



数字配电网边缘计算模拟实验平台

魏明江, 李鹏, 于浩, 冀浩然, 宋关羽, 习伟

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 围绕数字配电网边缘计算实验平台建设问题, 构建了数字配电网边缘计算模拟平台的三层式架构, 设计了模拟实验平台各物理环节功能以及通信环境。针对边缘计算软硬件平台核心技术问题, 围绕配电网运行控制需求提出了具体可行的模拟实验解决方案。以边缘侧就地电压控制为例, 基于实验平台各个环节构建运行场景, 验证了平台的功能可行性和有效性。

关键词: 数字配电网; 数字化; 边缘计算; 实验平台

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202310041

0 引言

随着新型配电系统灵活可控资源日益丰富, 配电系统物理层表现出柔性化特征和高度复杂的运行模式, 对系统运行控制技术水平提出了更高要求^[1-2]。数字配电网通过对电网状态的数字化、能量流的数字化和电力网络的数字化实现对配电网的全面观测、灵活控制和广泛链接^[3]。

伴随着数字配电网的发展, 海量数据的采集、传输与处理成为挑战。传统集中控制模式对于海量数据和低时延控制任务处理难以为继, 因而控制保护等核心任务逐渐向边缘侧转移, 边缘计算技术及思想得以推广, 成为“云-管-边-端”分层架构中的核心一环。边缘计算技术区别于云计算, 是靠近用户、设备和数据源, 提供近端服务的新型计算模式。

目前, 国内外围绕边缘计算在配电网中的应用已经展开了大量研究, 包括边缘侧数据处理^[4]、边缘装置管理^[5]、基于边缘计算的车联网^[6]以及基于边缘计算的运行控制技术^[7]等。电力装备企业开发了智能融合终端^[7]、配电智能网关^[8]等面向电网业务的专业产品, 提供低延时、智能化的本地服务。

本文针对数字配电网边缘计算模拟实验平台

(experiment platform of edge computing, EPEC) 开展研究, 为边缘计算相关应用开发、测试需求提供全环节的模拟实验环境。面向数字配电网当前的研究工作与未来发展方向, 分析了相关研究在实际应用中的技术挑战, 结合配电网实际提出 EPEC 平台的模拟方案。最后, 基于实际业务场景给出了实验平台的应用示例, 验证平台可行性与有效性。

1 边缘计算模拟实验平台架构与实现

数字配电网的“云-管-边-端”分层架构如图 1 所示。端侧基于传感设备就地采集信息, 并接受控制指令; 而边缘侧利用就地优势, 解决低时延、轻量化的本地任务; 云端和边缘侧保持高速可靠连接, 完成信息采集与云边交互。同时在强大算力支撑下, 云端可完成更加复杂的全局信息处理等任务, 并满足人工智能等数字化技术的集成需求。本文提出的边缘计算模拟实验平台建设方案以数字配电网分层架构为基础进行设计。

1.1 EPEC 平台架构设计

如图 1 所示, EPEC 平台物理上由“云-边-端”3 层架构构成, 分别对应数字配电网分层架构中的“云、边、端”3 层架构, 具体如下。

1) 仿真层功能。针对多设备接入的配电网进行不同时间尺度与不同运行模式下的仿真与模

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2024-01-18。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B20114)。

