

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191348

智能电网中的物联网技术应用与发展

何奉禄¹, 陈佳琦¹, 李钦豪¹, 羿应棋², 张勇军²

(1. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510700; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 随着智能电网与“互联网+”技术的深度融合和发展, 物联网技术在智能电网建设中的应用成为近年来研究的热点。首先介绍了物联网技术的概念, 总结了当前物联网技术在电力系统源侧、网侧和荷侧等三个方面中的主要应用。在此基础上, 从传感器、通信、云/边缘计算三个方面对物联网领域关键技术特点及其发展趋势进行了分析, 进而提出了未来物联网技术在智能电网数据采集、通信和计算处理方面的优势与应用前景。最后, 从物联网技术与智能电网深度融合的角度, 阐述了智能电网的发展愿景。

关键词: 物联网; 智能电网; 电力系统; 泛在电力物联网

Application and development of internet of things in smart grid

HE Fenglu¹, CHEN Jiaqi¹, LI Qin hao¹, YI Yingqi², ZHANG Yongjun²

(1. Guangzhou Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510700, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With the deep integration and development of smart grid and "Internet +" technology, the application of the internet of things technology in the construction of smart grids has become a research hotspot in recent years. Firstly, the concept of internet of things technology is introduced and the internet of things technology is summarized in the applications of three aspects in power system. The key technical characteristics and development trends of the internet of things are analyzed from three aspects: sensor, communication and cloud/edge computing. Then the advantages and application prospects of future internet of things technology in smart grid data acquisition, communication and computational processing are proposed. Finally, from the perspective of the deep integration of internet of things technology and smart grid, the prospect of smart grid is proposed.

This work is supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2017A030313304).

Key words: internet of thing; smart grid; power systems; ubiquitous power internet

0 引言

近年来, 随着电力负荷的快速增长, 间歇性电源的高比例接入, 全球极端天气加剧等问题的增多, 传统电网的安全稳定运行已受到巨大挑战。针对上述情况, 发展更加智能的电网, 将先进的通信、信息和控制技术应用于传统电网, 解决源侧、网侧和荷侧三方面的重难点问题将成为未来电网建设的主要任务与挑战。

物联网概念由 Kevin Ashton 教授最早提出, 早期的物联网是依托 RFID 技术的物流网络^[1]。随着技术和应用的发展, 物联网的内涵已经发生了较大

变化, 国际电信联盟发布的《互联网报告 2005: 物联网》认为, (1) 目前的三大网络, 包括互联网、电信网、广播电视网是物联网实现和发展的基础, 物联网是在三网基础上的延伸和扩展; (2) 用户应用终端从人与人之间的信息交互与通信扩展到了人与人、物与物、物与人之间的沟通连接^[2]。

智能电网由美国首先提出, 美国电科院于 2000 年前后提出了 Intelli-Grid 的概念, 认为这是未来电网发展的态势和解决 21 世纪电网面临的各种问题的途径^[3]。智能电网具有自愈、互动、优化、兼容、集成的特征^[4]。目前, 国内外对智能电网的研究仍属于热点。国家电网公司将智能电网定义为以特高压电网为骨干网架, 各级电网协调发展的坚强电网为基础, 利用先进的通信、信息和控制技术构建统

基金项目: 广东省自然科学基金项目资助(2017A030313304)

一坚强的智能化电网^[5]。南方电网公司定位要构筑一个安全、可靠、绿色、高效的智能电网,以提高电力系统安全稳定水平,提高系统和资产的运用效率,提高用户侧的能效管理和优质服务水平,提高资源优化配置和高效运用能力,促进资源节约型、环境友好型社会发展为目标^[6]。

智能电网建设涉及面广,面临的问题较多,完全依靠传统技术很难满足其需求,因此更需要云、大、物、移、智等新兴技术支撑。由此能源互联网的概念应运而生^[7-9],成为智能电网更开阔的发展空间。其中,物联网技术作为当前科技领域的热点技术,已有不少学者分析和探讨其在电力领域中的应用现状和前景^[9-10]。

作为智能电网和物联网相互融合的产物,随着泛在电力物联网概念的提出,国家电网公司发布《泛在电力物联网白皮书 2019》,将泛在电力物联网建设分为两个阶段,重点构建能源生态、迭代打造企业中台、协同推进智慧物联、同步推进管理优化,最终实现到 2024 年建成泛在电力物联网^[11]。并提出了《配电物联网技术发展白皮书》,实现了物联网和配电网的融合,对配电物联网关键技术的规模化工程应用和场景进行推广。

目前,在众多实施的泛在电力物联网应用项目中,嘉兴乌镇电力物联网作为重点园区级综合示范项目,实现了智慧路灯、电动汽车智慧车联网、全感知配电房等多种场景的应用,建立了全景智慧用电平台,实现数据共享,服务城市管理、百姓生活。有利于智慧城市的建设^[12]。浙江无锡作为国内唯一的国家级物联网示范城市,系统规划了物联网产业发展,促进以物联网为龙头的新一代信息技术与工业、经济、城市治理深度融合,形成一系列“让城市生活更美好”的智慧解决方案和运营管理模式。国网上海电力将泛在电力物联网应用于进博会的供电保障中。实现更快、更精准地发现设备问题,从而大大提升保电工作的效率及能力。

智能电网与物联网的融合是顺应数字化浪潮的必然结果,挖掘电力在源网荷三方面的数字属性,提高电力数据的应用价值,可以帮助电网实现更高质量、更有效率的发展。泛在电力物联网以数字技术为传统电网赋能,不断提升电网的感知能力、互动水平和运行效率,有力支撑各种能源接入和综合利用^[13]。随着物联网技术的不断发展,特别是智能传感器、低功率广域通信技术以及边缘/云计算等技术的成熟,未来物联网技术在智能电网建设中的应用需进行进一步的思考。

基于此,本文介绍了物联网在电力系统源侧、

网侧和荷侧三方面中的主要应用。然后从传感器技术、通信技术和云/边缘计算角度分析了物联网技术在智能电网发展中的应用。最后结合技术发展趋势与未来电网需求,阐述了智能电网的发展愿景。

1 当前物联网技术在电网中的应用

目前电网经过多年的建设已经成为联系到千家万户的每一台电器,实现物联网的物质基础非常具备。简单来说,建设智能电网需要在现有电网上增加传感测量技术、集成通信技术和高级控制方法,而物联网本身就是这三者的有机结合,因此物联网技术可以和智能电网高度融合,二者相辅相成。

