

面向泛在电力物联网的配电网过电压类故障识别边缘计算节点架构研究

张增强¹, 陈伟伟¹, 薛静杰¹, 徐龙秀¹, 翟旭京¹, 吴伟丽^{2,3}

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 西安科技大学, 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710000; 3. 安徽正广电电力技术有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 配电网中过电压类故障因其对电力设备具有破坏性且需要快速响应和处理, 不必进入泛在电力物联网云平台进行数据采集和集成, 而是采用本地化控制、分布式处理的方式进行边缘计算。面向泛在电力物联网, 将边缘计算技术应用于单相接地故障响应边缘信息处理。依据 IEC 62939 智能电网用户接口标准, 设计了配电网故障边缘计算节点 (Distribution Power Network Fault Edge Computing Node, DPNF-ECN) 架构, 提出关键技术的实现方法, 构建了基于边缘计算分层协同的配电网故障识别与响应模型。最后以某石化企业电网为例, 构建了配电网故障识别边缘节点构架。

关键词: 泛在电力物联网; DPNF-ECN; 关键技术; 过电压

Key technologies of distribution network fault recognition edge computing node for ubiquitous internet of things

ZHANG Zengqiang¹, CHEN Weiwei¹, XUE Jingjie¹, XU Longxiu¹, ZHAI Xujing¹, WU Weili^{2,3}

(1. National Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Institute of Economics and Technology, Urumqi 830000, China; 2. College of Electric and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Anhui Zheng-Guang-Dian Electric Power Technology Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: Single-phase grounding fault in distribution network needs fast response and processing because of its destructive overvoltage. Instead of entering the ubiquitous cloud platform for data acquisition and integration, it uses localized control and distributed processing for edge calculation. Faced with the ubiquitous power internet of things, edge computing technology is applied to edge information processing of single-phase grounding fault response. According to IEC 62939 smart grid user interface standards, the architecture of Distribution Power Network Fault Edge Computing Node (DPNF-ECN) is designed, the implementation method of key technologies is proposed, and the distribution network fault identification and response model based on edge computing hierarchical co-treatment is constructed. Finally, taking a petrochemical enterprise power grid as an example, the structure of the distribution network fault identification edge node is constructed.

Key words: ubiquitous electricity internet of things; DPNF-ECN; key technologies; overvoltage

0 引言

配电网直接面向电力用户, 其信号的

新疆自治区面上项目 (NO.2017D01C417); 西安科技大学博士启动金 (2017QDJ033)

采集和处理是泛在电力物联网感知层的重要支撑, 多数运行和故障信号要送入云平台共享, 便于统一调配, 但是随着电网规模的扩大, 泛在电力物联网目前已经接入智能电能表等各类

终端5.4亿台(套)，采集数据日增量超过60 TB，采用云平台数据处理虽然可以保证其容量，但对于某些电力故障来说，则需要采用边缘计算提高处理和响应的速度。配电网弧光接地故障因其具有过电压的破坏性，需要快速响应和处理，虽然不必进入物联网云平台进行数据采集和集成，但需要进行边缘计算和比对，以便为此类故障本地化分布式处理提供数据比对和处理模式，加快响应进程。

我国配电网已经基本具备搭建配电物联网的条件。配电网中性点不接地系统中发生单相接地故障居多，单相接地故障演变为弧光接地故障或铁磁谐振故障时，会引起振荡过电压，严重危害电力系统设备安全运行^[1-2]，当系统电容增大时，这种危害将更严重^[3-5]。缩短故障时间、快速消除过电压是解决此类故障的有效途径。其中，对故障有效表示是快速、准确采取消除措施的前提。目前电力部门对此类故障的治理模式常采用点对点式，即在发生过弧光接地过电压故障处安装消弧装置，并对其特征^[6]、机理^[7]、影响因素^[8]、辨识方法和治理等方面进行研究^[9-11]。

配电网故障中大多数为单相接地，现代配电网广泛使用电力电缆，加剧了因单相接地演变而成的弧光接地过电压故障后果，如果在全网范围内此类故障数据的采集、传感协同、边缘计算和共享，形成故障处理的规模化、体系化发展态势，则能够为整个配电网防范、响应和消除单相接地故障提供良好的动态响应平台。采用边缘计算不仅可以将上述信息上传至云平台，而且能够快速响应^[12]，缓解云平台数据节点的压力^[13]。