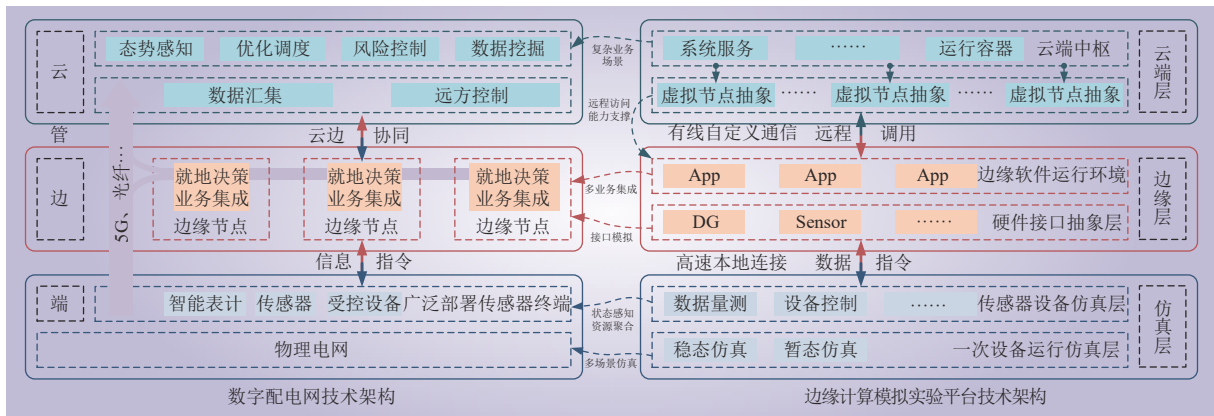


图 1 数字配电网及边缘计算模拟实验平台架构

Fig. 1 Architecture of digital distribution networks and EPEC

拟，接受来自边缘层的指令并反馈电网实时状态，如图 2 所示。端侧的仿真分为 2 部分，即面向一次侧的电力系统运行仿真和面向二次侧的传感量测等设备仿真。

EPEC 平台可基于稳态潮流仿真器和实时数字仿真器（real time digital simulator, RTDS）2 种模式构建仿真层，满足不同仿真需求。对于潮流计算稳态仿真模式，采用树莓派 4B 作为稳态潮流仿真器硬件，它支持基于 TCP/IP 的自定义数据格式传输，具有较大的自由度和较低的硬件需求。对于暂态仿真模式，支持如 RTDS 等实时仿真工具的接入。对于电力量测、通信等仿真，需要进一步考虑如变电站自动化系统标准 IEC 61850 等配电领域通信协议的接入。

2) 边缘层功能。接收、分析来自仿真层的数据，聚合仿真层可控资源，建立与仿真层的高级交互接口；提供系统服务和边缘侧应用运行环境，协调调度边缘侧各项服务或应用，对各项任务做出及时有效的响应决策；同时，反馈数据至云端并接受云端的控制指令；建立分布式算力网

络，提供“边-边”协同支持，接收其他节点的数据与协同请求。

EPEC 平台将数字配电网中边缘节点功能拆分为 2 层，即面向仿真层的硬件控制驱动以及面向业务的软件运行层，通过特定软件完成对多种场景的功能支撑。关于硬件，EPEC 边缘层包含 2 种解决方案：1) 面向完全真实环境仿真需求的边缘计算装置（如图 3 所示）；2) 通用化的嵌入式设备。

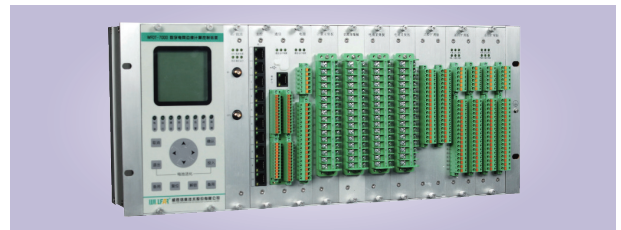


图 3 一种典型数字配电网边缘计算装置

Fig. 3 A typical edge computing device for digital distribution networks

3) 云端层功能。接收边缘层的数据和请求，获取全局运行及控制状态，建立边缘节点的虚拟模型，提供边缘侧节点远程访问控制接口；作为中心节点，协调多组边缘节点的协同运行，提供多类型计算服务；提供应用开发部署支持。

类似于实际系统中数字配电网的数据中心，EPEC 平台采用可扩展云服务器集群作为云端层硬件。云端层以应用（application, APP）形式组织全局态势感知、优化调度等业务，同时通过对虚拟节点进行类抽象，以远程调用形式灵活访问边缘节点。

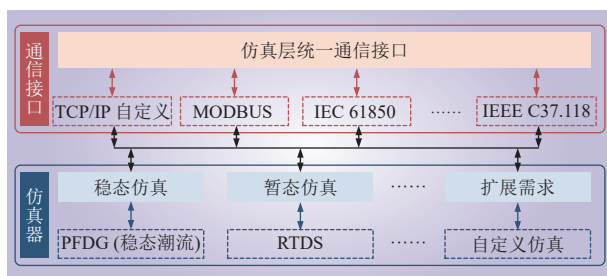


图 2 仿真层功能构成

Fig. 2 Architecture of simulation layer



1.2 EPEC 平台通信架构设计

数字配电网中的通信“管”道表现出高速可靠的特性。同时,实际系统中存在多种通信模式与网络延迟等特殊情况。实验环境中各层通信连接网络架构如图 4 所示。首先,在网络硬件连接上,基于本地局域网有线连接,实现 EPEC 边缘层各设备组网以及边缘层和仿真层高速通信渠道建立。边缘层通过有线方式接入公网,和云端建立连接。

