

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230270

基于 Edgex Foundry 的配电网无功电压云边 协同控制方法研究

孙钰茗¹, 郭成², 方正云^{3,4}

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;
3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650500; 4. 云南电网有限责任公司, 云南 昆明 650011)

摘要: 针对大量多维异构的电网数据引起的存储压力、计算延迟和云边通信问题, 提出了一种基于 Edgex Foundry 的配电网无功电压云边协同控制方法。首先, 感知配电网 10 kV 侧的电网数据, 构建了“边云”、“边边”协同控制模块与配电网无功电压信息交互模型, 基于多种通信协议建立云边数据传输通道。然后, 部署了面向配电网无功电压的云边协同控制模型, 构建了基于 Edgex Foundry 的配电网无功电压“云-边-端”集中-分布式协同控制架构, 实现云边协同架构与十五区图控制策略交互融合。最后, 基于仿真验证了云边协同控制方法可以降低计算时延, 缓解云端计算和存储压力, 实现在云边协同控制中母线与支线整体联控、异常支线局部单调两种调控模式的深度融合, 为实现配电网无功电压云边协同控制提供了技术支撑。

关键词: 边缘服务器; 云边协同; 边边协同; 无功电压控制; 协同控制

Cloud edge collaborative control of reactive power and voltage in a distribution network based on Edgex Foundry

SUN Yuming¹, GUO Cheng², FANG Zhengyun^{3,4}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650500, China;
2. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650500, China;
3. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 4. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China)

Abstract: There are problems of storage pressure, calculation delay and cloud side communication caused by a large number of multi-dimensional heterogeneous power grid data. Therefore a cloud edge collaborative control method of reactive power and voltage in a distribution network based on Edgex Foundry is proposed. First, this paper obtains the power grid data on the 10 kV side of the distribution network, builds a collaborative control module for “edge cloud” and “edge” and a reactive power and voltage information interaction model of the distribution network. It establishes a cloud edge data transmission channel based on multi protocols. Second, the cloud edge collaborative control model oriented to distribution network reactive power and voltage is deployed. The “cloud edge end” centralized distributed collaborative control architecture for distribution network reactive power and voltage based on Edgex Foundry is constructed. This implements interactive integration of cloud edge collaborative architecture and a fifteen zone map control strategy. Finally, based on simulation verification, the proposed control method can reduce computational latency, alleviate cloud computing and storage pressure, and achieve deep integration of two control modes in cloud edge collaborative control: the connection of the bus and branch line and the local monotony of the abnormal branch line. This provides technical support for realizing the cloud edge collaborative control of reactive power and voltage in distribution networks.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52065033).

Key words: edge server; cloud edge collaboration; edge edge collaboration; reactive voltage control; cooperative control

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52065033); 云南省重大科技专项计划项目资助(202002AD080001); 云南省联合基金专项资助(202201BE070001-15)

0 引言

随着新型电力系统的快速发展,大量分布式电源、储能设备、可调负荷接入配电网并网运行^[1-3],电网云中心接收的数据资源逐渐呈现多维异构特点,且大部分资源个性化强、类型复杂,传统电网很难及时、有效地存储和处理有关负荷数据且资源协同性差^[4-7],单一的云中心面对此类问题无法实现配电网无功功率就地平衡,10 kV 低压侧的用户体验度、满意度直线下降,面对用户对供电质量要求的日益增高,实现配电网无功电压的最优控制,是目前亟需解决的重要课题^[8-11]。

随着“云、物、智”等先进信息技术的迅速发展,云计算可以通过虚拟的方法,实现对大量资源地快速处理和合理配置,并在非实时、长周期数据、业务决策等方面发挥重要作用。目前利用云计算^[12-13]和边缘计算技术^[14-15]可以简单估算电网的运行状况,并对负荷、电压、无功功率等进行实时控制和管理,即部分数据处理、优化以及相关应用在终端附近的边缘层上部署,从而减少数据处理延迟,减轻云中心的资源压力^[16]。目前已有学者针对分布式网络中的边缘计算应用进行相应的研究。文献[17]提出了一种适用于电力物联网的可信边缘计算框架 SG-Edge;文献[18]提出了一种以边缘计算为基础的能源管理系统。将用户设备、分布式网关、分布式服务器等应用于计算和存储,以增强服务的实时性;文献[19]对边缘计算在配电网中的应用进行了展望,阐述了边缘计算在电网中的可行性与实用性。然而,以上所提方法虽较好地减轻边缘节点与云中心通信压力以及实现电网的广域协调,但仍未解决电力系统面临的实时性高、数据周期短、任务复杂等难题,因此,基于边缘计算的云边协同技术是今后配电网控制发展的必然趋势;文献[20]提出一种边缘物联网系统的优化框架,基于案例研究和数值结果证明了边缘物联网计算的重要性;文献[21]针对云计算体系中用户端数据不能有效利用的问题,建立了云边应用框架,并对其中的关键技术进行了分析和归纳;文献[22]基于物联网(internet of things, IoT)提出了一种云边协同技术自动控制策略,实现了与大规模个体之间的互动与协作。目前,国内外将云边协同技术应用到配电网无功电压控制中的研究相对较少,更缺乏对设备终端自主调控协同方式的相关技术研究。

本文利用云计算和边缘计算相结合的方式,提出了一种基于边缘服务器的配电网无功电压云边协同控制方法。在配电网无功电压控制的背景下,运

用信息交互、协议转换和云边协同环境部署等技术,借助边缘计算数据的就近处理,通过协同控制模型制定出变压器档位调节及投退电容器策略。一方面利用网络、存储、计算、应用等技术方法,实现了网络业务的快速发展,通过协议指令上传至云中心供进一步应用,作用于实时、短周期数据、局部决策等方面;另一方面云边协同控制方法在边缘服务器中可供终端实时调控。此方法验证了对于促进无功电压优化系统的发展,减轻云平台的计算压力,将是一个较为快捷、精确、方便、有效的途径。