传统物联网侧重于设备之间的关联,即利用传感器将各种设备与资产连接到一起,对关键设备的运行状况进行实时监控。物联网和智能电网的相互融合,赋予了双方新的特征。首先,物联网与智能电网的融合,使物联网更注重用户之间以及用户与电网之间进行实时连接和互动,并实现对数据信息的收集分析和实时高速传输。其次,物联网应用于智能电网也使物联网加强了其智能处理和决策支持功能,智能电网需要物联网来分析诊断电网和电网设备的运行状况,进而进行决策去排除和避免电力故障。最后,物联网在智能电网的应用也加强了智能电网的数据处理能力,由于物联网与智能电网都以信息传输为基础,均需要对海量信息进行智能处理,最终实现终端设备的实时响应处理,但智能电网主要应用在电信息采集控制及用电服务系统等方面,而物联网主要应用在实体属性信息及控制信息交互^[14],显然,物联网更侧重于数据处理,与智能电网的融合可以更好地实现电网海量数据的处理。因此,物联网技术可以全面提高智能电网各环节的信息化程度,促进智能电网的发展。

本节从源侧、网侧和荷侧三方面论述物联网通过传感器技术、通信技术、云/边缘计算技术等的支持在电网运行中的不同应用。源侧、网侧和荷侧三方面的通信方式如图 1 所示。

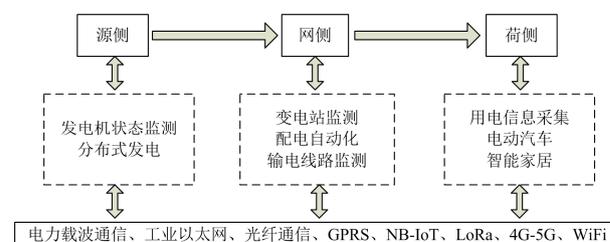


图 1 源-网-荷通信方式

Fig. 1 Communication methods of source-network-load

1.1 源侧的应用

物联网技术在电源侧的应用主要体现在传感器应用及对发电机实时状态监测,主要分成传统电源和分布式电源两个部分的应用来阐述,其中通信一般依靠工业以太网来实现。

对于传统电源方面,物联网技术可以应用于对发电设备进行远程故障诊断,文献[18]设计了发电设备远程监测系统,能够检测发电机组的实时情况,并根据机组的异常情况查找故障原因。

对于分布式电源方面,物联网技术可以对风能、太阳能等新能源发电进行监测和调节,从而使新能源更好的并网接入和运行。在光伏发电方面,文献[19]可以实现对偏远地区的光伏系统进行监测和控制。文献[20]除了可以实现光伏系统的监测,还可以实现对光伏系统中最大功率点的跟踪。在风能发电方面,由于风电场具有单机数目大、分布地区广且大的特点,因此需要长时间频繁维护。若将物联网技术应用于风电场组网,则可以大大降低其运营维护的成本,文献[21]提出了基于物联网的风电机组状态视频监控系統,可以全面地监视设备运行状态。文献[22]利用物联网中的深度学习模型实现预测和诊断风力发电的故障,能够提高风力发电机组的运行安全性和可靠性并减少成本。

总而言之,在电源侧物联网可以加快新能源的发展,规范新能源的并网和运行,但目前基于物联网开发出的这些监测系统仍存在系统不够完善、故障率较高的问题,且在通信方面,由于分布式电源具有随机性、点多面广等特点,可能会造成实时数据采集负担、远程监测数据滞后等问题。因此,物联网在电源侧的应用需要改进的是加强监测系统系统的可靠性以及系统的数据传输和处理能力。

1.2 网侧的应用

传统物联网技术在输电侧的应用主要体现在对输电线路状态的监测及线路安全检修管控,其中通信一般依靠专用通信网(光纤网络)或通用分组无线服务(General Packet Radio Service, GPRS)网络。物联网在输电侧的应用可以解决目前监测系统存在的运行维护费用高、数据传输率低等问题,从而提高输电效率。

对于输电线路的通信方面,目前基于物联网技术的各种监测系统的区别在于数据采集的方式不同或传输的通信方式不同。文献[23-26]通过对不同物联网通信技术的组合,从而实现对长距离输电设施的信息传输和监控。对于高压线路的监测方面,文献[27-28]实现了高压输电线路的在线监测,通过对

高压线路的参数测量,提高了其通信稳定性和安全性,但仍存在电磁干扰、防潮、防雷以及各种自然环境等防护问题。对于输电塔的保护方面,文献[29]设计了输电塔保护系统,可以实现对高压骨干输电塔的故障分类、定位和预警。

在变电侧的应用主要是对变电站电气信息、状态信息和操作信息进行监控预警,一般通过光纤或工业以太网进行通信。

在变电设备监测方面,物联网的应用可以解决传统变电设备监测装置相互独立、数据无法共享、计算负荷分配不均及不具备故障初步诊断功能的问题。文献[27-30]均实现了对变电站内主要变电设备的实时监测和对存在的故障隐患进行报警和预警,文献[30]针对智能变电站设备提出全面的全景信息建模方案,提高了设备性能。文献[31]通过计算传感数据的可信度,可以防止异常数据导致变电设备的故障。文献[32]利用红外图像与可见光图像配准方法,实现对变电设备异常状态监控。文献[33]设计了基于工业物联网的高速监控系统,实现远程可视化。在变电站通信方面,文献[34]和文献[35]都对传感器网络进行设计,实现了变电站数据智能分析、远程控制的功能。

在配电侧的应用包括对设备提供智能管理,对电力设备的运行状态进行监测,支撑配电自动化的实现,目前配网自动化中的通信主要是依靠光纤,没有条件的地方则主要依靠 GPRS 无线公网。

在设备状态监测方面,物联网技术可以对配电网中的设备运行状态、运行环境状态进行监测,有助于提升电网安全运行水平。对于目前输变配电设备监测存在人工定期检测作业方式效率低、人工监测方式存在监测不到位的问题。文献[36-40]实现了对输变配电设备状态的在线运行监测和智能管理,比传统监控方案更能确保设备信息感知与监控之间的信息可靠交互。在配电自动化方面,文献[41]和文献[42]利用云计算实现了配电自动化,提高了网络的带宽及减少延迟。文献[43]将物联网技术应用于主动配电网,提高主动配电网的效率和可靠性。