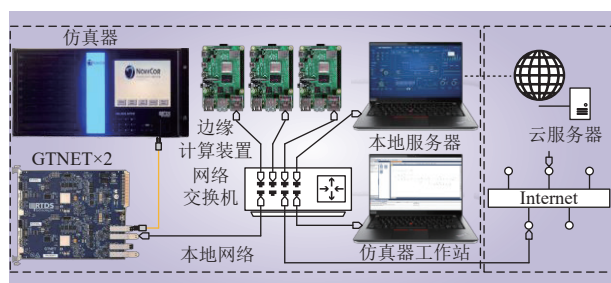


图 4 边缘计算模拟实验平台网络架构
Fig. 4 Network architecture of EPEC

其次, EPEC 平台提供消息队列传输协议 (message queuing telemetry transport, MQTT)、IEC 61850 标准协议与电力系统专用通信协议支持。同时,考虑以上协议的专业性, EPEC 平台开发了应对不同场景的通用实验性通信方案,如下所示。

1) 针对云-边场景下一对多的通信需求,基于传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 协议建立服务器/客户端 (client/server, C/S) 模式的通用数据传输模块。模块基于序列化技术,将程序运行过程中位于内存中的数据对象转化为可供网络传输的字节序列,从而实现对任意对象的传输。基于 TCP 协议的传输模式适用传输速度要求较低、可靠性要求较高的通信需求。考虑边缘装置认证需求,采用令牌验证模式构建长连接信道,构建认证通信组件。

2) 针对系统中边-边通信需求,开发点对点 (peer to peer, P2P) 的通信组件。在由多个边缘计算装置组成的边缘对等网络中,基于用户数据报文协议 (user datagram protocol, UDP) 构建点对点模式的通用数据传输模块,边-边通信组件通过地址以报文形式进行点对点的数据传输或全网广播。基于 UDP 的 P2P 模式拥有较高的传输速度,

但可靠性较低,平台通过引入消息答复机制以保证消息到达。

值得注意的是,实际配电系统通信方案涉及较多安全特性与系统分区等概念, EPEC 开发的通用通信方案不涉及通信安全与通信方案本身的研究,仅为提供通信功能的模拟。

1.3 EPEC 平台应用实验环境设计

为保证 EPEC 平台使用的通用性和灵活性,平台面向未来配电网软件系统,提出“应用化”开发部署框架,解决研究成果软件化部署的问题。

数字配电网研究涉及多个角度、海量的技术内容。在未来配电网中,“微服务”“微应用”容器化部署将成为海量研究成果应用实际系统的可能解决方案^[9]。例如,量测数据压缩^[4]、配电房安全监测等常规基础服务以及区块链服务、能源交易服务等高级服务将作为独立的 APP 进行开发部署。随着系统的不断开放升级,未来经过测试的第三方可将研究成果或服务以 APP 形式提交至云端,从而实现研发成果转化,丰富配电系统的业务生态。

边缘计算模拟实验平台软件运行环境如图 5 所示。EPEC 平台面向这一可能的发展趋势,进行了针对性适配。EPEC 平台对仿真层、边缘层、云端层制定规范化开发接口、交互接口。开发者可通过简单的接口调用系统服务或其他开发者预先定义的服务。例如,在 P2P 交易中,开发者可调用系统的分布式电源出力接口,而不必关注具体实现。其余第三方 APP 可以通过 P2P 交易 APP 的预留接口获取交易信息。同时,各 APP 间也可以通过交互接口完成一系列复杂任务配合。此