1 配电网无功电压协同控制需求分析

配电网系统是一个承载着海量信息的层次化物理网络,它通过源侧、网侧、荷侧的信息交互和功能协同^[23-24],在动态分配电能的同时,还要实现配电网无功电压协同控制。而在传统的配电网系统中,源侧、网侧、荷侧的无功电压调控设备参数和运行数据都会发送给部署在网侧的云中心,依靠云中心在同一时间内接收配电网母线电压、线路功率因数、配变档位、运行日志等异构资源数据^[25],同时对异构资源数据进行存储、计算、通信,导致对配电网无功电压控制时数据协同分析和自主调控难以处理。根本原因如下。

1) 云中心存储压力大。传统配电网将源网荷侧数据均上传至云中心,数据来源多样、数据参数信息复杂,导致了云中心存储多维异构数据压力巨大,异构资源调度利用率低、协同控制性差。

2) 通信时延高、调控效率低。配电网终端设备大规模、频繁地与云中心进行数据交互产生较大的通信阻塞,导致数据传输时延提高、终端设备响应缓慢。设备端与云中心的单向数据传输方式无法实时满足电力业务需求,对于需要实时响应调控的设备,如变压器、电容器等,不能及时地进行优化调控和反馈控制,难以确保配电网无功电压调控作业的顺利开展。

3) 调控精度差。云中心自动电压控制(automatic voltage control, AVC)进行整体调控时,难以使支线末端设备的电压产生较大变化。针对局部调控时,频繁操作给云中心造成通信堵塞、调控指令产生延迟等问题。同时,面对海量异构资源 AVC 难以对全局和局部进行充分融合调控,导致调控精准性严重降低。

针对现有问题,本文提出云边协同机制,云边协同的关键在于将数据传输、存储、分析、处理及相关应用程序等配置到邻近数据源的节点中。以10 kV 配电网无功电压调控为例,传统的电网调度

需要将全部数据集中到调度中心，再由调度中心进行处理并控制，此集中调度方式存在高延迟和低效率的问题。在边缘节点被设定后，所采集的数据将在边缘层进行处理，由边缘层向控制系统发送指令，云中心只需要对边缘节点的处理结果进行实时监控和整体调控，这样既可以减少运算时延，也有助于提高控制设备的调控速度，同时极大地减轻存储和通信的负担，实现精准调控。

2 云边协同架构

2.1 云边协同集中-分布式控制架构

云边体系架构在信息网络的边缘侧添加了一个开源、灵活、可互操作的边缘服务平台，即 Edgex Foundry 的边缘服务器。它能与多种操作系统相兼容，并能提供各种可配置的应用服务和硬件架构，并能支持多种协议设备之间的通信，基于边缘服务器推进了配电网无功电压控制向低电压方向发展，建立集中-分布式控制接入配电网实现双向联动。

本文搭建了配电网“云-边-端”集中-分布式协同控制架构，如图 1 所示，包括云中心、边缘层和端层 3 个部分。该架构充分发挥了云中心集中控制、统一调度的能力；运用边缘层多协议转换、边缘服务器 (edgex foundry, EF) 灵活性高、可互操作性强、边缘节点全面感知以及实时响应的特点，适配配电网业务多、低时延需求，支撑电网异构资源集中上传，针对终端设备各类需求进行分布式指令下发，推动配电网无功电压“云-边-端”集中-分布式协同控制。

云中心主要涵盖 10 kV 并网电源的 AVC、10 kV 专线大负荷和配电网的电压控制系统。针对各边缘节点优化后的数据、驱动请求或者控制指令进行整体优化控制，反馈给边缘服务器对设备进行调控。通过云中心实现了云边协同集中-分布式控制调节变压器档位及投退电容器，提高全局网络优化性能，为“云-边-端”协同控制、协议互动、需求侧响应等业务提供支撑。

边缘层(edge layer, EL)包括 MQTT、Edgex APP Service 等多种通信协议模块和边缘服务器，通过 EF 建立规则对边缘节点采集的数据进行优化，输出的控制指令直接被终端设备上的传感器采集，实现无功电压分布式协调控制。EF 分为应用服务层、核心服务层、配套服务层以及设备服务层。应用服务层包含可配置的应用程序和端点服务，基于可配置的应用程序采用 Vault 加密模块，通过端点服务 (HTTP-API) 对外提供统一的密码访问入口，并提供权限控制以及日志审计功能。同时，在边缘层主要通过 Vault 设置密码以及 Consul secrets 引擎向 EF

颁发 root 管理权限，提供访问控制保障数据隐私，如图 2 所示。核心服务层由核心数据和控制命令模块组成，即存储由各模型处理优化后的数据，通过控制指令模块对端层设备进行调控。配套服务层部署规则引擎和警报通知服务。设备服务层包含 Edgex APP Service、MQTT 和设备服务软件开发包 (software development package, SDK) 自定义的物联网协议等多种通信协议，实现 EF 与云中心和端层的数据传输通信。