配电网故障边缘计算(Edge Computing, EC)是在靠近配电网边缘末端数据监测的源头侧，基于数据监测手段，融合网络、故障处理算法、存储及应用核心能力的新型网络架构和开放平台，就近提供边缘智能服务，是泛在电力物联网信息处理的一种新模式^[14-16]，配电网网络末端电力信息通过边缘处理后再进行上传

和通信，可以降低云端网络核心节点的压力和通信容量^[17-18]。配电网故障信息边缘计算节点是配电物联网的关键技术之一，为实现全网故障数据的共享构建智能坚强配电网提供重要的技术支撑^[19-20]。

目前还没有关于边缘计算技术在配电网故障响应领域的应用研究，考虑泛在电力物联网内在需求，提出了基于特征信号辨识的配电网故障信息边缘计算节点架构设计，指出了其中的关键技术，并以某石化企业电网为例，搭建了配电网故障识别边缘计算节点框架。

1 泛在电力物联网与边缘计算

1.1 泛在电力物联网框架

泛在电力物联网主要是感知层、网络层、平台层和应用层共同协调、通信及反馈等环节构成的统一体。其中，电力生产、输送、服务和用户感知共同构成感知层，又可独立成电力生产物联网、输电物联网、配电物联网和用户感知层网络，向国网云平台进行数据传递时，按照数据的种类、重要程度和响应速度的要求等信息，分为统一感知接入和边缘智能处理两大类，单相接地故障信息因其响应的实时性要求，需要在配电网物联网内进行边缘智能处理。

1.2 配电物联网

配电物联网融合了电力工业技术和物联网技术，主要目的是将配电网内部设备全面互联、互通和互操作，实现配电网的全面感知、数据融合共享和智能应用，由于配电网直接面向用户负荷，设备肩负监测、运行与控制的任

务，其中监测设备需要广泛互联，以实现配电物联网对其运行状态参数的全面感知。

配电物联网中，各类电气信息监测数据经过筛选后会通过数据链路上传至配电物联网云平台。当配电网发生故障时，监测设备将发生变化的电网各节点电压、电流等电气量信息送入边缘计算平台，计算平台实时响应，判断故障类型后生成保护动作或报警、断路器动作等

策略。上述信息需要利用边缘计算可以快速、及时响应，在不增加配电物联网云平台数据传输与存储的压力下，边缘计算后故障信息会上传至配电网物联网平台。

2 DPNF-ECN可行性

2.1 DPNF-ECN必要性

目前，配电网对故障监测和处理的特点是各自为政，具有相对独立性且处于分散状态，如单相接地故障时系统首选消弧线圈，但由于消弧线圈的补偿机理是以工频为基础的，当发生间歇性接地时，消弧线圈对这种暂态过程所引起的弧光接地过电压的抑制作用极其有限，为此还需要借助快切装置对此过电压故障进行切除；或者单相接地故障消除后又因为互感器铁心饱和，造成电感下降而不利于与系统电容配合，导致系统铁磁谐振过电压，此时还需要起动作谐装置才能抑制过电压故障，避免互感器烧毁，保护系统安全运行。此外，系统故障类型及状况复杂多样，所表现出的故障特征在形式上、大小上都变化无常。在这种情况下，仅利用故障某一方面的特征构造单一的选线判据具有片面性，当该种故障特征表现不明显时，判据给出的结果有可能是错误的，这也是导致系统故障判别准确度不高及处理不及时根源所在。

现有站级过电压监测及抑制装置从终端感知到业务应用较为封闭，其计算、通信和网络能力无法共享，大部分项目的扩展性、兼容性差，改造升级、复制和推广对原厂家依赖性较强，难以通过规模化发展实现输配变电设备物联网互联互通。

2.2 DPNF-ECN可行性

构建DPNF-ECN平台，需要解决三个关键技术问题：其一是海量数据的多维度测量，以获取系统运行参数和状态，为故障识别提供数据基础；其二是多源数据信息融合，对监控数据进行异构计算后，采用参数

辨识和故障识别的算法，判别故障类型并快速响应应对措施；最后一个高速大容量的数据通信。

互感器的测量数据包括有功功率、无功功率、电压和相角等，通过状态估计得出状态估计值，由于潮流方程中待估计值均为非线性，因此可以利用最小二乘法来拟合最优结果。在求解最小二乘法的过程中，LM(Levenberg-Marquardt)算法是一种介于牛顿法与梯度下降法之间的非线性优化方法，可以很好地解决最优化问题。得到状态估计值后，将这个状态估计值与系统测量值进行比较，可以得出互感器的误差结果，基于这个结果进行互感器误差分析，判断互感器是否处于异常状态，从而提高系统的监测效果。