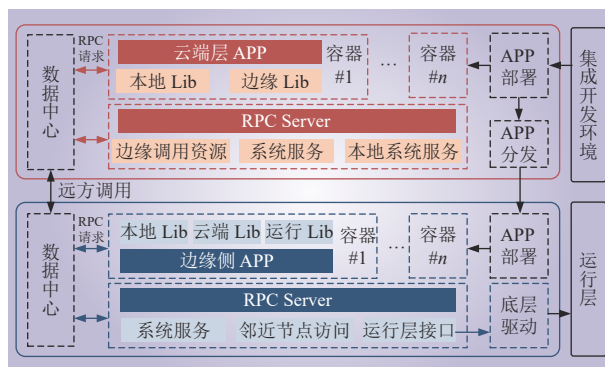


图 5 边缘计算模拟实验平台软件运行环境
Fig. 5 Applications' runtime environment of EPEC



外，通过 EPEC 平台的开发者系统，用户可将 APP 分发至系统内任一设备，并对应用的启停、状态、版本等进行控制和监测。

2 技术需求与平台能力支持

本章围绕数字配电网相关技术需求，以实际配电网环境为导向，总结相关研究应用的技术挑战并提出 EPEC 平台的解决方案。

2.1 面向端侧的分布式资源与设备集成

配电网分布式资源的相关研究依赖于分布式资源的高度可控性。实际上，数字电网的建设能够实现软件层面控制分布式资源，但其中涉及不同硬件标准和多种协议，对分布式资源实现灵活控制仍具有一定挑战性^[10-11]。为此，EPEC 平台从仿真角度提出一种“标准化”解决方案。EPEC 平台通过开放仿真层设备注册接口，提供对各种设备的自定义能力，并通过规范仿真层设备采集与控制接口，提供标准化的仿真硬件；边缘层服务对硬件接口进一步封装，并对资源进行协同调度组织，为平台中的边缘侧 APP 与云端层提供基础资源灵活调用能力。

2.2 边缘计算装置及应用技术

目前，基于边缘计算技术的应用研究以及对边缘计算装置本身的研究均涉及实际的边缘计算装置^[12-14]。在实际业务中，研究可能受到边缘计算装置的算力限制、空间限制、通信限制等多种影响。因此，相关研究有必要在实际环境中运行测试。

如前所述，EPEC 平台提供 2 种边缘计算装置硬件解决方案：1) 电力装备企业研发的实际配电网边缘计算装置，以提供完全符合真实环境的仿真需求；2) 非电力业务专用边缘计算设备。为减小对硬件的依赖，选用树莓派 4B 作为边缘计算装置模拟器，提供接近于实际环境中数字配电网边缘计算装置的性能、通信方案以及外设。但该设备并非为电力业务设计，因此对于如继电保护等实时业务的模拟与实际设备仍然有一定差距。

在软件层面，EPEC 平台对树莓派等通用边缘计算装置模拟器进行了对应技术方案的更新与替代。例如，使用 Xenomai、Preempt-rt 等内核技术构建硬实时操作系统以应对实时业务需求、使用

Docker 作为容器技术的替代以及安装与实际环境一致的 MQTT 协议作为内部通信总线。同样的，软件系统能够提供近似的应用程序接口（application programming interface, API）以及特性，但并未对电力业务进行针对性优化。

2.3 多层多主体与多业务协同

当前，多层级、多主体与多业务协同已经成为边缘计算研究的热点，即云边、边端等多层级协同、边边多主体协同、边缘侧装置内多业务协同^[15-21]。

协同类研究首先建立在系统可靠、广泛的物理通信设施上。云-边、边-边之间的协同需要高度可靠物理连接。而云边由于距离的限制，还对通信速度提出了较高的需求。实际电力业务中，通过 5G、光纤建立高速可靠的通信信道，提供可靠通信设施。

其次，多主体、多业务协同对通信协议提出了较高的需求。在实际变电站自动化系统中，由 GOOSE 服务实现多个智能电子设备（intelligent electronic device, IED）间的信息传递，从而完成多个 IED 的协同工作；同时，基于 104 规约完成变电站的运动数据传输。此外还包含 103 规约、IEC 61850 等其他电力系统通信协议，提供灵活通信需求。