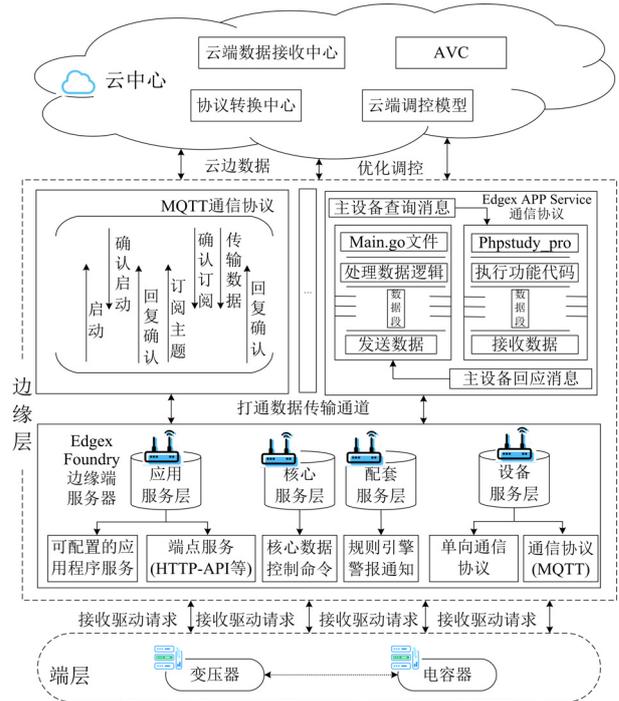


图 1 云边协同集中-分布式控制架构

Fig. 1 Cloud edge collaborative centralized-distributed control architecture

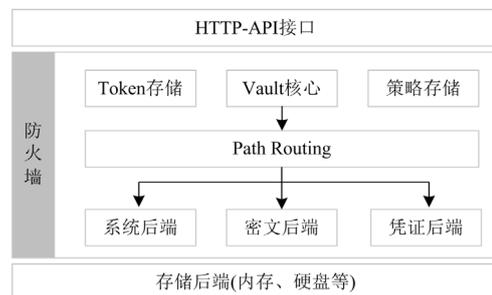


图 2 Vault 加密架构

Fig. 2 Vault encryption architecture

端层主要由变电站无功电压自动控制装置 (voltage quality control, VQC)、传感器以及各类负载等组成。端层的作用在于：① 感知并上传配电网的电力运行数据，以及负载、变压器和电容器的设备

属性信息; ② 接收 EF 传输的控制指令, 对变压器进行档位调节和电容器的投切。

2.2 协同控制模块

协同控制模块主要由“云边”、“边边”两个部分共同进行, 云边部分通过云边协同的方法协助创建南北侧服务, 即云边协同; 边边部分通过联合多个跨域的边缘平台、知识跨域协同以及应用的权限, 实现边缘节点管理, 即边边协同。

1) 云边协同

设备服务层通过特定的通信协议(MQTT/Edgex APP Service)和其他物联网对象进行通信, 选择上传/下发接收。通过设备服务层中的多种通信协议将与 Iot 对象通信的数据集解析为 EF 识别的数据结构, 并发送至核心服务层, 以及发送到 EF 相应服务层中进行应用。应用程序服务层将解析后的数据推送到端点, 可以在将数据发送到端点之前对其进行过滤、丰富和压缩功能。端点通常是 HTTP-API 端点、MQTT 主题、云系统等。

2) 边边协同

类似于应用程序服务层向北侧云中心提供数据一样, 应用程序服务层同样将 Edgex 事件(传感器、变压器和电容器数据)传输至相邻的跨域边缘平台中, 进行资源的跨域协同和无功电压调控, 如图 3 所示。边边协同重点包括跨域资源共享、设备服务以及核心命令。跨域资源共享模块解决了终端异构资源复杂和数据汇聚困难的问题, 使边缘层实现互认和共享; 设备服务包含应用程序协同、数据协同和管理协同, 主要接收驱动请求, 将其转换为 MQTT 协议请求, 并将请求转发给所关联的设备, 实现数据调度、应用控制和边缘节点运维管理, 同时实现模型及资源的跨域协同; 核心命令服务获取驱动请求并分析其请求对象(设备), 进而调用设备服务指令来执行跨域管理。

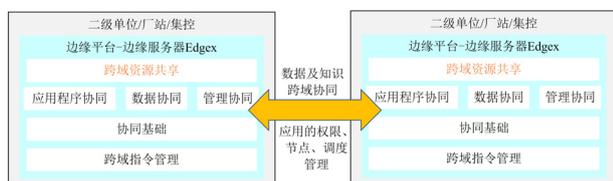


图 3 边边协同架构图

Fig. 3 Edge edge collaboration architecture

基于边缘服务器可裁剪特性, 可实现在低性能设备执行 Edgex Foundry 服务。因此, 在 EF 平台进行容器化部署, 极大地提高了控制效率, 对端侧收集的数据不仅有效地进行云边传输, 也能在极短时间的情况下在边缘层进行优化调控, 避免了云端数

据“堵塞”, 同时在云边协同、边边协同两大模块的基础上对设备进行协同控制, 更高效地实现了配电网无功电压控制。

3 云边协同下的配电网无功电压协同交互

当前, 端侧配电网智能终端缺乏与边缘服务器自适应连接体系, 从终端设备获取的大量基础异构数据存在数据交互差异问题。同时, 还存在运行数据上传至云端无法被准确识别的问题。因此, 本文采用配电网无功电压信息交互模型映射、多种通信协议转换、构建无功电压协同控制模型和母线与支联控等方式来解决, 进而实现配电网无功电压“云-边-端”集中-分布式协同控制体系。

3.1 配电网无功电压信息交互模型映射

在配电网云边协同控制架构中, 其信息交互模型通常是“端边”与“云边”交互模型。

“端边”交互模型主要包括电网的基础模块, 即电容器、变压器等无功电压控制设备。无功电压控制设备的固定配置参数主要为阻抗、感抗和容抗; 实时运行数据包含电压有效值、电流有效值、功率因数、相角等。

“云边”交互模型主要包括“云边”控制模型、优化模型及相关通信协议。主要流程为: ① 由“云边”控制模型传输配电网感知的实时运行数据; ② 由 docker 指令控制启动边缘开源框架; ③ 建立协议转换中心建立云边、边边和边端通信; ④ 由云端实时更新并下发部署在 EF 的优化模型; ⑤ 由优化模型分析处理所得边缘控制结果。