总而言之,物联网技术的应用有助于提高网侧的运维水平和智能化程度,提高了智能变电站的运行管理水平,实现灾害的实时监测和预警。但物联网技术在输电侧应用仍存在通信传输速率较低以及信息在传输过程中被遮蔽等问题;在变电侧的应用存在设备之间电磁干扰以及传感器选择和安装等问题;在配电侧的应用存在监测系统数据准确率较低的问题、复杂采集网络的控制问题,以及智能终端

选型、投资布点的问题。因此,物联网在输电侧应用需要改进的是加强对气象等影响因素的监测和提高数据实时传输的效率;在变电侧应用需要改进的是传感器的配置,以及解决通信干扰的问题;在配电侧应用需要改进的是监测系统的通信问题,提高系统的传输效率和准确性以及配网智能设备布点的合理规划。

1.3 荷侧的应用

物联网在负荷侧的应用最显著是低压抄表方式的转变,除此之外,物联网可以实现在用电安全管理、用电安全方面的应用,进一步推动了智能家居、智能建筑方面的发展。

在智能用电服务方面,智能用电服务系统是智能电网建设在用户侧的重要组成部分,物联网技术有助于提升电网与用户的互动,提升用户的生活质量,文献[44]构建了双向互动服务总体构架,实现电力流、信息流和业务流的双向互动。文献[45]设计了一种基于多种通信方式混合组网的智能用电服务系统,也有效地提升了电网和用户的互动。文献[46]利用 ZigBee 技术进行用电信息采集,针对用户不同的用电特点,为制定节能方案提供有力支持。

在智能家居、电动汽车方面,文献[47]设计了基于实时电价的智能用电系统,还能达到平稳的电力负荷、提高能源利用的效果。在智能家居方面,文献[48]设计了一个基于 B/S 架构的物联网智能家居系统,实现对智能家居系统的应用。文献[49]利用物联网实现楼宇智能化。但物联网在用电侧的应用仍存在数据采集的效率问题和安全问题。文献[50]设计了智能低成本家庭自动化系统,可以实现家庭用电监控计量以及在线计费。

在电动汽车方面,物联网技术也促进了电动汽车充电技术的发展。文献[51]设计了充电导航路径选择模型,可以为电动汽车出行者制定快捷方便合理的充电导航路径。文献[52]提出一种物联网架构,有助于电动汽车智能充换电服务网络的运营。

由此可见,物联网技术能有效提升负荷侧的用电效率和安全用电管理水平。但是,物联网现有应用存在用电数据挖掘不够全面、用电信息安全性等问题,因此,物联网在负荷侧应用需要改进的是进一步对用电数据进行深入挖掘,从而获取有价值的用电信息,以实现高级应用。

综上所述,传统物联网技术在电网的源侧、网侧和荷侧三方面都有不少应用,随着物联网技术的不断发展,未来其应用场景也会更加丰富。

2 电力物联网关键技术

物联网三个关键技术是物联网整体架构的重要组成部分,三者是各类应用环节的技术基础,为物联网中数据的传输作了重要支持。传感器作为数据获取的源头,通信技术组成了数据传输网络,边缘计算提高了数据的传输速度,云计算是数据处理和管理的平台,从而使海量的电力数据在泛在电力物联网中变得更加可靠、更加高效,最终实现电力数据的综合应用。

三个关键技术的交叉应用,也为物联网在智能电网中的应用提供了更大的空间。传感器与边缘计算的结合,可以及时处理和分析更靠近生成数据源的数据,使数据处理变得分散,从而降低数据的延迟和管理成本。传感器与 LPWAN 技术等先进通信技术的结合,有利于分布式电源的运维,可以解决风电场范围广大且分布稀疏导致的运维成本高的问题。通信技术与云计算的结合,提高了通信的质量和计算量,从而提高了网络优化的效率。物联网三个关键技术使物联网具备了控制功能、传输采集通信、智能化边缘计算等性能,从而使得物联网的通信对象范围得到拓展和扩大,将原有的人与人的互联最终转化为人和世界万物的联系。

2.1 传感器方面

传统传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并按一定规律变换后输出,典型的器件有电阻应变式传感器、电荷耦合器件、霍尔传感器等。随着传感器不断发展,具有信息处理功能的智能传感器占据较大的应用空间,智能传感器也是物联网获取外界信息的重要途径^[53]。与传统传感器相比,智能传感器具有高精度、高可靠性、自适应性强等优势^[54]。

目前,小微智能传感器是传统传感器的发展方向,小微智能传感器是传统传感器与微处理机相结合的产物,也称为巨磁阻传感器(Giant Magneto Resistance, GMR),具有采集、处理、交换信息的能力,因其具有的特低功率、便于安装、抗干扰等特点使智能电网透明化运行成为可能。因此,可以利用小微智能传感器解决传感器在物联网中的应用瓶颈,例如将小微智能传感器应用于物联网的感知层,实现智能电网的大数据测量和收集,进一步拓展传感器在物联网中的应用范围。小微智能传感器作为透明电网最重要的单元,仍存在电压测量、功率较大等问题,其未来将要突破的瓶颈是自行实现能量的补给以及电压测量的问题。

除此之外,物联网技术在智能电网中的应用还有无线传感网络,它通过节点内置传感器进行采集和处理网络覆盖区域中的目标信息^[55]。无线传感器网络具有自组织性、抗干扰能力强等特点,它能为物联网带来传感、互通和驱动的高性能^[56]。但无线传感器网络也存在一定的缺陷,首先不同应用场合下无线传感器网络的结构和协议不同,需要设计相同的标准接入到电力通信网;其次无线传感器网络在电网中会受到电磁干扰,可能会导致数据采集和传输过程中出现失误,需要完成电磁兼容的可行性设计;最后无线传感器网络节点需要持续的能量供应,若将小微智能传感器与无线传感器网络相结合,从中可以挖掘小微智能传感器在智能电网中可能的应用点^[57]。目前,无线传感器网络已经开始逐步应用于智能电网的数据收集的场景中,如无线自动抄表、远程系统监控、设备故障诊断等。

2.2 通信方面

传统物联网中一般针对距离的远近采用不同的通信技术,在局域网的场景中,一般采用短距离无线通信技术如WIFI、蓝牙等,具有易部署、功耗低、速率高的特点,但应用距离有限。在范围较广的连接中,可以采用移动蜂窝网通信技术如3G、4G,虽距离远、覆盖广、速率高,但功耗大、成本高。除此之外,传统物联网还存在多种通信技术的融合问题^[58]。针对传统物联网通信技术功耗与距离无法兼容、信号串扰等问题,未来通信技术将向高传输速率、低功耗、远距离、减少干扰等方向发展。其中具有代表性的未来通信技术有:宽带载波、5G、低功耗广域网络(Low-Power Wide-Area Network, LPWAN)等。