面向协同类研究需求，EPEC 平台从软硬件方面提供支持。首先，在物理设施上，EPEC 平台基于局域网建立了高速的本地连接。其次，基于有线公网建立了云边层的连接。最后，在通信协议方面，EPEC 平台对 GOOSE、104 规约等协议提供支持，提供完全符合实际环境的通信协议。此外，由于变电自动化通信协议的复杂性，为降低研究者学习成本，基于 1.2 节所述，平台开发了通用通信协议，提供高度封装的层间通信 API；对标 GOOSE 服务等设备间协同通信协议，平台亦提供高级封装 API，以 MQTT 协议构建通信总线，引入事件触发机制处理各模块间的协同运行，APP 可注册事件和订阅事件，当达到某设定条件后，APP 触发事件，所有订阅该事件的 APP 将收到信号，从而采取相应的处理措施。

2.4 信息安全与隐私保护

配电网软件系统的信息安全是物理系统可靠运行的关键，相关研究已从接入认证、通信安



全、网络攻击等多个角度展开了讨论^[22-23]。在实际运行中，由数据传输带来的安全挑战成为首要问题。此外，因靠近物理电网，边缘计算装置在认证过程中受到攻击的可能性大大增加。

EPEC 平台安全体系从方法和技术角度对实际电网的安全体系进行模拟。例如，基于证书体系、公钥体系保证通信安全与认证安全；基于容器技术与总线通信保证边缘侧的数据安全与服务安全。平台采用的技术与实际业务相符，能够为认证、通信安全、区块链技术、数据与网络攻击等研究提供实验环境。此外，面向未来配电网研究，EPEC 平台引入了一些新的技术与特性，例如可基于零知识证明技术^[24]在不泄露任何数据的情况下完成认证。

3 EPEC 平台测试与应用集成示例

本章对 EPEC 平台的性能和功能进行测试，并给出应用的集成示例。测试环境为：1) 仿真层：树莓派 4B 稳态潮流仿真器；2) 边缘层：树莓派 4B，操作系统内核为 Linux；3) 云端层：用于计算任务的 8 核心 16 GB 内存云服务器、用于认证、数据监控等服务的 2 核心 2 GB 内存轻量应用服务器。

3.1 平台性能测试

本节针对常见的人工智能、数学优化 2 类应用，选择 2 种场景于本平台进行性能测试：1) 人工智能应用场景：基于深度强化学习的智能软开关电压控制应用；2) 数学优化场景：基于二阶锥优化的智能软开关电压控制应用。

1) 人工智能应用场景测试。在基于云边协同的深度强化学习智能软开关电压控制场景中，考虑边缘侧资源限制，训练过程于云端层完成，在边缘侧仅执行模型推理过程。基于模型训练与推理 2 个子场景进行测试。测试所用算例为南方电网 53 节点算例^[12]，神经网络规模与训练参数如表 1 所示，测试过程选取 1000 次训练结果进行统计，结果如表 2 所示。其中，单次训练样本数量为 16。

由表 2 可知，云端对于由 4 个深度神经网络构成的强化学习智能体，单次训练用时约为 0.1 s，能够有效支持模型的训练过程。在边缘侧

表 1 人工智能任务测试参数

Table 1 Parameters of artificial intelligence tasks

网络	参数	数值
策略网络	输入参数数量	159
	输出参数数量	5
	模型参数数量	612 613
评价网络	输入参数数量	164
	输出参数数量	1
	模型参数数量	620 929

表 2 人工智能任务测试结果

Table 2 Test results of artificial intelligence tasks

子场景	参数	用时/ms
边缘推理过程	单次推理平均时长	0.981
云端训练过程	单次训练平均时长	106.327

的算力限制情况下，通过轻量化推理引擎的支持，单次推理过程执行时间不到 1 ms，能够满足实时控制的需求。

2) 数学优化场景测试。基于二阶锥优化的智能软开关电压控制场景，测试平台边缘设备执行数学优化任务的性能。采用南方电网 53 节点算例^[12]，优化求解器为 Gurobi。以 5 分钟为间隔，进行 24 小时的优化求解测试，共计执行 288 次优化任务，统计结果如表 3 所示。