云端设备大多属于资源受限型, 当面向海量资源时存储容量与计算能力有限, 与端层相比, EL 计算、优化能力强, 存储容量较大, 因此, 云边信息交互由 EL 完成。此外, EL 还可将交互的控制模型进行封装, 并将封装好的控制模型输入到 MQTT 通信协议中, 实现云边信息交互。

3.2 基于多种通信协议的数据交互模型

在“云-边-端”协同控制过程中产生的数据不仅仅存在异构问题, 还存在数据交互差异性问题, 针对这两类问题, 往往需要将数据打包通过协议转换进行数据交互。

1) “云-边”交互

基于“云-边”交互包含上传与下发两种模式。边缘层数据上传至云中心时, 首先, 在 EF 内部署 Edgex App Service 协议, 利用 ekuiper 根据设备名称进行筛选过滤, 从边缘层消息总线中采取所需数据。然后, EL 与云端 IP 地址相匹配, 将数据打包发送到 HTTP-API 端点。最后, 通过 phpstudy_pro 程序

集成包建立端点数据与云端数据中心的联系，实现边云数据上传。云中心数据下发至边缘层时，为保证消息可靠、快速的传输，通过部署在云中心的 MQTT 通信协议进行数据集传输，如图 4 所示。



图 4 数据交互模型

Fig. 4 Data interaction model

2) “边-边”交互

基于“边-边”交互通过部署在边缘层平台的 MQTT 通信协议实现。在边缘服务器的控制下，同一层级的边缘服务器通过协议转换中心实现跨域协同，然后基于 MQTT 协议向边缘服务器发送订阅请求并发送数据。协议转换中心过程包括：

(1) 协议转换中心的 IP 地址用于映射边缘节点的“云”地址与边缘服务器的“边”地址之间的对应关系，同时，边缘层通过定义数据源建立规则进行通信。

(2) EL 由 docker 命令启动 EF 服务中心接受 MQTT 发送的订阅请求，接受请求后自主通过建立良好的控制模型对协议转换中心发送订阅请求。

(3) 在 MQTT 服务器中，确认 EF 发送的订阅请求后，将服务中心解析好的数据上传其他同一层级 EF。

3) “边-端”交互

在 EF 内，通过 SDK 自定义物联网协议实现“边-端”交互通信，主要有 Modbus 协议、约束应用协议等。

3.3 基于 Edgex Foundry 的协同控制模型

针对在 EF 感知的边缘数据，本文通过 *K-medoids* 聚类模型实现数据的聚类分析。由于传统 *K-means* 聚类中心点的选取需要手动调控且对于异常值十分敏感。因此本文采用 *K-medoids* 算法进行两阶段聚类，首先依据每个节点与其参考点之间的不相似程度之和的原理，划分出多个集群，再寻找每个集群中位于最中心的节点，并以此作为参考点，做第二阶段聚类。第二阶段聚类在此基础上进行迭代优化。该方法在一定程度上削弱了异常值的影响，聚类效果较 *K-means* 聚类更优。其流程主要如下。

1) 以聚类数据为参考决定类别数(cluster_num)，从 n 个节点中选择 k 个节点作为初始聚类中心。

2) 按照就近原则，将剩余的 $n - k$ 个点分配到当前最佳的 medoids 代表的类中。

3) 通过代价函数的值列举所有可能，选取代价函数最小时对应的点作为新的 medoids，以改进聚类的质量。*K-medoids* 使用绝对差值和(sum of absolute differences, SAD)的度量来判别聚类结果的优劣，度量越小聚类结果越优。在多维空间中，SAD 计算公式为

$$S_{AD} = \sum_{m=1}^k \sum_{P_i \in C_i} \text{dist}(P_i, O_i) = \sum_{m=1}^k \sum_{P_i \in C_i} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_{C_i}} (P_{ij} - O_{ij})^2} \quad (1)$$

式中： m 为初始聚类中心节点； k 为初始聚类中心节点总数； C_i 为第 i 个聚类簇； P_i 为第 i 簇 C_i 的节点； O_i 为第 i 簇 C_i 的中心节点； dist 代表两个节点的欧式距离； j 为 C_i 分组中的中心节点； n_{C_i} 为 C_i 分组中的中心节点总数； P_{ij} 为 P_i 的第 j 个节点； O_{ij} 为 O_i 的第 j 个中心节点。

4) 更换聚类中心，不断重复②和③。直到所有 medoids 点不再发生变化或已达到设定的最大迭代数，最终确定聚类结果，再结合十五区图(fifteen zone map, FZM)制定无功电压的控制策略。十五区图控制策略如图 5 所示。

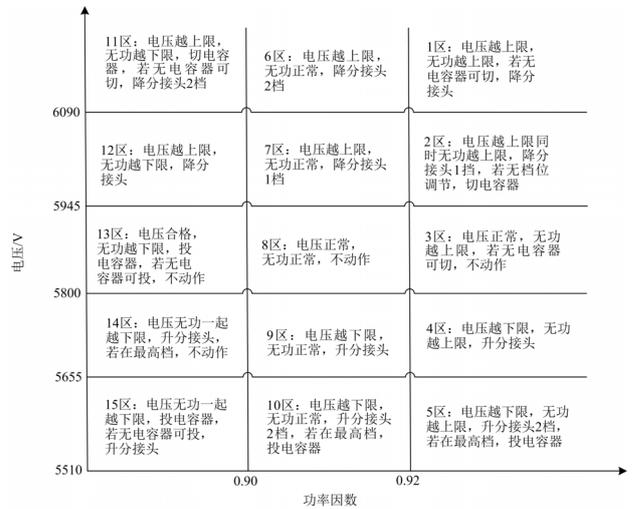


图 5 十五区图控制示意图

Fig. 5 Control diagram of zone fifteen

综上，本文基于 *K-medoids* 聚类模型和十五区图模型构造了一种新型协同控制模型，即 *Km-FZM* 模型，如图 6 所示。

本文基于 *K-medoids* 聚类模型和十五区图模型构造了一种新型协同控制方法，即 *Km-FZM* 方法，流程如图 6 所示。首先应用 *K-medoids* 聚类模型削弱异常值数据的影响，通过聚类迭代得到最优聚类