从数据融合与信息处理角度看，故障所采用的信息有母线三相电压信号、开口三角电压信号、各测量点电流信号的AD采样值以及系统的结构参数。为了能够发挥各种配电网故障信息运算单元的优势，整合配电物联网平台分立的运算单元为一个协同整体，实现软件跨多种平台，需要异构计算。配电网单相故障异构计算流程如下。

- 1) 根据功能的不同，划分配电网故障信息边缘运算单元。
- 2) 对故障信息运算单元进行统一编址，存放于异构计算平台。
- 3) 设置访问权限，使任何参与统一编址的运算单元都允许其他运算单元访问，各分立运算单元成为相互平等的伙伴关系。
- 4) 根据运算单元的任务，利用优化调度算法，动态地确定最适合的计算单元，并运行故障识别工作负载。

根据故障信息的处理需求判断故障类型，当采用自适应算法时，异构计算的硬件部分由CPU组成。

配电网过电压类故障信息融合流程如图1所示。

高速通信可以借助实现边缘节点通信技术

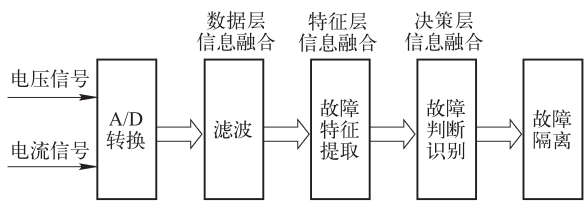


图1 配电网过电压类故障信息融合流程

Fig. 1 Distribution network over-voltage fault information fusion process

优势，在配电物联网基础与平台上，故障识别判据预先嵌入边缘节点控制平台，配电网故障监测信号由不同厂商设备采集上传，为保证故障信息处理和响应的快速性，采用分布式方式传送，且需要低时延网络的支持。

为了对比分布式边缘计算和云平台计算的能耗，构建拥塞率指标，即

$$\begin{cases} b = (\bar{V}D - V'D')/t \\ e = \bar{V} \times \Delta T/t \end{cases} \quad (1)$$

式中， b 为拥塞率； e 为能耗； $\bar{V}$ 为在分布式环境下表示数据存储节点数量，非分布式环境下表示终端传感器节点数量； V' 为服务终端节点数量； t 为时刻； ΔT 为每个节点的能耗。

一般来说，拥塞率 b 和能耗 e 越小，表明边缘计算所消耗的时间和占用网络的资源越小。

3 DPNF-ECN架构

3.1 DPNF-ECN架构设计思路

基于泛在物联网技术配电网过电压类型智能识别、主动预警及快速抑制关技术，可以为生产运行部门提供实时运行工况，为调度部门提供是否跳闸的辅助决策，也可以用于铁磁谐振治理，具体功能体现在如下几个方面。

1) 基于泛在物联网技术配电网过电压类型智能识别、主动预警及快速抑制关键技术，能够实时为生产运行部门提供系统运行工况，当系统运行工况发生变化时，能够及时了解故障类型及故障危险程度，以便运行检修人员及时作出应对措施，实现上述功能需要采集的基础故障数据，同时需要构建基础数据层。

2) 故障类型智能识别及主动故障预警功能，能够为调度系统单相接地故障处理提供辅助决策依据，在边缘计算中，可借助各类故障虚拟场景模拟进行算法训练，并对各类故障辨识算法进行异构，固化存储，便于数据处理时调用，为此需要构建虚拟层。

3) 快速故障抑制功能，通过指令的传输消除各类过电压故障，确保用电设备安全运行，所有信号和指令需要通过边缘计算的通信传达到设备终端，为此需要构建边缘虚拟服务层。

3.2 配电网过电压类故障边缘计算节点

配电网过电压类故障边缘计算节点(DPNF-ECN)架构分基础数据层、虚拟化层和边缘虚拟服务层，主要功能包括总线协议适配、监测数据实时连接、实时流式故障数据分析、时序数据存取、故障处理策略执行和传感器设备即插即用等，具体如图2所示。