表 3 边缘侧优化任务测试结果

Table 3 Test results of optimization tasks at edge side

参数	数值
变量数量/个	331.00
线性约束数量/个	162.00
二阶锥约束数量/个	52.00
求解失败次数/次	0
单次求解平均时长/s	0.49

由表 3 可知，智能软开关电压控制场景中，对于 53 节点规模的配电网二阶锥优化模型，单次求解时长平均为 0.49 s。边缘侧硬件能够有效支持中小规模算例的数学优化问题求解。

3.2 平台功能测试

本节基于分布式电源集群协同控制场景，验证平台的仿真、通信、协同和监控等功能。采用 IEEE 33 节点算例，以分布式电源集群为控制对象，基于分布式协同算法实现区域间协同控制，

方法细节可参考文献[25]。

分布式电源集群协同控制平台运行场景如图 6 所示。仿真层与边缘层间控制流程为：仿真层电压采集器向边缘计算装置发送采集数据，数据中心收到电压数据，唤起电压控制 APP 控制模块，控制模块生成控制指令，通过数据中心下发至控制器。

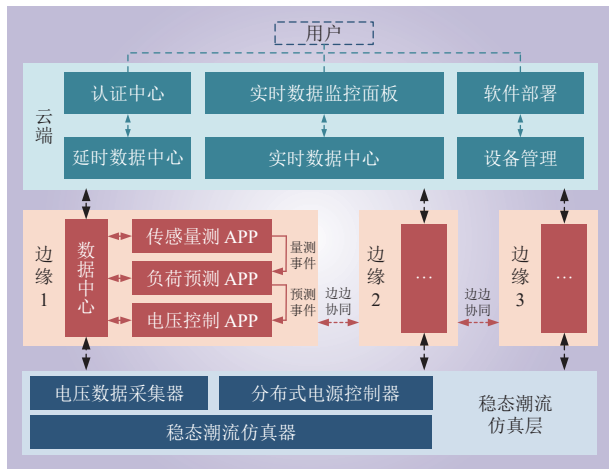


图 6 融合系统多项服务的演示场景示意

Fig. 6 Demonstration scenario schematic involved multiple services of EPEC

在边缘侧内部，APP 间通过 EPEC 平台事件触发机制自动协同运行。传感量测 APP、负荷预测 APP、电压控制 APP 依次基于事件信号自动处理对应业务。

多个边缘节点之间，通过 EPEC 平台的 P2P 通信协议建立分布式算力网络，多个边缘侧电压控制 APP 之间通过触发/响应式方案建立分布式协同框架，通过 EPEC 平台无中心节点的分布式协同算法框架完成多个节点间的控制策略协同更新。

EPEC 平台运行以上场景，通过云端监控面板可获取系统的电压极大值和极小值实时分布、各个区域的电压/负载率分布、分布式电源实时出力情况等图表信息，以及系统的分布式电源消纳率、各区域的源荷匹配率等实时指标信息。例如，不运行 APP（方案 1）和运行 APP（方案 2）的电压极值监控数据如图 7 所示。由图 7 及云端监控面板其他图表可知，运行 APP 后系统的各项指标得到了提升，电压质量有较大改善。

以上场景对平台的功能进行了测试。由运行结果可以看出，EPEC 平台各项功能能够正确运

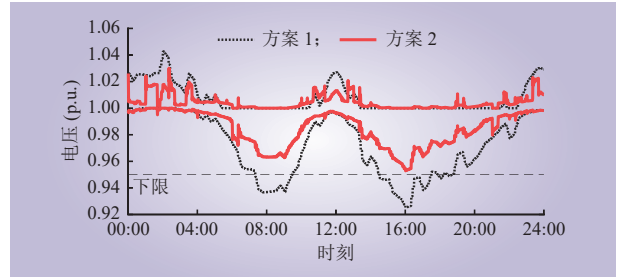


图 7 电压极值监控数据

Fig. 7 Monitoring data of maximum and minimum voltages

行。从运行过程可以看出，平台能够为 APP 运行提供部署、运行环境，提供通信支持，并提供 APP 间协同运行机制、数据监控分析等服务。同时，在以上场景中，实现了电压控制应用部署自动化、远程管理自动化、系统整体状态可视化。系统各个服务之间、APP 之间通过平台的机制实现了有序、自动的协同运行，具备高度的灵活性。