2.2.1 宽带载波通信技术

宽带载波通信技术采用先进的正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM),即一种通信编码技术,利用覆盖范围最为广泛的电力线作为高速数据通信的载体,可以免布线、低成本地实现用户的数据终端接入宽带通信网络^[59]。相较于目前的窄带载波技术而言,宽带载波拥有三大核心优势:高频点、远离电力线干扰;多载波、自动规避干扰;高速率、减少通信延时。宽带载波通信技术可以解决多台变信号串扰问题,可以更好地支撑智能用电。除此之外,宽带载波通信技术可以为智能配电网中信息采集等场景提供高速可靠的信息通道。若将其应用于中心城区的中压电缆,可以满足配电系统中海量数据的传输要求,解

决通信速率较低的问题^[60]。

2.2.2 5G 通信技术

5G是实现物联网的关键技术,可以解决海量无线通信需求,将采用包括大规模天线阵列、超密集组网、新型多址、全频谱接入和新型网络架构在内的一组关键技术,以满足各种场景的差异化需求,文献^[61]对此提出了应用于5G大规模物联网连接的网络框架。低功耗宽连接和低时延高可靠场景主要面向物联网业务,是5G新拓展的场景,重点解决传统移动通信不能很好地支持物联网及垂直行业应用的问题。5G系统具有超高传输速率、超大容量带宽、低延时低功耗的点对点传输等特点。可以应用于分布式电源发电状况的监测,提高能源的利用率;电缆的状态评估,有利于发现和预防故障发生;无人机巡检输电线路,可以拍摄更多更高清的图片视频,提高巡检可靠性;还可以应用于智能变电站、变电站机器人、配电自动化等场景。

2.2.3 低功耗广域物联网(LPWAN)技术

LPWAN可以优化物联网应用中的M2M通信场景,是以星型网络覆盖,支持单节点最大覆盖可达100 km的远程无线网络通信技术。LPWAN的特点在于覆盖远、功耗低、低带宽以及可以使用非同步通信^[62]。LPWAN在网络配置方面有很大的灵活性,可以支持定位服务和移动对象,并具有抗干扰的能力。LPWAN可以应用于源网荷互动、电气设备温度监测、配电故障指示器等,还可实现包括发电厂、变电站、电动交通基础设施、分布式发电运维、环境监测等能源互联网业务的海量小数据连接需求。

2.3 云计算方面

云计算技术。云计算利用网络计算将多个计算机实体集成到一个强大的计算系统中,并通过相关技术将超级计算能力分配给最终用户^[63]。与传统计算模型相比,云计算具有高速互联网传输能力、接近无限存储和计算能力强等优势^[64]。可以将云计算应用于电网调度、电网信息通信、电力数据存储等,实现海量数据的存储和处理以及处理平台的统一管理和弹性扩容。

2.3.1 智能电网调度系统

随着智能电网的建设,电网结构变得越来越复杂,规模也越来越大,为了对电网进行实时监控和调度。如何对大量智能监测终端所产生的大规模运行数据信息进行实时可靠的采集、传输、存储和管理就显得十分必要。

在电网调度运行分析的过程中,以云计算为核心,以统一模型的数据库为依托,采用相应的服务

总线技术,把分布在各个局站的调度子系统的数据和功能,用系统结构化的架构整合在一起,构建具有实时性强、可靠性高的电网调度云计算平台^[65]。从而实现对不同的调度中心实现数据共享,支撑支持系统的高效运行,满足大计算量应用的需求。以及对大规模信息数据可靠高效的存储和管理^[66]。

2.3.2 电网大数据分析平台

随着智能电网的规模日益扩大,各种智能电表、传感器、信息系统等异构分布式数据源持续不断地产生海量数据如用户用电数据、调度运行数据、设备监测数据等,被称为电力大数据^[67]。除此之外,分布式电源和电动汽车的大量接入,也会为电网注入更多的数据流,从这些数据中可以得到有应用价值的信息。

目前,智能电网中安装了许多智能化的测量装置,从中产生了海量数据。而传统的电力数据分析系统大多基于关系数据库,分析速度慢且可伸缩性差,难以适应智能电网时代电力大数据对数据存储与分析的需求,已成为智能电网建设的瓶颈,因此,电网大数据分析平台应运而生。

电网大数据分析平台一般可以分为数据载入与处理、数据组织与存储、数据交互式分析与展示三个部分,主要利用大数据处理技术实现数据的有效处理和分析^[68]。文献[69-71]主要结合云计算技术、分布式联机分析处理等大数据处理技术实现对电力用户侧、电力设备状态的大数据分析。电网大数据分析平台可以增加电网的透明度,使运行状态透明化,在此基础上,结合其他不同的信息源也会有更深层次的应用,如电力系统智能安防、用户行为分析、大用户节能服务、用户窃电行为挖掘、需求侧管理等。

2.4 边缘计算方面

边缘计算的“边缘”指的是在数据产生源头和云中心之间任一具有计算资源和网络资源的路径^[72]。边缘计算旨在将计算资源推向更靠近网络边缘的位置,其目标是改善网络延迟并确保执行任务的效率^[73]。这样能够快速响应用户请求,并实现较低的时延和较高的带宽。边缘计算可以使许多控制从集中式云转移到边缘,实现物联网对海量数据的实时分析。当电力系统出现不正常运行或发生故障时,传统方式是将海量信息上传到集中式系统进行处理,这就对计算机的数据处理能力提出了很高的要求,而云/边缘技术就可以解决此问题^[74]。除此之外,还可以将边缘计算应用于智能家居、传输线路监测、智能变电站等,提高系统效率和实时性^[75]。当前,边缘计算的研究主要集中在移动边缘网络、雾计算、边

缘云等方面,移动边缘计算成为未来的研究重点^[76]。

2.4.1 非侵入式负荷监测

非侵入式负荷监测支撑户内用电数据采集、电能质量监测与源头识别和支持用户参与需求侧响应。传统的侵入式负荷监测系统把传感器安装至各个负荷处,监控每个负荷的运行情况。而非侵入负荷监测的特点是硬件较简单、分析软件较复杂,分析软件能够对采集数据进行数学分析,从中获得有用的信息。因此,只需在用户的电表加入此模块,就能够实现对一个用户所有负荷的在线监测和解耦^[77]。非侵入式负荷监测可为用户提供用能状况分析等多种用能服务,实现用户间接管理,提高用能效率,实现用能策略优化;可以实现对电动机类负荷的非侵入式故障诊断;可以利用负荷构成信息和变化情况实施需求响应,并可以应用于变电站层的扩展及应用^[78]。面对分布广泛且群体庞大的电力低压用户,若将边缘计算应用于非侵入式负荷监测,并将处理好的数据传输至云服务器,有利于将数据在用户侧进行处理,减少数据传输负担,有助于实现实时负荷数据监测。

