量数据的存储和处理方式和区块链技术类似具有去中心化的特点,而电能质量数据在进行电力交易时如果采用了区块链则无需第三方信用机构参与且具备高安全性、不可篡改和可追溯等优点。将区块链和电能质量数据管理有机结合,有助于促进电力市场的发展,提高资源的利用效率。

3. 可行性分析

3.1. 电能质量的问题

随着电力系统的快速发展,电网中电流和电压的波形畸变因为调速电机和无功功率补偿器的大量出现而逐步加重,导致谐波快速上升,进而引发了各种类型的电能质量问题,而电能质量则体现了电力系统的可靠性。伴随着精密电力设备的使用,社会对于高电能质量的需求日益增加,而电能质量数据的评估和分析对于提高资源利用率、降低能耗、减少设备出错率以及推进整个行业的进步都具有重大意义。

3.2. 电能质量与区块链的兼容性

海量电能质量数据造成了存储和查询等方面的困难。同时,电能质量数据的价值通常体现在数据之间的时空关联性中。比如,在时域上,由电压下降而引发的电压中断和重合闸不成功,进而引发电压再次中断;在空域上,电压下降会在不同联结类别绕组中进行传播。电能质量数据的时空关联性使得电能质量的扰动往往如蝴蝶效应一般从影响某个点最终逐步演变成影响整个过程。

针对这一问题,电能质量数据的管理如果应用了区块链则可具有如下优势:首先,使数据可以被实时地记录、查询和分析,以使用户随时掌握电能质量在空间域和时间域上的变化;其次,保证数据的真实可靠和保密性,提供可信的业务环境;第三,改进业务流程,解决电网转型升级中多主体协同和数据交换等问题,进而提高效率。此外,借助大数据分析技术还可以挖掘出电能质量数据的潜在价值,进而对电力系统乃至行业的发展起到深层次的推动作用。

4. 电能质量数据管理平台

4.1. 平台设计框架

本文通过分析传统电能质量的系统架构,设计了一个基于区块链的电能质量数据管理平台。该平台总体上分成采集层、网络层、共识层、激励层、合约层和应用层上述六层,其中的各层均采用了区块链的技术进行深度改造,如图1所示。可以看到,采集层主要用于电能数据的采集。网络层包含了数据认证协议,用于实现点对点式数据传输,每个节点不仅可以用于区块认证,还能进行网络路由规划。共识层中包含了多种不同类型的区块链共识算法,有助于消除电能质量数据的多源异构性,使得数据交易以统一的格式进行,进而提高交易效率。激励层为平台提供算力并保证其稳定运行,并提高用户的积极性。合约层内包含了智能合约,脚本代码和多种算法机制等,具有分布式存储、自动运行以及不可伪造等特性。应用层则聚焦于不同的应用情景,用于实现数据的交互处理。该层致力于存储的大规模电能质量数据的潜在价值挖掘出来,并对未来智能电网的发展将起到重要影响。为此,本文还将在后面的篇幅中围绕该层的设计进行详细展开。