4 结论

本文围绕边缘计算模拟实验平台开展研究，为边缘计算相关理论研究与应用研发提供测试环境。首先，设计了边缘计算模拟实验平台系统架构及通信架构；其次，总结了边缘计算相关研究方向与技术挑战，从实际业务场景出发提出了平台模拟方案；最后，构建了实验装置并给出了应用示例，对平台进行了测试和验证。

参考文献：

- [1] 马喜平, 李亚昕, 梁琛, 等. 考虑高比例多元调节资源互动的配电网无功优化降损方法 [J]. 中国电力, 2024, 57(1): 123–132.
MA Xiping, LI Yaxin, LIANG Chen, *et al.* Reactive power optimization for loss reduction of distribution network considering interactions of high penetration level of multiple regulating energy resources[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 123–132.
- [2] 李鹏, 向伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002–5017.
LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, *et al.* Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002–5017.
- [3] 刘墨, 孙庆凯, 许泽凯, 等. 能源互联网中的数字孪生技术体系、应



- 用与挑战[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 230–243.
- LIU Zhao, SUN Qingkai, XU Zekai, *et al.* System, applications and challenges of digital twin technology in energy Internet[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 230–243.
- [4] 习伟, 李鹏, 李鹏, 等. 面向配电网边缘计算装置的两阶段 PMU 数据压缩方法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3184–3193.
- XI Wei, LI Peng, LI Peng, *et al.* Two-stage PMU data compression for edge computing devices of distribution networks[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3184–3193.
- [5] 张大波, 李雪婷, 陶维青. 基于边缘计算和深度学习的有限信息配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 22–32.
- ZHANG Dabo, LI Xueting, TAO Weiqing. Single-phase ground fault section location in distribution networks with limited information based on edge computing and deep learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 22–32.
- [6] 王鹤, 王钰淇, 韩皓, 等. 使用蒙特卡罗逐时估算模型的住宅配电网光伏准入容量研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 9–19.
- WANG He, WANG Zhengqi, HAN Hao, *et al.* Research on photovoltaic hosting capacity of residential distribution network based on Monte Carlo hourly estimation framework[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 9–19.
- [7] 程杉, 傅桐, 李洋洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1–12.
- CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, *et al.* Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1–12.
- [8] 李翠萍, 朱文超, 李军徽, 等. 分布式电源接入中压配电网的运行方案研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(4): 57–64.
- LI Cuiping, ZHU Wenchao, LI Junhui, *et al.* Research on the operation scheme of distributed generation access to medium voltage distribution network[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(4): 57–64.
- [9] 李帅, 徐迪, 文祥宇, 等. 面向配电网多业务资源智能调度的边缘容器迁移优化方法[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 120–126.
- LI Shuai, XU Di, WEN Xiangyu, *et al.* An edge container migration optimization method for multi-service intelligent resource scheduling of distribution networks[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 120–126.
- [10] 黄南天, 郭玉, 赵喧远. 计及辐照区间划分的含光伏电源配电网-荷联合场景生成[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(5): 78–84.
- HUANG Nantian, GUO Yu, ZHAO Xuanyuan. Combined source-load scenario generation for PV-containing distribution networks with calculation and irradiation interval classification[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(5): 78–84.
- [11] 丁琦欣, 覃洪培, 万灿, 等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6): 28–38.
- DING Qixin, QIN Hongpei, WAN Can, *et al.* Chance-constrained optimization-based distributed photovoltaic hosting capacity assessment of distribution networks[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(6): 28–38.
- [12] 习伟, 李鹏, 李鹏, 等. 基于深度强化学习的分布式电源就地自适应电压控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 25–31.
- XI Wei, LI Peng, LI Peng, *et al.* Adaptive local voltage control method for distributed generator based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 25–31.
- [13] 崔炳荣, 李德建, 刘亮, 等. 面向分布式光伏状态实时感知的边缘缓存与计算策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 67–74.
- CUI Bingrong, LI Dejian, LIU Liang, *et al.* Edge caching and computing strategy for distributed photovoltaic real-time sensing[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 67–74.
- [14] 杜觉晓, 赵留学, 莽修伟, 等. 基于边缘端目标识别与跟踪算法的输电线路航拍视频流诊断技术研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 106–113.
- DU Juexiao, ZHAO Liuxue, MANG Xiuwei, *et al.* Aerial video stream diagnosis technology for transmission lines based on edge target recognition and tracking algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 106–113.
- [15] 毋炳鑫, 黄利军, 王坤, 等. 边缘物联终端在智能化开关柜中的应用[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 38–45.
- WU Bingxin, HUANG Lijun, WANG Kun, *et al.* Application of edge IoT terminal in intelligent switchgear[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 38–45.
- [16] 肖白, 朱珈汛, 刘鑫, 等. 基于 CRITIC 法和非合作博弈的电动汽车充电站双层规划[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(4): 35–49.
- XIAO Bai, ZHU Jiaxun, LIU Xin, *et al.* Bi-level planning of electric vehicle charging stations based on CRITIC method and non-cooperative game[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(4): 35–49.
- [17] 黄四亮, 孟湛博, 邢晓敏, 等. 考虑灾前预防和灾时响应状态下的弹性配电网提升策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(4): 82–89.
- HUANG Siliang, MENG Zhanbo, XING Xiaomin, *et al.* Consider the