2.4.2 输电线路设备智能监控

针对配电网具有结构复杂、点多面广的特点以及电网监控存在的问题。目前大部分解决方案是将采集的图片信息上传至服务器进行分析,但视频图像传输量大且有效信息少,会占用和浪费大量网络资源,利用边缘计算可以在后端配备计算能力较强的计算单元,使用回传数据进行深度学习,建立模型,减少大量无用数据的传输,增强异常检测能力^[79]。

因此,边缘计算聚焦实时、短周期数据分析的特点,更适合实时的数据分析和智能化处理。除此之外,对于配电线路设备数量多以及管理的问题,通过边缘终端部署边缘计算对原始数据进行处理,从而降低数据传输带宽及处理成本。并能将设备正常模型下发到边缘侧,对边缘侧的数据传输进来与模型进行匹配,从而实现预测性维护,提高设备的可靠性^[80]。

上述三种物联网关键技术的发展使得以前一些不可能实现或解决的问题有了新的转机,也使得未来智能电网发展有了新的契机,使未来电网更加智能化。

首先,物联网技术可以成为解决电力大数据的一大利器。随着我国智能电网不断发展,发电侧、电网侧和用户侧产生了海量数据,对电网的监控、调度和管理带来了巨大挑战。如何对电力系统中多种类型的数据进行有效的分析和管理的成了急需解决的问题。通过传感器技术将产生的数据进行收集,

利用通信技术将数据传送到主站,对各项数据进行分析 and 可视化展示,有利于电网相关人员及时洞察已存在的异常和潜在的故障,实时准确地监测电网的运行状态,有利于提高电网的可靠性。除此之外,传统的集中式控制模式已无法满足海量数据的传输处理要求,利用边缘计算在网络边缘侧进行智能处理,可降低对主站系统的压力,提高数据传输的实时性、准确性和安全性。

其次,物联网技术可以促进与用户交互的智能用电模式的推广。随着我国人民生活质量的提高,人们对供电质量要求也越来越高,传统的配网运行管理手段已难以有效保障低压配网的安全可靠经济运行以及用户的正常用电。如何在满足人民用电需求的同时提供高质量的供电服务是目前用电侧需要解决的问题。物联网的出现有利于用电侧的管理,通过物联网可以对用户及配电网运行状态进行准确的测量,以保障智能用电的实施,及时处理收集的数据,对用电的交互也提供了保障。

最后,物联网技术可以降低分布式电源等新能源接入带来的风险。随着新能源在电网中的接入和应用,对配电网造成较大的影响,使之运行状态和特性发生了新的变化。分布式电源出力的随机性、间歇性和波动性会造成配电网功率和电压波动,对配网运行控制和保护带来了一定的挑战。物联网技术通过对分布式电源进行实时监测,及时进行调整,从而提高用户的电能质量水平。

综上所述,传统电网的运行控制模式已不能适应智能电网的发展,物联网技术是提高电网运行智能化水平、提高电网调度控制的高效性、保障电网安全运行的重要途径。

3 智能电网的发展愿景——透明配电网和泛在电力物联网

3.1 透明配电网

当前,能源互联网的发展出现了新的趋势,即李立涅院士在 2018 盐城绿色智慧能源大会上提出的“透明电网”方向,透明电网通过各种“互联网+”技术的综合运用,使电网运行透明可观可测^[81]。区别于运行数据少和设备状态不可见的传统配电网,透明配电网是近年来伴随着数据采集、数据传输及数据分析技术在配电网深度应用而出现的一种新的配电网形态。

物联网技术是构成透明配电网的重要基础,能为透明配电网提供有力的技术支持。透明配电网以全面的数据监测为基础,为了实现配电网的透明化,

要求数据全面且数量足够多,而传统的测量装置无法实现大量数据的测量和实时传送,此时物联网便可以发挥其独有的优势。传感器技术可以解决透明配电网数据采集的需求,实时采集海量数据,实现配电网的数据透明。通信技术例如 LORA、NB-IOT 可以解决透明配电网的通信需求,可以实时传输可靠的数据,从而实现配电网的状态透明。云/边缘计算可以解决透明配电网海量数据处理的需求,快速处理上传海量数据,从而实现配电网的态势透明。因此,物联网技术的发展将使配电网透明化成为可能。

3.2 泛在电力物联网

国家电网近期提出来的“泛在电力物联网”理念,其实质与透明电网特别是透明配电网的内涵高度吻合,即围绕电力系统各环节,充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术、先进通信技术,实现电力系统各环节万物互联、人机交互,具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活特征的智慧服务系统^[82]。

传统物联网架构采用的是分层体系,分为感知层、网络层、应用层三层,对应的层次特征分别是全面感知、可靠传递、智能处理。泛在电力物联网是物联网在智能电网高级应用的体现,可以分为感知层、网络层、平台层、应用层这四层结构,结构如图 2 所示。感知层通过传感器技术负责数据采集和处理,利用边缘计算处理一些区域化的计算任务,从而减轻平台层服务器的计算压力,提升实时性和建立统一的终端操作系统是未来感知层的发展方向。网络层负责对感知层和平台层之间的数据进行传输,利用多种通信方式实现数据的可靠传输与灵活调度,提高信息的传输速度和流量,电力载波通信技术和 5G 技术是未来网络层的发展方向。平台层通过云计算技术负责数据高效处理和物联管理,是实现高级应用的基础,提高协同计算与实时响应能力是未来平台层的发展方向。应用层实现电网的生产运营、经营管理和相关的用能服务,如微网运行管理、电动汽车的运营管理、园区能源管理等,跨专业的物联管理是未来应用层的发展方向。泛在电力物联网的建设为大数据与人工智能在能源互联网领域的应用打下了基础。

泛在电力物联网在电网三个方面尤其是荷侧有更好的表现。目前对荷侧的感知还不够深入,从低压侧只能获取到电量数据,若能得到更多类型的数据,从而可以针对不同类型的用户用电情况进行更精确的分析,通过对电量负荷曲线等规律研究,深入挖掘荷侧海量数据的应用价值。首先,可以实现