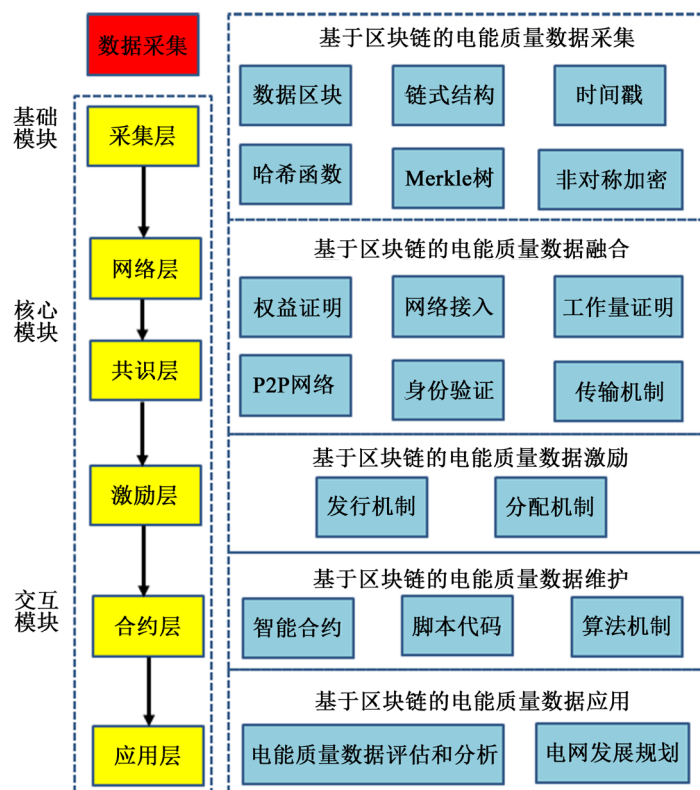


Figure 1. Blockchain based power quality data management platform
图 1. 基于区块链的电能质量数据管理平台框架

4.2. 平台运行机制

由于不同数据源的电能质量数据格式和类型较为多样化以及重复性数据采集等问题的存在, 显著增加了数据分析和评估的难度, 因此需要对采集的电能数据进行预处理。由于电能质量的指标通常根据用户的需求而变化, 因而通过事先设定的不同类别标签进行预处理, 就能实现对不同的用户展示对应的信息, 进而实现管理平台与用户的信息交互。数据采集后, 根据哈希函数、Merkle 根和非对称加密等区块链技术对电能质量数据进行特征提取和预处理, 在转化成定长数字序列后, 电力系统相关的代码会加载到带有时间戳的区块内并形成新的区块节点。

电能质量管理平台采用结合多种共识算法的方案, 本文的共识层中同时包含了基于工作量证明机制 (Proof of Work, PoW) 与股权证明机制 (Proof of Stake, PoS) 两种不同的共识机制, 通过上述两种机制的优势互补具有更好的性能。该机制的大致运作过程如下: 首先, 矿工计算新的区块头并对其进行广播; 其次, 全体矿工对该区块和上一个区块的哈希值以及固定后缀进行连接和验证以生成权益代表, 而全体矿工则根据自己是否为权益代表来决定对该区块头实行签名和广播; 最后, 该区块通过基于全体矿工的合法性验证后, 将该区块连接到区块链的尾部。该机制具有低能耗和高安全性的优点, 使得整个区块链结构不受非法数据攻击的影响。

4.3. 平台数据处理

图 2 给出了电能质量数据的处理步骤。其中, PMU 和 AMI 分别为电源管理单元和智能表计基础设施。首先, 将来自电网、电源和负荷的相关电能质量数据分别进行采集并输入到区块链电网数据缓存节点, 并通过 MAC (Medium Access Control, 介质访问) 地址分类对上述电能质量数据进行预处理; 其次,

利用非对称密码技术对电能质量数据进行解密，并利用智能合约对其进行真实性验证；最后，通过数据标准化处理模型对电能质量数据进行实时监控，用户能够及时发现异常的数据记录和存储等问题，从而实时地评估和分析电能质量。此外，上述一直保存在区块节点中的数据可被循环使用。