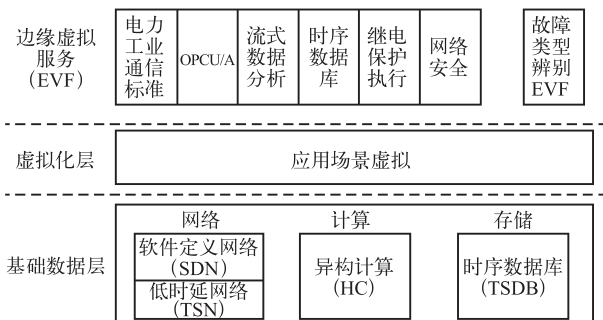


图2 DPNF-ECN架构

Fig. 2 DPNF-ECN architecture

图2中，DPNSF-ECN基础数据层包括网络、计算和存储三个基础模块，主要实现配电网电压、电流等信号的采集、计算和存储；虚拟化层根据需要设置，可以对配电网故障场景进行虚拟，其目的是利用虚拟化技术进行数据融合，实现故障识别和发出调度指令，降低系统开发和部署成本；边缘虚拟服务层将功能软件化和服务化，并且与专有的硬件平台解耦，基于虚拟化技术，可以在同一个硬件平台上将硬件、系统和特定的EVF等按照业务进行组合，虚拟化出多个独立的业务区间并彼此隔离。

DPNF-ECN采用智能分布式系统框架，支持多种网络接口、总线协议与网络拓扑，实现边缘本地系统互联，并提供本地故障辨识、逻辑判断计算和存储动能，能够和云端系统协

同共享。

3.3 配电网单相故障类型辨识流程

边缘节点架构下的配电网过电压类故障识别流程如图3所示。

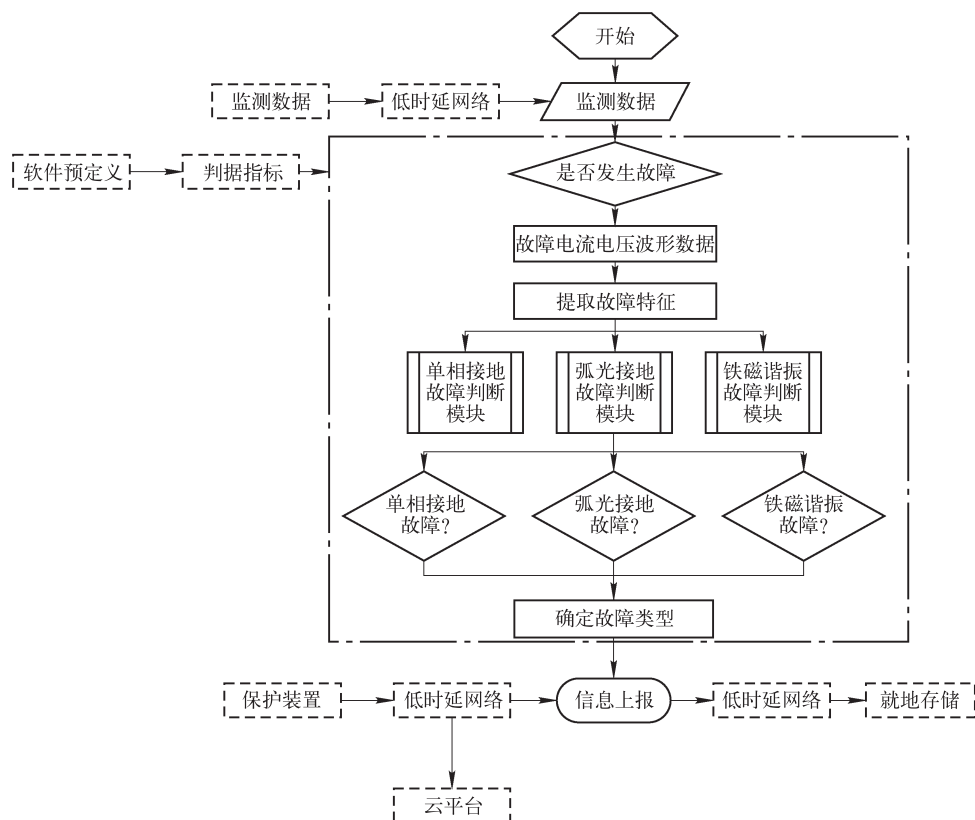


图3 配电网过电压类故障识别流程

Fig. 3 Identification process of overvoltage fault in distribution network

图3中，单相接地故障、弧光接地故障和铁磁谐振故障判断模块分别对所提取的故障特征进行分析，利用三种故障判断模块进行波形判断，故障判断模块结合当前波形和历史故障场景判断故障类型，最后再将故障信息通过TSN上传。