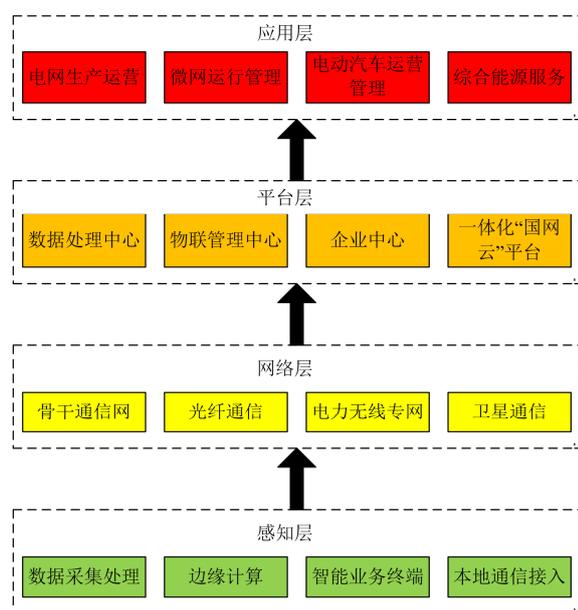


图 2 泛在电力物联网架构

Fig. 2 Structure of ubiquitous power internet of things

智能用电、智能家居应用, 增加与用户的互动, 提高用户的生活质量; 其次, 可以实现数据的商业价值, 比如商家可以针对不同电量的用户生产销售对应的电气设备; 进一步实现更高级的应用, 最终实现电气互联到信息互联的转变。泛在物联网最大的目标就是从电表、用户、电网的互联变成所有电气设备与人的互联即万物互联。目前泛在电力物联网仍存在感知层的传感器数据准确性、网络层数据传输的及时性以及大量数据接入存储带来的电力数据安全等问题, 若能解决上述问题, 泛在电力物联网将会有更全面的应用空间。

4 结论

物联网技术将电力系统的各个元素紧密地、有机地联系起来, 不断促进电力系统的自动化、信息化和智能化。传感器技术、通信技术与云/边缘计算技术等物联网关键技术 in 电力系统源侧、网侧和荷侧三方面的深化应用和扩大影响, 推动了电力系统实现全面可观可测、可调可控。随着物联网技术的进一步发展和突破, 未来物联网在智能电网具有巨大的应用空间。在物联网技术的支撑下, 智能电网将会朝着透明运行和泛在物联网的形态发展。

参考文献

- [1] AutoID Labs homepage[EB/OL]. <http://www.autoidlabs.org/>.
- [2] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.
- [3] 胡学浩. 智能电网—未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
HU Xuehao. Smart grid—a development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 1-5.
- [4] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xingyuan, WEI Wei, WANG Yuhong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [5] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [6] 饶宏. 南方电网智能电网发展展望[EB/OL]. [2018-01-26]. <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20180126/627018.shtml>.
- [7] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7.
ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, CAI Zexiang, et al. New generation of cyber-energy system: energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.
- [8] CHEN Z, ZHANG Y, JI T, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 495-508.
- [9] HA T T, ZHANG Y J, THANG V V, et al. Energy hub modeling for minimal energy usage cost in residential areas considering solar energy and BESS[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 389-399.
- [10] 杨成月. 基于物联网与空间信息技术的电网应急指挥系统[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1632-1638.
YANG Chengyue. Power grid emergency command system based on internet of things and spatial information technologies[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1632-1638.
- [11] 曾鸣, 王雨晴, 李明珠, 等. 泛在电力物联网体系架构及实施方案初探[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 1-7, 58.
ZENG Ming, WANG Yuqing, LI Mingzhu, et al. Preliminary study on the architecture and implementation plan of widespread power internet of things[J]. Smart

- Power, 2019, 47(4): 1-7, 58.
- [12] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [13] 萧展辉. 面向智能电网的物联网应用体系建设[J]. 广东电力, 2012, 25(8): 1-5, 11.
XIAO Zhanhui. Construction of smart grid oriented application system of IOT[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(8): 1-5, 11.
- [14] 《泛在电力物联网白皮书 2019》摘要[N]. 国家电网报, 2019-10-15(002).
- [15] 泛在电力物联网应用加速落地[EB/OL]. [2019-10-29]. http://m.xinhuanet.com/tech/2019-10/29/c_1125163991.htm.
- [16] 马佳. 算法+互联: 泛在电力物联网如何定义能源新生态[N]. 国家电网报, 2019-10-24(001).
- [17] 唐忠, 杨春旭, 崔昊杨. 智能电网关键技术及其与物联网技术的融合[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(5): 459-462.
TANG Zhong, YANG Chunxu, CUI Haoyang. Prospect of key technology of smart grid and its integration with internet of things technologies[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(5): 459-462.
- [18] 刘立伟, 司冬雨, 白洁. 基于 LabVIEW Web 服务的物联网发电设备远程监测系统应用[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(10): 82-84.
LIU Liwei, SI Dongyu, BAI Jie. Application of power equipment remote monitoring system on internet of things based on LabVIEW web serves[J]. Instrumentation and Measurement, 2014, 33(10): 82-84.
- [19] KUMAR N M, PALAPARTHI K A S. Internet of things (IoT) in photovoltaic systems[C] // 2018 National Power Engineering Conference (NPEC), March 9-10, 2018, Madurai, India: 1-4.
- [20] ROUIBAH N, BARAZANE L, MELLIT A. A low-cost monitoring system for maximum power point of a photovoltaic system using IoT technique[C] // International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems, IEEE, May 30, 2019, Fez, Morocco, Morocco: 1-5.
- [21] CHEN F, FU Z, YANG Z. Wind power generation fault diagnosis based on deep learning model in internet of things (IoT) with clusters[J]. Cluster Computing, 2018: 14013-14025.
- [22] 陈晓磊, 徐小力, 吴国新. 物联网架构下风力发电机组远程状态监测系统[J]. 风机技术, 2013(1): 63-66.
CHEN Xiaolei, XU Xiaoli, WU Guoxin. Design of internet of thing structure remote condition monitoring system for wind turbines[J]. Fan Technology, 2013(1): 63-66.
- [23] CHEN X, SUN L, ZHU H, et al. Application of internet of things in power-line monitoring[C] // 2012 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, October 10-12, 2012, Sanya, China: 423-426.
- [24] PATHIRIKKAT G, BALIMIDI M, MADDIKARA J B R, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
- [25] ALHEBSHI F, ALNABILSI H, ALZEBALDI J, et al. Monitoring the operation of transmission line in a smart grid system through IoT[C] // 2018 15th Learning and Technology Conference (L&T), February 25-26, 2018, Jeddah, Saudi Arabia: 139-146.
- [26] DING Cheng, XU Siya, CHEN Xingyu, et al. A delay and load-balancing based hierarchical route planning method for transmission line IoT sensing and monitoring applications[C] // 2019 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM), April 8-12, 2019, Arlington, VA, USA: 207-215.
- [27] SHEN X, CAO M. Research and application of internet of things for high-voltage transmission line[C] // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 23-26, 2014, Shenzhen, China: 889-893.
- [28] HSU T S, CHIU H C, YANG Y C, et al. An IoT-based sag monitoring system for overhead transmission lines[C] // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), March 19-23, 2019, Bangkok, Thailand: 515-519.
- [29] ZHEN Y, LI X, ZHANG Y, et al. Transmission tower protection system based on internet of things in smart grid[C] // 2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), July 14-17, 2012, Melbourne, VIC, Australia: 863-867.
- [30] 艾精文, 党晓婧, 吕启深, 等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 122-128.
AI Jingwen, DANG Xiaojing, LÜ Qishen, et al. Research on full dimension equipment status monitoring system with panoramic function[J]. Power System Protection and