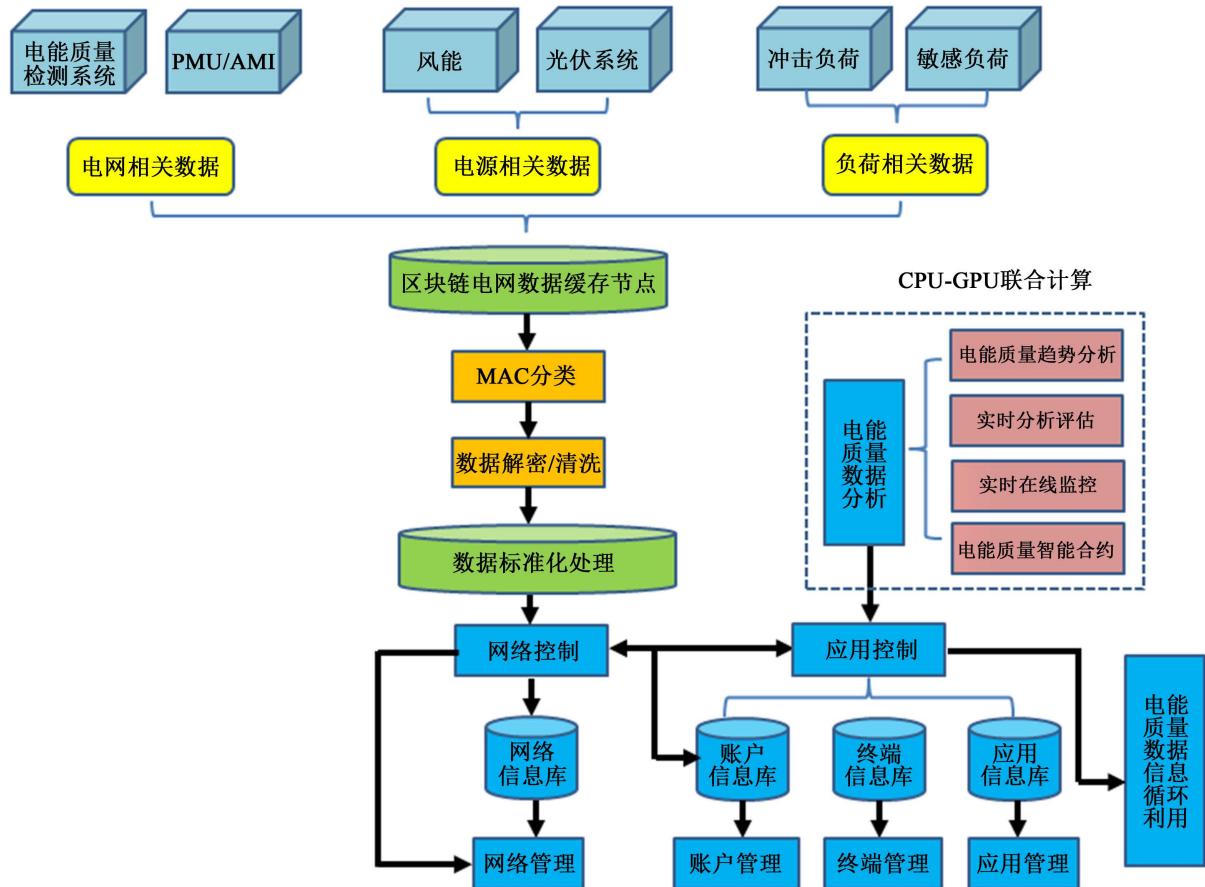


Figure 2. The process of power quality data
图 2. 电能质量数据的处理流程

在此基础上，平台上嵌入的人工智能和大数据分析模块被用来挖掘电能质量数据的深层次价值，比如基于电池储能系统的实时运行状态诊断与分析以及基于用户画像的电能质量监测等，进而将上述预测分析结果应用到对电力系统的优化中。此外，电能质量数据处理中常用串行化的信号处理技术，但是各个计算步骤中均具有并行化和向量化特性。为此，本平台提出了采用基于 CPU-GPU 的联合计算模式，有助于加速电能质量的数据处理进程。其中，CPU 用于实现不同计算步骤之间的数据传输，而 GPU 则完成每个计算步骤中适用于并行化和向量化计算的环节，进而显著提升大规模计算的速度。

以本平台中采用的故障定位为例，通过监测确定故障线路以及故障所在的位置，并对故障的类别以及线路运行的状态进行识别。通过采集的电能数据可以计算得到零序阻抗，正阻抗和复阻抗的同时得到故障发生之前监测点的电压。那么，可以利用节点阻抗矩阵 $U = ZI$ [18] 来计算不同故障类型下的节点电压：

$$U_{ki}^1 = U_{ki}^1 - Z_{ki,p}^1 I_p^1; U_{ki}^2 = -Z_{ki,p}^2 I_p^2; U_{ki}^0 = -Z_{ki,p}^0 I_p^0 \quad (1)$$