3.4 DPNF-ECN工作流程

以单相故障、弧光接地过电压故障和铁磁谐振过电压故障识别为边缘计算目标，DPNF-ECN工作流程如图4所示。

根据图4可知，配电网故障边缘节点计算流程如下。

1) 事先将配电网故障录波记录、故障断面

数据、检修试验数据和设备维修记录等信息保存至TSDB中，并利用低延时网络对监测数据进行通信，再上传至SDN。

2) SDN随时检查监测波形数据，如果发现数据异常，则采用HC判断是否发生单相接地故障；确定为单相接地故障时，HC调用历史故障数据，与当前故障监测数据共同模拟事故场景，并调用分配故障辨识程序。

3) 并行启动各类故障辨识模块，确定故障类型后，快速通过TSN发送命令，执行结构启动快速切除故障。

4) 将故障信息和处理结果上传至配电物联网云平台，同时就地保存。

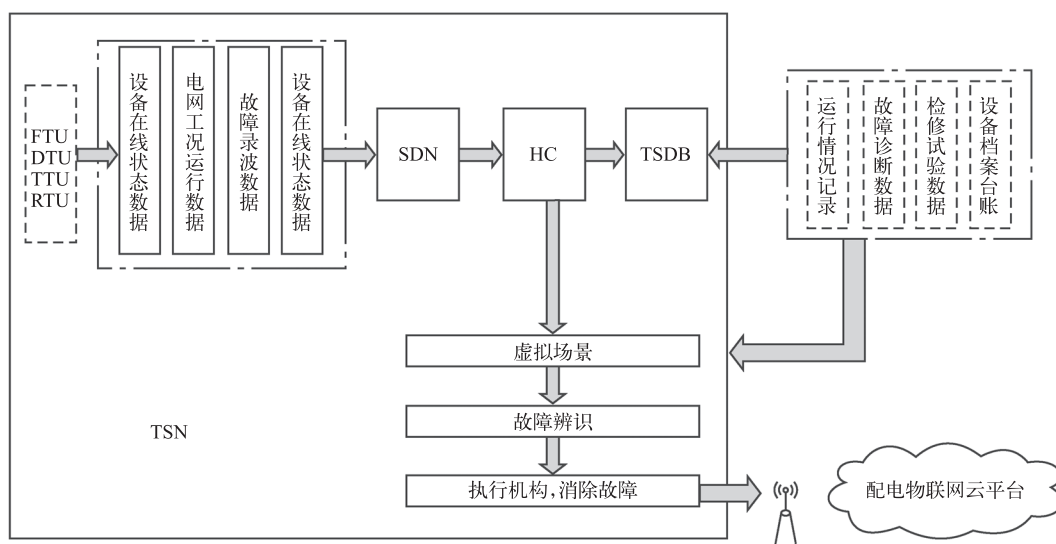


图4 DPNF-ECN 工作流程

Fig. 4 DPNF-ECN workflow

4 案例分析

某石化电网含有两座35 kV变电站，配电电压等级有10 kV、6 kV和400 V，负荷节点32个，各类监测设备由不同厂家生产，为了有效辨识、响应和处理故障，采用边缘计算架构进行设计，思路如下：

1) 构建石化电网故障仿真模型，结合历史故障数据生成故障信息库，计算各故障辨识指标。

2) 将监测设备数据的输出阈值、发送格式、寄存器地址、控制器返回格式、历史故障数据和故障类型阈值范围保存至TSDB，系统实时监测、电网工况状态等信息，通过SDN、HC环节也送入TDSB。

3) 构建边缘节点架构，将各监控装置看作节点并组网，遵循通信协议Modbus RTU、9 600 bps@8n1，设置无线通信参数为GSM/GPRS，四频850/900 MHz和1 800/1 900 MHz，采用分层分布式控制方式，当监测数据异常时，边缘计算节点进行虚拟场景辨识故障类型，通过TSN网络进行故障信息反馈，执行机构进行消除，并将故障信息处理结果上传至云平台并保存至当地TSDB。