结果。然后根据功率因数以及电压上下限划分出十五个区域, 每个区域对应不同的无功电压控制策略。最终将聚类结果映射到十五区图中, 得到变压器档位调节和电容器投切方案。Km-FZM 方法在相同的判断时间下, 减少了档位频繁调控次数, 降低了调控时延, 提高智能终端设备调控效率。

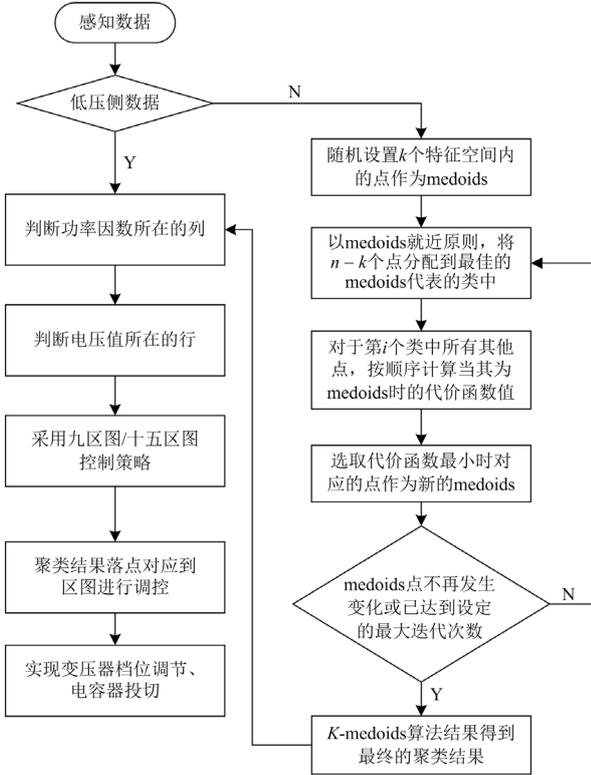


图 6 Km-FZM 方法

Fig. 6 Km-FZM method

3.4 云边协同下的母线与支线联控

在边缘服务器中, 启动规则引擎对电网运行进行优化筛选, 通过协同控制模型进行配电网支线优化调控, 当针对 VQC 调控无法达到电网业务需求时, 启动母线与支线的联控优化, 如图 7 所示。

基于云边协同的母线与支线联控包括两个方面, 一方面, 对 10 kV 高压侧的海量数据进行集中聚类分析, 若得到的聚类结果与规则界定的参考区域相差较远, 则将特征数据上传至云端, 云端结合运行数据进行整体优化, 将优化后的结果通过 API 接口控制算法生成控制命令实现云端 AVC 调控。

另一方面, 若得到的聚类结果值落到规则界定的参考区域上, 则需考虑分布式协同控制。针对十五区图各区域电压和无功的上下限产生指令 (Instruction) 信息和阈值 (Threshold) 信息, 通过指令信息对运行数据进行规则范围界定, 通过阈值信息获得界定范围的临界点, 便于对界定范围内的运行

数据进行控制, 输出电容器投切和变压器档位调节的赋值结果, 赋值后通过通信协议反馈给终端设备, 缓解了云端海量数据采集、存储和计算的壓力。

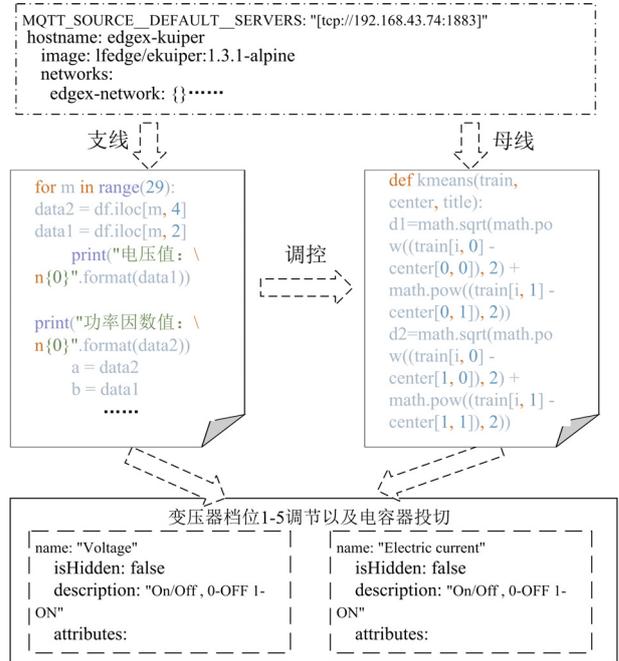


图 7 母线与支线联控

Fig. 7 Bus and branch line joint control

4 应用实例

4.1 配电网拓扑模型

由于配电网网络体系存在多样性和复杂性, 利用现有网络技术难以实现完全模拟, 用尽量准确的仿真模型还原真实配电网系统网络, 是取得正确结果的必要条件。本文结合云南某配电系统的网架及设备信息, 基于 Edgex Foundry 平台建立了拓扑模型^[26], 如图 8 所示。该模型由 AVC 云中心、边缘层变压器、电容器、负载以及母线等组成, 包括 1 条 10 kV 的母线和 4 条 10 kV 支线组成, 母线和各支线处都设有电容器和变压器。在此基础上, 根据配电网业务需求, 对设备进行功能分析并抽象建模, 参考 IEC968 标准及配电网信息模型标准, 对模型层次进行简化, 结合云边协同和边边协同架构搭建配电网系统, 建立平行仿真模型。