在式(1)中，上标1、2和3分别代表正序，负序和零序， I_p 和 U_{ki} 分别表示故障电流和故障发生前监测点*i*

的电压, 其中 I_p 与故障电阻 Z 和故障距离 p 相关, 而 $Z_{ki,p}$ 表示故障点 p 和监测点 i 之间的互阻抗。

在进行故障定位时, 电能状态估计模型可以通过如下的最小二乘法进行表示:

$$\begin{aligned} \min J(p, z_p) &= (U - U(p, z_p))^T (U_m - U(p, z_p)) \\ U_k &= [U_{k1,a}, U_{k1,b}, U_{k1,c}, \dots, U_{kq,a}, U_{kq,b}, U_{kq,c}] \\ U(p, z_p) &= [U_{k1,a}(p, z_p), U_{k1,b}(p, z_p), \dots, U_{k1,c}(p, z_p)]^T \\ 0 &\leq p \leq 1, z_p \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

在式(2)中, $U_{k,a}$, $U_{k,b}$ 和 $U_{k,c}$ 分别为监测点的各项电压, z_p 和 p 为状态量, U_k 和 q 分别为测量数据的列向量和监测点个数, $U(p, z_p)$ 和 U_{ki} 分别表示状态量的电压估计向量和监测点 i 的测量值, 测量数据 $|U_{kq,c}|$ 的状态估计值对应于 $U_{kq,c}(p, z_p)$ 。当对式(2)进行求解时, 本平台采用了粒子群优化算法[19]来实现对位置和速度进行更新:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{l,i}^{n+1} \\ v_{zp,i}^{n+1} \end{bmatrix} &= a \begin{bmatrix} v_{l,i}^n \\ v_{zp,i}^n \end{bmatrix} + c_1 \alpha \left(\begin{bmatrix} J_i^n \\ J_i^n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_i^n \\ z_{pi}^n \end{bmatrix} \right) + c_2 \beta \left(\begin{bmatrix} J_g^n \\ J_g^n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_i^n \\ z_{pi}^n \end{bmatrix} \right) \\ \begin{bmatrix} l_i^{n+1} \\ z_{pi}^{n+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} l_i^n \\ z_{pi}^n \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} v_{p,i}^{n+1} \\ v_{zp,i}^{n+1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

在式(3)中, J_i^n 和 J_g^n 分别为在第 n 次迭代中第 i 粒子对应的目标函数的历史最优值与之前所有 i 次迭代中粒子群体目标函数的全局最优值, $[l_i^n, z_{pi}^n]$ 和 $[v_i^n, v_{zp,i}^n]$ 分别为第 n 次迭代中的第 i 个粒子以及它的速度, ω 和 r 分别表示惯性和位置更新权重, c_1 和 c_2 分别为粒子跟踪自身历史最优适应度权重和粒子跟踪全体最优适应度权重系数, α 和 β 为满足 $[0,1]$ 均匀分布的随机数。该故障定位模型具体工作过程如下: 首先, 将粒子初始化, 并根据式(1)和(2)计算适应度函数 $J(l, z_p)$; 其次, 根据式(3)将更新粒子的位置和速度, 并判断更新后粒子的位置和速度是否满足式(2)中的约束条件, 如果是则回到步骤(2), 否则返回上一步; 然后, 判断最终结果是否满足迭代终止条件, 如果是则结束迭代并输出故障定位结果, 否则返回到第二步。

5. 实验分析

本文采集了国网下属某家电力公司相关电能数据, 并在 Matlab 仿真环境中模拟了电能运行情况。为此, 本文采用文献[17]和[20]中的平台与本文设计的平台进行对比测试。为了方便表述, 将上述两个用于对比的平台分别定义为平台 A 和 B, 本文设计的平台定义为平台 C。