4) 构建配电网故障识别边缘节点仿真模

型，模拟发生单相接地故障，并设置在一定时间内不对单相接地故障进行处理，观察过电压情况，若产生了过电压，检验边缘计算节点是否能快速传递监控数据并经判断后发出指令，对比利用边缘技术后故障处理和传统方式处理下的故障消除的速度，并计算网络拥塞率和损耗。

与云平台计算对比，配电网过电压类故障识别边缘计算节点平台将具有下述特点。

1) 与云计算的集中式组织方式不同，配电网故障识别边缘计算节点具边缘计算采用分布式的组织方式，由分布在不同区域的传感器、路由器和交换机等提供服务，由于边缘计算更加接近感知层的终端，故障信号的请求经过低时延网络就可以到边缘计算服务器，并且与地理位置有关，依据地理位置分布边缘节点，以求得最近的变电站响应。

2) 边缘计算不能替代云计算，二者互补、有机结合能够更好地为泛在电力物联网服务。

5 结束语

针对配电网故障响应实时性和快速性需求，提出了采用边缘计算节点的故障辨识模式，并指出故障类型辨别指标和物联技术是实

现边缘计算的关键,搭建了配电网故障辨识的边缘计算节点架构,分析了计算节点的工作流程。

泛在电力物联网是我国电网的发展方向,配电物联网是其重要组成部分,边缘计算是其重要的支撑部分,随着技术的不断成熟,对于边缘计算来说,面临最大的难点在于如何动态、大规模地部署运算和存储能力,以及云端和边缘设备端如何高效协同、无缝对接等现实问题,这将是一个有待拓展的领域。

参考文献

- [1] 刘健,张小庆,申巍,等.中性点非有效接地配电网的单相接地定位能力测试技术[J].电力系统自动化,2018,42(1):138-143.
- [2] 孟宪梁,刘勇,唐康平.现代配电网单相弧光接地过电压产生的机理与危害[J].电工技术,2016(11):30-32.
- [3] 艾绍贵,李秀广,黎炜,等.配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J].高压电器,2017(3):178-184.
- [4] 李海龙.入地电缆弧光接地过电压保护策略研究[D].重庆:重庆理工大学,2016.
- [5] 蒋东荣,李海龙,蒋伟,等.弧光接地过电压故障逻辑保护模型研究[J].西华师范大学学报(自然科学版),2016,37(1):75-81.
- [6] 王飞.小电流接地系统弧光接地模型及仿真研究[D].济南:山东大学,2016.
- [7] 冉锐.弧光接地过电压的快速识别与抑制研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [8] 刘聚财,耿蒲龙,曲兵妮,等.矿井供电系统弧光接地过电压影响因素研究[J].工矿自动化,2017,43(12):58-63.
- [9] 童奕宾,尤智文,李姝.小电阻接地系统间歇性弧光过电压分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(3):116-120.
- [10] 陈旭,梁策,刘美岑,等.不对称电网单相弧光接地过电压理论的研究[J].电测与仪表,2018,

15(8):1-6.

- [11] 吕红运.配电网弧光接地过电压与铁磁谐振过电压识别方法研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [12] 刘宗长.CPS、云计算、边缘计算在工业智能中的应用探索[J].软件和集成电路,2017(8):94-95.
- [13] 龚钢军,罗安琴,陈志敏,等.基于边缘计算的主动配电网信息物理系统[J].电网技术,2018,42(10):3128-3135.
- [14] 吕军,栾文鹏,刘日亮,等.基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J].电网技术,2018,42(10):3108-3115.
- [15] 舒印彪.开启建设具有卓越竞争力的世界一流能源互联网企业新征程[N].亮报,2018-1-29(1).
- [16] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网述评[J].中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
- [17] 任征东,栾文鹏,王鹏,等.基于IPv6的配电自动化系统通信网络架构[J].电力建设,2017,38(5):111-115.
- [18] 吕华章,陈丹,范斌,等.边缘计算标准化进展与案例分析[J].计算机研究与发展,2018,55(3):487-511.
- [19] 李彬,贾滨诚,曹望璋,等.边缘计算在电力需求响应业务中的应用展望[J].电网技术,2018,42(1):79-87.
- [20] 宋朋涛,李超,徐莉婷,等.基于个人计算机的智能家居边缘计算系统[J].计算机工程,2017,43(11):1-7.

作者简介



张增强

张增强,男,硕士,工程师,从事电网规划相关工作。

(收稿日期:2019-09-26) **EA**