4.2 基于边缘框架的无功电压协同控制

本文以某区域配电网平行仿真模型无功电压实时优化调度为例来验证所提方法的可行性。采用上述的拓扑模型, 并自上而下建立边缘服务器以及搭建云端数据传输通道, 对基于 Edgex Foundry 的云边协同控制方法进行测试, 如图 9 所示。

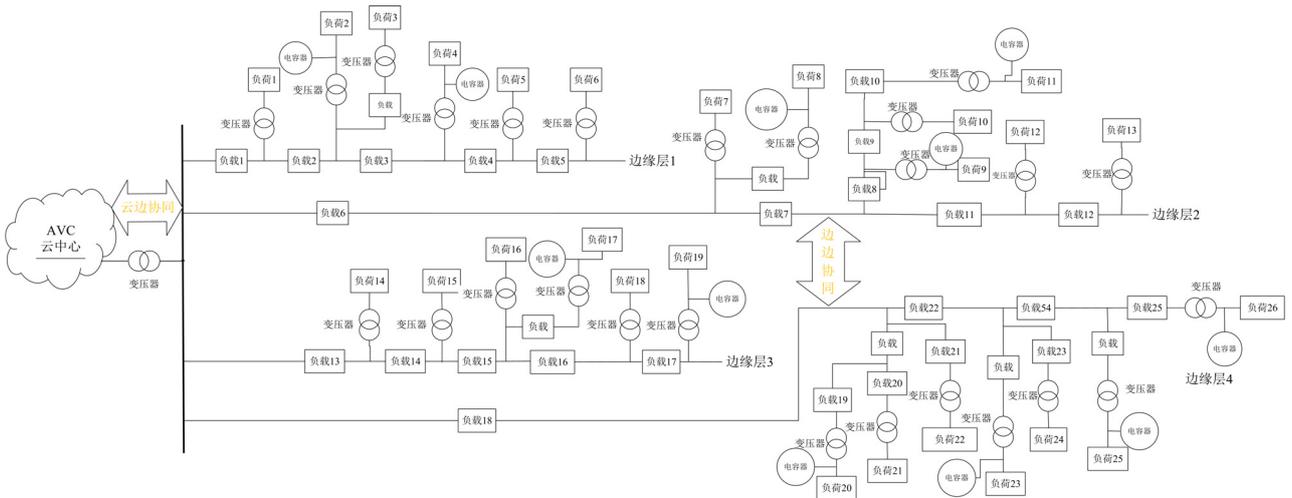


图 8 拓扑模型

Fig. 8 Topology model

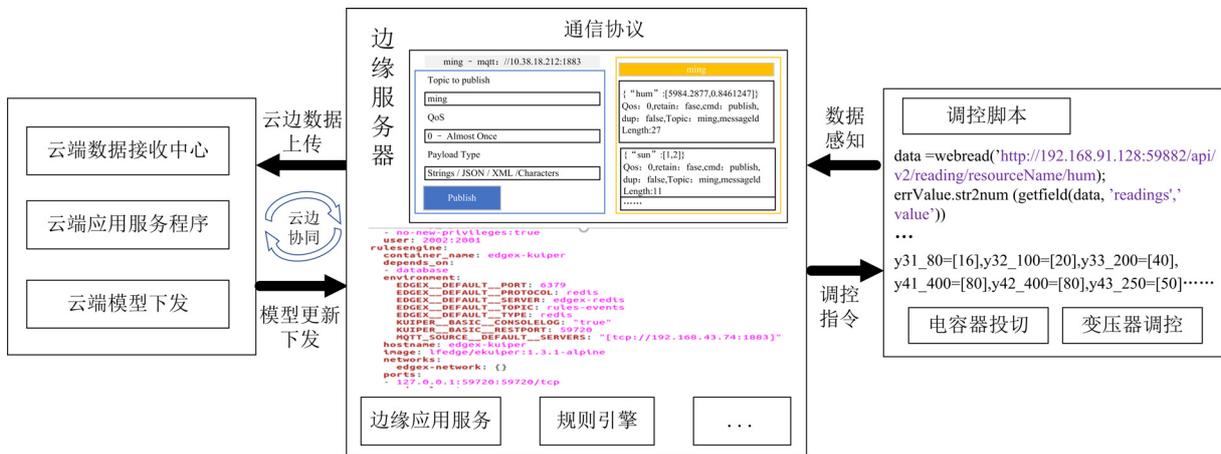


图 9 无功电压云边协同交互

Fig. 9 Reactive voltage cloud edge collaborative interaction

通过平行仿真平台模拟配电网 10 kV 侧用户，用以产生无功电压和功率因数等运行数据。通过 5G 网络及协议转换中心的交互机传输数据，整个通信过程以“ming”作为发布的主题，服务质量设置为“0-Almost Once”。在正常的通信过程中，边缘服务器通过协议传输的边缘数据识别边缘节点，通过 docker-device 命令运行开源框架，其服务中心利用 ekuiper 筛选主题为“ming”的边缘数据并接收存储，通过优化模型读取存储数据进行聚类优化以及更加精准的十五区图调控策略。利用区域划分思想对高压侧数据上发云端并进行集中优化，对低压侧数据在边缘层进行协同优化，最终制定出适合于各个支线的调控策略，通过协议转发至服务中心，利用 Edgex APP Service 协议通过 API 接口调用控制算法生成控制命令，如图 10 所示。