- Control, 2019, 47(16): 122-128.
- [31] LIU Dongqi. A creditability-based intrusion tolerant method for protection equipment in transformer substations[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 1489-1492.
- [32] 漆灿, 李庆武, 郑云海, 等. 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 135-141.
QI Can, LI Qingwu, ZHENG Yunhai, et al. Infrared monitoring system for substation based on intelligent visual internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 122-128.
- [33] ZHAO L, MATSUO I B M, ZHOU Y, et al. Design of an industrial IoT-based monitoring system for power substations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5666-5674.
- [34] 郭春明, 程亮, 田章超, 等. 基于物联网的变电站在线监测系统[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4): 110-114.
WU Chunming, CHENG Liang, TIAN Zhangchao, et al. On-line monitoring system for substation using internet of things[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(4): 110-114.
- [35] TIAN Yu, PANG Zhenjiang, WANG Weibin. Sensing monitoring system based on power internet of things[C] // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), December 15-17, 2017, Chengdu, China: 1613-1617.
- [36] 韩四满, 李秀广. 基于物联网的输变配电在线监测技术研究及应用[J]. 物联网技术, 2014(11): 16-18.
HAN Siman, LI Xiuguang. Research and application of on-line monitoring technology for transmission and distribution based on internet of things[J]. Internet of Things Technology, 2014(11): 16-18.
- [37] JADHAV R V, LOKHANDE S S, GOHOKAR V N. Monitoring of transformer parameters using internet of things in smart grid[C] // 2016 International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), August 12-13, 2016, Pune, India: 1-4.
- [38] ZHANG Y, LIANG K, ZHANG S, et al. Internet of things for power transmission and distribution-intelligent monitoring and full lifecycle management[C] // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 23-26, 2014, Shenzhen, China: 898-901.
- [39] 张军永, 黄小庆, 曹一家, 等. 输变电设备物联网的设备编码标识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 92-96.
ZHANG Junyong, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Equipment encode-identification in internet of power transmission and transformation equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 92-96.
- [40] 王纯林, 王辉, 文锐, 等. “互联网+”时代电力电缆智慧管理模式[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 107-113.
WANG Chunlin, WANG Hui, WEN Rui, et al. Research on intelligence management mode of power cables with internet plus[J]. Electric Power, 2016, 49(12): 107-113.
- [41] SADU A, OSTENDORF L, LIPARI G, et al. Resilient design of distribution grid automation system with CALVIN[C] // 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), June 3-7, 2018, Limassol, Cyprus: 1-6.
- [42] TOM R J, SANKARANARAYANAN S. IoT based SCADA integrated with fog for power distribution automation[C] // 2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), June 21-24, 2017, Lisbon, Portugal: 1-4.
- [43] LI Z, MOHAMMAD S, LIU X. Cyber-secure decentralized energy management for IoT-enabled active distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 900-917.
- [44] 杨永标, 李逸驰, 陈霜, 等. 双向互动服务平台的关键技术与总体构架[J]. 广东电力, 2015, 28(8): 28-32.
YANG Yongbiao, LI Yichi, CHEN Shuang, et al. Key technology and overall framework of bilateral interaction service platform[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(8): 28-32.
- [45] 杨猛. 基于物联网的智能用电服务系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [46] 冯鑫, 党幼云, 向乾, 等. 基于物联网的电量采集及分析系统设计[J]. 陕西电力, 2014, 42(2): 80-84.
FENG Xin, DANG Youyun, XIANG Qian, et al. Design of power acquisition and analysis system based on internet of things[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(2): 80-84.
- [47] 殷树刚, 张宇, 拜克明. 基于实时电价的智能用电系统[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 11-16.
YIN Shugang, ZHANG Yu, BAI Keming. A smart power utilization system based on real-time electricity prices[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 11-16.
- [48] 俞文俊, 凌志浩. 一种物联网智能家居系统的研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(8): 56-59.
YU Wenjun, LING Zhihao. Research on the smart home system based on internet of things[J]. Automation Instrumentation, 2011, 32(8): 56-59.
- [49] SIDID S, GAUR S. Smart grid building automation based on internet of things[C] // 2017 Innovations in

- Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), April 21-22, 2017, Vellore, India.
- [50] MAHMUD S, AHMED S, SHIKDER K. A smart home automation and metering system using internet of things (IoT)[C] // 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), January 10-12, 2019, Dhaka, Bangladesh: 451-454.
- [51] 徐娇. 基于物联网的电动汽车智能充电导航方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [52] 来广志. 基于物联网的电动汽车车联网模式研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 26-28, 73.
LAI Guangzhi. Internet of things based networking mode for electric vehicle[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 26-28, 73.
- [53] CHAN H T, RAHMAN T A, ARSAD A. Performance study of virtual fence unit using wireless sensor network in IoT environment[C] // 2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), December 16-19, 2014, Hsinchu, Taiwan, China: 873-875.
- [54] 王阳光, 尹项根, 游大海. 无线传感器网络应用于智能电网的探讨[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 7-11.
WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai. Application of wireless sensor networks in smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 7-11.
- [55] KIM K, BANG H, JIN S I. Efficient data collection for smart grid using wireless sensor networks[C] // 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), October 1-4, 2013, Tokyo, Japan: 231-232.
- [56] GUNGOR V C, LU B, HANCKE G P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3557-3564.
- [57] TIAN Yu, PANG Zhenjiang, WANG Weibin, et al. Substation sensing monitoring system based on power internet of things[C] // 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), December 15-17, 2017, Chengdu, China: 1613-1617.
- [58] 东辉, 唐景然, 于东兴. 物联网通信技术的发展现状及趋势综述[J]. 通信技术, 2014(11): 1233-1239.
DONG Hui, TANG Jingran, YU Dongxing. Development status and trend of IoT communication technology[J]. Communications Technology, 2014(11): 1233-1239.
- [59] 刘尧, 黄玉辉, 潘华明. 配电网电缆屏蔽层宽带载波通信技术[J]. 华东电力, 2007, 35(12): 60-63.
LIU Yao, HUANG Yuhui, PAN Huaming. Broadband carrier communication technology based on cable shielding layers of distribution networks[J]. East China Electric Power, 2007, 35(12): 60-63.
- [60] BARDYN J P, MELLY T, SELLER O, et al. IoT: the era of LPWAN is starting now[C] // ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, September 12-15, 2016, Lausanne, Switzerland: 25-30.
- [61] 魏军. 5G 通信技术推动物联网产业链发展[J]. 集成电路应用, 2017, 34(1): 75-79.
WEI Jun. 5G Communications technology push the development of IoT industry chain[J]. Integrated Circuit Application, 2017, 34(1): 75-79.
- [62] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于 LPWAN 技术的能源电力物联网专网[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 143-152.
CHEN Yongbo, TANG Yi, AI Xinwei, et al. Electricity internet of things based on LPWAN technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 143-152.
- [63] JIANG R, SUN D. Architecture design of the internet of things based on cloud computing[C] // 2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, June 13-14, 2015, Nanchang, China: 206-209.
- [64] LEUSSE P D, PERIORELLIS P, DIMITRAKOS T, et al. Self managed security cell, a security model for the internet of things and services[C] // 2009 First International Conference on Advances in Future Internet, June 18-23, 2009, Athens, Greece: 47-52.
- [65] 李佳. 基于云计算的电网智能调度平台的构建[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2759-2760.
LI Jia. Construction platform of intelligent power grid scheduling based on cloud computing[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(12): 2759-2760.
- [66] 陈小潮. 云计算在智能电网调度技术支持系统中的应用研究[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 800-804.
CHEN Xiaochao. Study on application of cloud computation in technical support system of smart grid dispatching[J]. East China Electric Power, 2010, 38(6): 800-804.
- [67] 王德文, 孙志伟. 电力用户侧大数据分析并行负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 527-537.
WANG Dewen, SUN Zhiwei. Big data analysis and parallel load forecasting of electric power user side[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 527-537.
- [68] 严英杰, 盛戈皞, 陈玉峰, 等. 基于大数据分析的输变电设备状态数据异常检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 52-59.
YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. An method for anomaly detection of state information of power equipment based on big data analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 52-59.

- [69] 王德文, 周青. 一种电力设备状态监测大数据的分布式联机分析处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5111-5121.
WANG Dewen, ZHOU Qing. A method of distributed on-line analytical processing of status monitoring big data of electric power equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5111-5121.
- [70] 孙鸿飞, 弓丽栋, 张海涛, 等. 智能电网大数据分析框架及其应用演进研究[J]. 现代电力, 2016, 33(6): 64-73.
SUN Hongfei, GONG Lidong, ZHANG Haitao, et al. Research on big data analysis platform for smart grid and its application evolution[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(6): 64-73.
- [71] 吴凡, 孙静. 基于多智能体技术的智能电网信息管理系统研究[J]. 现代电力, 2017, 34(2): 87-94.
WU Fan, SUN Jing. Research on smart grid information management system based on multi-agent technology[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(2): 87-94.
- [72] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
- [73] SKIRELIS J, NAVAKAUSKAS D. Edge computing in IoT: preliminary results on modeling and performance analysis[C] // 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), November 24-25, 2017, Riga, Latvia: 1-4.
- [74] EL-SAYED H, SANKAR S, PRASAD M, et al. Edge of things: the big picture on the integration of edge, IoT and the cloud in a distributed computing environment[J]. IEEE Access, 2018, 6: 1706-1717.
- [75] ZHANG Y, LIANG K, ZHANG S, et al. Applications of edge computing in PIOT[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-4.
- [76] 洪学海, 汪洋. 边缘计算技术发展对策研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 20-26.
HONG Xuehai, WANG Yang. Edge computing technology: development and countermeasures[J]. Chinese Engineering Science, 2018, 20(2): 20-26.
- [77] 牛卢璐, 贾宏杰. 一种适用于非侵入式负荷监测的暂态事件检测算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 30-35.
NIU Lulu, JIA Hongjie. Transient event detection algorithm for non-intrusive load monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 30-35.
- [78] 程祥, 李林芝, 吴浩, 等. 非侵入式负荷监测与分解研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3108-3117.
CHENG Xiang, LI Linzhi, WU Hao, et al. A survey of the research on non-intrusive load monitoring and disaggregation[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3108-3117.
- [79] 张聪, 樊小毅, 刘晓腾, 等. 边缘计算使能智慧电网[J]. 大数据, 2019, 5(2): 67-81.
ZHANG Cong, FAN Xiaoyi, LIU Xiaoteng, et al. Edge computing enabled smart grid[J]. Big Data Research, 2019, 5(2): 67-81.
- [80] 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.
GONG Gangjun, LUO Anqin, CHEN Zhimin, et al. Cyber physical system of active distribution network based on edge computing[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3128-3135.
- [81] 张勇军, 刘斯亮, 江金群, 等. 低压智能配电网技术研究综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 1-12.
ZHANG Yongjun, LIU Siliang, JIANG Jinqun, et al. Research review on low-voltage intelligent distribution network technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 1-12.
- [82] 公司全面部署泛在电力物联网建设[EB/OL]. [2019-03-09]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/co12017082063/2019-03/09/20190309191046841511206_1.shtml.

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-11

作者简介:

何奉禄(1986—), 男, 工程师, 工程硕士, 研究方向为电网规划、物联网技术、智能配电网等; E-mail: 554278340@qq.com

陈佳琦(1995—), 女, 硕士生, 研究方向为智能配电网运行分析;

李钦豪(1989—), 男, 工程师, 博士, 研究方向为无功电压控制、智能配电网运行控制等。

(编辑 许威)