由于需要监测的电能质量数据的规模大小对平台的响应时间具有直接影响, 为此我们对比了不同电能数据规模情况下不同平台的运行时间, 如图 3 所示。

通过图 3 可以看到, 随着数据规模的增加, 平台的响应时间也呈现同步上升。当数据规模达到 90×10^6 条时, 平台 A 的运行时间超过了 6 秒, 而平台 B 的时间相对较少不过也超过了 1 秒。相比之下, 平台 C 则始终保持在 0.5 秒以内, 且总体更为平稳, 并没有出现明显的波动, 说明本文设计的平台具有更好的数据计算能力。

同时, 本文在实时电能质量数据的基础上计算电能的真实故障结果并用于分析不同平台的监测均方误差, 如图 4 所示。可以看到, 相比于平台 A 和 B, 平台 C 的监测数据(包括了振荡瞬变, 电压暂升, 电压暂降, 电压中断, 谐波和间谐波六个指标)与真实电能质量信息状态结果最为接近, 说明本文设计的平台能够更为准确地对电能数据中的各种故障进行监测。

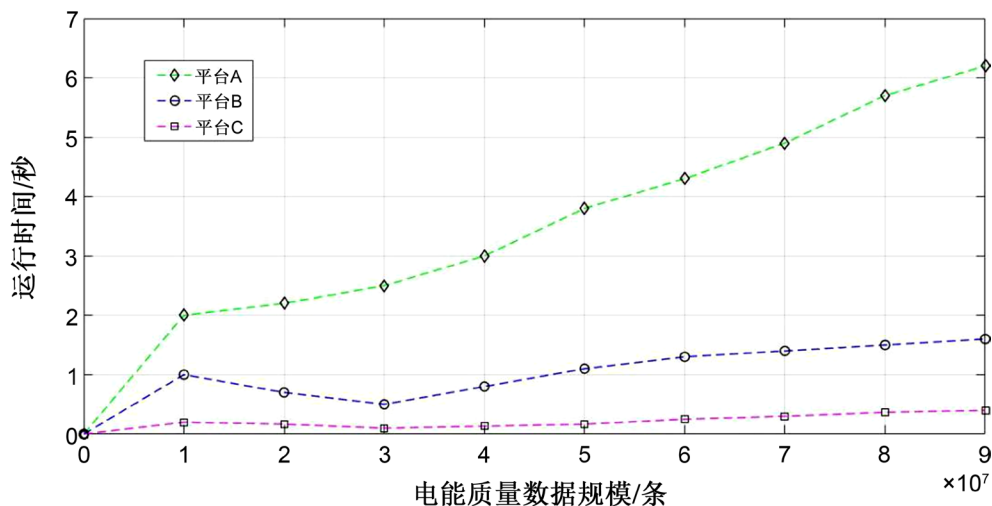


Figure 3. The comparison of running time between different platforms

图 3. 不同平台之间的运行时间对比

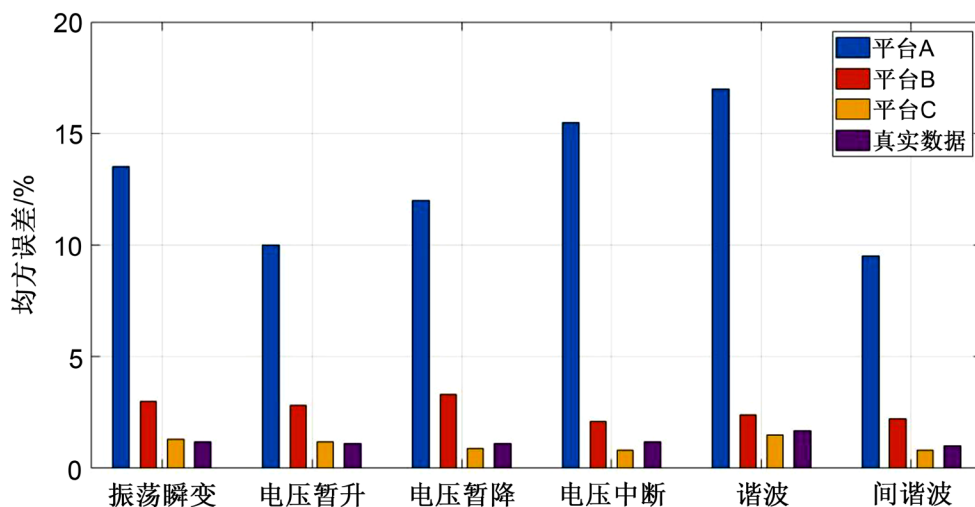


Figure 4. The comparison of mean square deviation of data monitoring between different platforms

图 4. 不同平台之间的监测均方差对比

6. 总结

本文设计了一种基于区块链技术的电能质量数据管理平台。该平台将区块链技术结合到电能质量数据的采集、融合、激励、维护和应用等各个方面，有助于解决电能数据的多源异构性和真实性等问题，实现数据在企业部门之间的顺畅流通。与此同时，本文还重点设计了电能质量数据的处理框架，利用大数据分析技术有效发掘数据的潜在价值，并通过 CPU-GPU 联合计算技术提升数据分析的效率，使得电力系统从传统的人工化全面向自动化和智能化方向发展。通过实验对比证明，本文设计的平台在数据处理速度和监测精度等方面和现有平台相比均具有更好的性能。不过，目前区块链技术在电能质量数据管理中仍处于初级应用阶段，并且还存在各种困难与挑战，因此需要进行不断的研究和创新。

参考文献

- [1] 李林辉, 杨军飞, 谈军, 等. 电能质量在线监测系统的设计与实现[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 126-131.

- [2] 薛萍, 王亚彬, 王宇, 等. 电网电能质量远程监测系统设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(1): 122-126.
- [3] 唐轶, 陈嘉, 樊新梅, 等. 基于扰动有功电流方向的电压暂降源定位方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 102-109.
- [4] 易吉良, 彭建春, 李圣清. 电容器组投切扰动源的交叉不完全 S 变换定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 30-39.
- [5] 莫文雄, 许中, 肖斐, 等. 基于随机矩阵理论的电力扰动事件时空关联[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2386-2393.