若采用集中式控制模式，边缘服务器的数据接收、处理以及自主优化功能将全部交由云中心单一完成；若采用集中-分布式协同控制模式，云中心仅仅负责母线高压侧数据整体优化，边缘层在整体优化后的基础上对局部(支线侧)进行优化。基于无线局域网络测得上述两个优化计算过程中的算法执行时间情况，对其进行了 200 次的采样测试，平均执行响应时间如表 1 所示。

采用云边协同集中-分布式控制模式在数据感知传输速度、调控命令响应时间以及终端传感器响应时间都明显优于单一云中心集中式控制模式。云边协同集中-分布式控制降低了云中心计算时延，在一定程度上提高了数据感知传输速度以及终端设备的调控效率，验证了基于 Edgex Foundry 的配电网无功电压协同控制方法的实时性和低时延性。

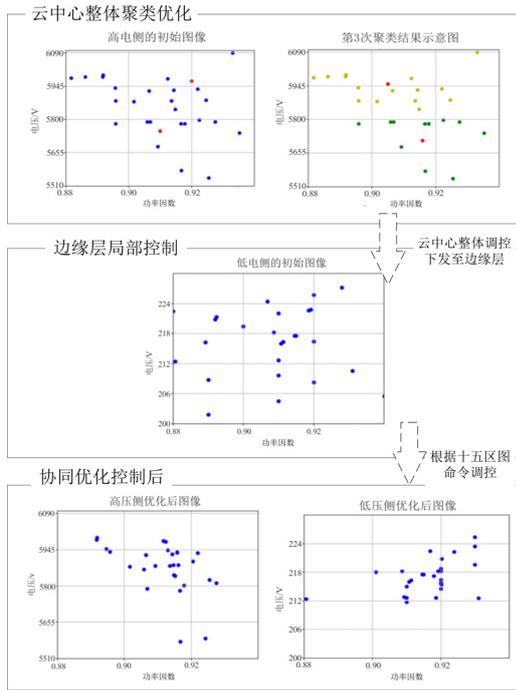


图 10 云边集中-分布式调控

Fig. 10 Cloud edge centralized distributed control

表 1 不同控制模式下相应时间对比表

Table 1 Comparison of corresponding time under different control modes

相应模块	ms	
	集中式控制	云边协同控制
数据感知传输时间	350~600	50~80
添加协议指令时间	70~80	55~65
边缘层部署规则时间	—	100~200
协同控制模型处理时间	650~950	700~900
调控命令响应时间	800~1000	100~450
终端传感器响应时间	1000~1100	400~550

基于 Edgex Foundry 的云边协同控制环境下, 边缘层对数据进行规则范围界定, 通过对变压器档位赋值 1-5 以及判断电容器是否投切, 最终获得母线与各支线的最终联控指令。本算例随机从支线中选取支路数据以及母线数据进行云边协同控制前后对比, 如表 2 所示。通过云边协同控制后得到各边缘节点无功补偿的最优调节方案, 对变压器档位调节及投退电容器, 实现配电网无功电压“云-边-端”集中-分布式协同调控。

表 2 云边协同控制前后对比表

Table 2 Comparison table before and after cloud edge collaborative control

支线名称	云边协同控制前				云边协同控制后			
	电压/V	功率因数	有载调压 变压器档位	电容器 投切	电压/V	功率因数	有载调压 变压器档位	电容器投切 (0 切 1 投)
母线 1	6148	0.8946	3	0	5799	0.9186	2	0
支路 1	187	0.8957	3	1	215	0.9133	5	1
支路 2	247	0.7948	3	1	217	0.9180	2	0
支路 3	239	0.8171	3	1	212	0.9310	3	0
支路 4	192	0.8815	3	1	212	0.9186	1	1
支路 5	235	0.8823	3	1	215	0.9106	3	1
支路 6	234	0.8100	3	1	222	0.9168	2	0
支路 7	196	0.7612	3	1	216	0.9199	4	1
支路 8	232	0.8794	3	1	220	0.9202	1	0
支路 9	178	0.8829	3	1	219	0.9299	4	0
支路 10	235	0.7594	3	1	223	0.8805	1	1

5 结论

本文利用云计算和边缘计算的协同优势, 提出了基于 Edgex Foundry 的配电网无功电压“云-边-端”集中-分布式协同控制方法。基于 Edgex Foundry 平台搭建了与实际配电网相应的拓扑模型, 完善了云边协同中边层的合理架设, 将云边协同架构与十五区图控制策略相结合, 在云边协同控制下实现母线与支线整体联控, 缓解了云端存储和计算压力; 通过建立协议转换中心解决云边、边边通信问题。该

方法既能实现对配电网无功电压统一调控, 对配电网变压器和电容器针对不同规则范围内进行调档投切, 也验证了基于 Edgex Foundry 的配电网无功电压“云-边-端”集中-分布式协同调控的可行性, 实现了云边协同控制闭环。

配电网无功电压协同控制最终目的是让智能终端能够实时处理海量数据, 缓解云端计算压力, 能够在低延时的状态下对命令作出及时反馈, 来满足当前配电网无功平衡的要求。另外, 边缘服务器服

务程序的部署应用、考虑电网系统多时间尺度协同配合以及引入新型连续电压无功调节设备等方面还需要更进一步的深入研究,从而更好地应用于配电网调度中,提高终端调控效率,实现配电网无功电压平衡。