- research on the improvement strategy of resilient distribution network under pre-disaster prevention and disaster response[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(4): 82–89.
- [18] 刘金, 李更丰, 孙思源, 等. 暴雨灾害下配电网预警与风险评估技术研究综述 [J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6): 1–7.
- LIU Jin, LI Gengfeng, SUN Siyuan, *et al.* A review of early warning and risk assessment technologies for distribution networks under rainstorm disasters[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(6): 1–7.
- [19] 张颖, 寇凌峰, 季宇, 等. 计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制 [J]. 中国电力, 2021, 54(2): 104–112.
- ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, *et al.* Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 104–112.
- [20] 陆旭, 陈影, 许中平, 等. 面向 5G 边缘计算网络的联合需求响应与任务卸载策略 [J]. 中国电力, 2022, 55(10): 209–218.
- LU Xu, CHEN Ying, XU Zhongping, *et al.* Joint demand response and task offloading strategy for 5G edge computing network[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 209–218.
- [21] 黄国威, 彭元泉, 范心明, 等. 含多端柔性多状态开关的有源配电网多阶段供电恢复方法 [J]. 广东电力, 2020, 33(12): 73–80.
- HUANG Guowei, PENG Yuanquan, FAN Xinming, *et al.* Multi-step power restoration of active distribution networks with multi-terminal soft open point integration[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 73–80.
- [22] GAI K K, WU Y L, ZHU L H, *et al.* Permissioned blockchain and edge computing empowered privacy-preserving smart grid networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7992–8004.
- [23] 张宇航, 倪明, 孙永辉, 等. 针对网络攻击的配电网信息物理系统风险量化评估 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 12–22.
- ZHANG Yuhang, NI Ming, SUN Yonghui, *et al.* Quantitative risk assessment of cyber-physical system for cyber-attacks in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 12–22.
- [24] GAO S, PENG Z, TAN F, *et al.* SymmeProof: compact zero-knowledge argument for blockchain confidential transactions[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2023, 20(3): 2289–2301.
- [25] LI P, JI J, JI H R, *et al.* MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2911–2921.

作者简介:

魏明江 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事配电网运行优化研究, E-mail: mj_w@tju.edu.cn;

李鹏 (1981—), 男, 博士, 教授, 从事智能配电系统仿真与运行控制技术研究, E-mail: lip@tju.edu.cn;

于浩 (1988—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事智能配电网运行分析与控制技术研究, E-mail: tjuyh@tju.edu.cn.

(责任编辑 杨彪)

Experiment Platform of Edge Computing for Digital Distribution Networks

WEI Mingjiang, LI Peng, YU Hao, JI Haoran, SONG Guanyu, XI Wei

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper focuses on the construction of an experimental platform for edge computing, and first builds the three-layer experimental platform architecture. Then, the functions of each physical part of the experimental platform and the communication environment are designed. Subsequently, targeting the core technical problems of software and hardware of edge computing, a specific and feasible simulation solution is proposed around the operation and control needs of distribution networks. Finally, taking edge-side local voltage control as an example, the operation scenarios are constructed based on various aspects of the experimental platform to illustrate the functional feasibility and reliability of the platform.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.U22B20114).

Keywords: digital distribution network; digitalization; edge computing; experimental platform