- [6] 曲广龙, 杨洪耕. 基于梯形云模型的电能质量数据关联性挖掘方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 145-150.
- [7] 尹建华, 黄东启, 艾芊. 基于电能质量装置数据和改进克隆选择算法的电力动态负荷建模[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 42-46.
- [8] 艾芊, 陈陈, 沈善德, 等. 简化前馈网络用于负荷模型参数辨识的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 21-27.
- [9] 周翔, 王丰华, 黄荣辉, 等. 考虑系统与敏感设备的变电站电压暂降综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1940-1946.
- [10] 肖先勇, 马超, 杨洪耕, 等. 用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 115-121.
- [11] Nakamoto, S. (2009) Bit Coin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. *Consulted*, 75, 1042-1048.
- [12] 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]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 836-848.
- [13] 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.
- [14] 丁伟, 王国成, 许爱东, 等. 能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1026-1034.
- [15] 梅文明, 王栋. 区块链技术在电力领域应用场景的探索分析[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(2): 21-29.
- [16] 张震宇, 陈刚, 林勇, 等. 基于区块链的电力资源管理[J]. 科技与创新, 2020(1): 1-6.
- [17] 张宇帆, 艾芊, 肖斐, 等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 187-196.
- [18] 胡文曦, 肖先勇, 金耘岭, 等. 电压暂降波形数据分析法及其在监测系统中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4193-4199.
- [19] 李伟, 丁凯, 李琼林, 等. 省级电能质量监测平台实测电压暂降特征分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 155-157+162.
- [20] 刘光辉, 朱婷婷, 张慧娥. 基于大数据技术的电能质量信息状态监测平台[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(4): 193-195.