参考文献

- [1] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [2] 王利利, 王皓, 任洲洋, 等. 计及灵活资源调节潜力的高压配电网新能源接纳能力评估[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 124-131.
WANG Lili, WANG Hao, REN Zhouyang, et al. Evaluation of renewable energy accommodation capacity of high voltage distribution networks considering regulation potential of flexible resources[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 124-131.
- [3] 刘建伟, 李学斌, 刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 476-484.
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [4] 杨淑霞, 朱宪国, 彭生江. 非合作博弈模式下新能源微电网多主体成本策略优化模型[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1): 116-123.
YANG Shuxia, ZHU Xianguo, PENG Shengjiang. Multi-agent cost optimization strategy model of new energy micro-grid based on non-cooperative game theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1): 116-123.
- [5] 苏鹏, 陈璐, 吴坚, 等. 新型电力系统多能源能量惯性动态优化控制模型[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 87-93.
SU Peng, CHEN Lu, WU Jian, et al. Dynamic optimal control model of multi-energy inertia in new power system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 87-93.
- [6] 徐博涵, 向月, 潘力, 等. 基于深度强化学习的含高比例可再生能源配电网就地分散式电压管控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 100-109.
XU Bohan, XIANG Yue, PAN Li, et al. Local decentralized voltage management of a distribution network with a high proportion of renewable energy based on deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 100-109.
- [7] 刘雪飞, 刘洋, 马国真, 等. 考虑负荷差异化需求响应的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 131-141.
LIU Xuefei, LIU Yang, MA Guozhen, et al. Multi-objective extended planning for a distribution network considering demarcation of demand response schemes[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 131-141.
- [8] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [9] 祝佳佩, 赵文彬. 考虑线路潮流波动对母线电压影响的特高压交流电网电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 76-82.
ZHU Jiawei, ZHAO Wenbin. Voltage control strategy of a UHV AC power grid considering the influence of line power flow fluctuation on bus voltage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 76-82.
- [10] 李培帅, 吴在军, 张错, 等. 主动配电网分布式混合时间尺度无功/电压控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 160-168.
LI Peishuai, WU Zaijun, ZHANG Cuo, et al. Distributed hybrid-timescale voltage/var control in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 160-168.
- [11] DAS T, ROY R, MANDAL K K, et al. Impact of the penetration of distributed generation on optimal reactive power dispatch[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 63-89.
- [12] 赵天阳, 张华君, 徐岩, 等. 不确定环境下含云计算数据中心的电网韧性增强调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 49-57.
ZHAO Tianyang, ZHANG Huajun, XU Yan, et al. Resilience-enhanced scheduling of power system with cloud computing data centers under uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 49-57.
- [13] 曹子健, 林今, 宋永华. 主动配电网中云计算资源的优化配置模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3043-3049.
CAO Zijian, LIN Jin, SONG Yonghua. Optimization model for resources allocation of cloud computations in active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3043-3049.
- [14] 尚立, 蔡硕, 崔俊彬, 等. 基于软件定义网络的电网边

- 缘计算资源分配[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 136-143.
- SHANG Li, CAI Shuo, CUI Junbin, et al. SDN-based MEC resource allocation of a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 136-143.
- [15] 潘思宇, 刘宝柱. 面向配电网故障快速处理的边缘计算单元优化配置方法[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 31-41.
- PAN Siyu, LIU Baozhu. Optimal configuration method of edge computing units for rapid faults processing in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 31-41.
- [16] 周振宇, 王墨, 廖海君, 等. 电力物联网 5G 云-边-端协同框架与资源调度方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1641-1651.
- ZHOU Zhenyu, WANG Zhao, LIAO Haijun, et al. 5G cloud-edge-end collaboration framework and resource scheduling method in power internet of things[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1641-1651.
- [17] 杨维永, 刘苇, 崔恒志, 等. SG-Edge: 电力物联网可信边缘计算框架关键技术[J]. 软件学报, 2022, 33(2): 641-663.
- YANG Weiyong, LIU Wei, CUI Hengzhi, et al. SG-edge: key technology of power internet of things trusted edge computing framework[J]. Journal of Software, 2022, 33(2): 641-663.
- [18] 祁兵, 夏琰, 李彬, 等. 基于边缘计算的家庭能源管理系统: 架构、关键技术及实现方式[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 33-41.
- QI Bing, XIA Yan, LI Bin, et al. Family energy management system based on edge computing: architecture, key technology and implementation[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 33-41.
- [19] 白昱阳, 黄彦浩, 陈思远, 等. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410.
- BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46 (3): 397-410.
- [20] ALNOMAN A, SHARMA S K, EJAZ W, et al. Emerging edge computing technologies for distributed IoT systems[J]. IEEE Network, 2019, 33(6).
- [21] 原吕泽芮, 顾洁, 金之俭. 基于云-边-端协同的电力物联网用户侧数据应用框架[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 1-8.
- YUAN Lüzherui, GU Jie, JIN Zhijian. User-side data application framework based on cloud-edge-user collaboration in power internet of things[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 1-8.
- [22] YING Jun, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Adaptive access method of low-voltage intelligent terminals for power distribution internet of things[J]. Power System Automation, 2020, 44(2): 22-27.
- [23] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 167-173.
- LUO Jinman, LIU Liyuan, LIU Piao, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 167-173.
- [24] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 59-67.
- WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67.
- [25] 刘敦楠, 徐尔丰, 许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.
- LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng. “Source-network-load-storage” integrated operation model for microgrid in park[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 681-689.
- [26] 刘东, 王伊晓, 陆一鸣. IEC 61968 和 IEC 61850 量测模型的差异性分析[J]. 供用电, 2016, 33(10): 19-24.
- LIU Dong, WANG Yixiao, LU Yiming. Difference analysis of IEC 61968 and IEC 61850 measurement models[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(10): 19-24.

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-05-16

作者简介:

孙钰茗(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网无功电压协同控制; E-mail: 1368677116@qq.com

郭成(1978—), 男, 通信作者, 工学博士, 教授级高工, 主要研究方向为电能质量分析与控制和电力系统稳定性分析。E-mail: gc325@126.com

(编辑 张颖)