

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202163

# 能量与信息融合的电力物联网技术

陈皓勇, 蔡伟钧, 陈健润

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 电力物联网是建立以新能源为主体的新型电力系统的关键技术之一。电力线载波物联网(PLC-IoT)作为能量与信息融合的物联网技术的成功实例, 不仅能够利用现有电力线资源进行数据传输, 还能提高电网深度感知的能力, 适合作为电力物联网网络层的通信方式之一, 并促进电网与通信网的深度融合。首先介绍了电力物联网的发展概况, 分析了能量与信息融合的物联网技术的可行性和关键问题, 并结合 PLC-IoT 的关键技术和应用优势, 探讨了 PLC-IoT 在电力行业的应用场景和发展方向。最后提出了建设更普遍的多能流多信道泛在能源物联网的愿景。  
**关键词:** 电力物联网; PLC-IoT; 能量与信息融合; 边缘计算; 数据科学

## Power internet of things technology with energy and information fusion

CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The power internet of things is one of the key technologies to establish a new-type of power system with new energy as the main power source. As a successful case of internet of things technology with energy and information fusion, PLC-IoT can use existing power line resources for data transmission and improve the deep perception of power grids. It is suitable for use as the communication method at the power internet of things network layer and can promote deep integration of the power grid and communication network. This paper first introduces the current development of the power internet of things, analyzes the feasibility and key issues of the internet of things technology with energy and information fusion, and discusses the application scenarios and development directions of PLC-IoT in the power industry by analysis of its key technologies and application advantages. Finally, a vision of establishing a universal multi-energy flow and multi-channel ubiquitous energy internet of things is proposed.

This work is supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51937005).

**Key words:** power internet of things; PLC-IoT; energy and information fusion; edge computing; data science

## 0 引言

2021年3月中央提出将构建以新能源为主体的新型电力系统, 并表示需要进一步推动碳达峰、碳中和目标的实现进程。风、光等间歇性新能源的高比例并网给新型电力系统的安全稳定运行带来了极大的挑战<sup>[1]</sup>。Jeremy Rifkin 认为未来电力(能源)系统可以结合互联网技术实现能源信息的广域共享和海量分布式可再生能源的友好接入。2019年国家电网公司提出运用先进信息通信技术为传统电网赋能以建设坚强智能电网和电力物联网为目标。电力物联网旨在实现海量基础数据的连接全覆盖和高效

处理, 并构筑数据融通与信息共享的智慧服务系统<sup>[2]</sup>。文献[3]针对当前集中式信号处理瓶颈问题, 深入研究了分布式感知与协同估计/检测方法及其在电力行业的具体应用。文献[4]设计了将智能计算从云端转向边缘的边缘人工智能框架, 能够就地进行智能数据分析, 有效解决了网络拥堵问题, 并降低云端处理负担。文献[5]以变压器状态监测与故障诊断为例分析了深度学习与多源信息融合理论相结合在挖掘数据潜在价值的优势。文献[6]指出电网可以运用数据科学方法对这些零散化、碎片化的基础数据进行聚合分析, 能快速地洞察出其中蕴含的价值, 并利用自身数据优势培育出更多电力物联网数据增值业务, 推动电力物联网商业模式的实施落地。但是这些数据尚未得到全面连接, 当前电力物

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51937005)

联网的建设重点仍然是依托多种先进信息通信技术解决“最后一公里”通信难题,并为之后的数据挖掘奠定基础<sup>[7]</sup>。5G技术具有大带宽、低时延和高可靠性的优点,能解决每平方千米多达100万个终端的接入问题,可以应用在虚拟电厂和无人机巡线等电力物联网场景,实现毫秒级低延时的电气参量、视频和音频等多元化数据采集或精准控制功能<sup>[8]</sup>。以LoRa为代表的低功耗广域网(LPWAN)技术具有通信覆盖范围广、低功耗以及抗干扰能力强的优势,能为采集频次不高和广泛分布在能源电力领域发输变配电环节的环境气象数据、设备状态监测数据以及用户侧的各类小数据的全面连接提供完美的解决方案<sup>[9-10]</sup>。

除此之外,电网还可以借助电力线载波通信(Power Line Communication, PLC)技术充分开发和利用现有的电力线资源进行数据采集,不仅能够降低终端通信成本,还能提高电网深度感知的能力<sup>[11]</sup>。PLC技术作为能量与信息融合的电力物联网技术的代表,具有无需专门铺设通信线路就能实现能量与信息共享通道传输以及兼顾线路监视与管理等多种功能的优势<sup>[12]</sup>,但是电力线复杂多变的信道特性和噪声干扰也成为阻碍PLC技术在电网大规模应用的主要因素<sup>[13-14]</sup>。目前华为的PLC-IoT技术在通信性能上已经有了较大的突破,能够摆脱传统PLC技术应用时遭遇的困境,并提供毫秒级低延时的高速可靠的通信服务,可以完全满足电力物联网的通信需求,更好地促进电网与通信网逐渐走向耦合乃至重合,是能量与信息融合的电力物联网技术的一个成功案例。以PLC-IoT技术为基点深入研究,能够寻求更普遍的能量与信息融合的物联网技术在电力(能源)领域大规模应用的实现路径,并推动电力(能源)系统数字化的建设进程。

本文首先介绍了电力物联网的发展现状,分析了能量与信息融合的物联网技术的关键问题,重点阐述了PLC-IoT的关键技术和应用优势,并对PLC-IoT在电力行业的应用场景进行了总结,最后提出了建设多能流多信道泛在能源物联网的愿景。

## 1 能量与信息融合的物联网技术

### 1.1 电力物联网概述

电力物联网是物联网在电力(能源)领域的具体表现形式,通过综合运用云计算、大数据、物联网、人工智能以及边缘计算等多项先进信息通信技术实现电力生产各个环节和用户侧的数据采集、聚合、处理和应用的全方位覆盖,以海量数据驱动电网朝着智能化、信息化方向发展,并有效应对当前建立

以新能源为主体的新型电力系统的挑战<sup>[15-17]</sup>。文献[6]从不同视角(自动化科学视角、数据科学视角和通信科学视角)阐述了电力物联网的基本涵义。电力物联网的技术架构可分为感知层、网络层、平台层和应用层4个层次,如图1所示<sup>[6,10]</sup>。



图1 电力物联网技术架构

Fig. 1 Technology architecture of power IoT

1) 感知层是物联网的基础层,实现所接设备的状态感知。关键在于提升末端设备边缘计算能力,并实现电力系统各生产环节和用户侧的全面感知和海量数据就地高效处理<sup>[2,17]</sup>。

2) 网络层需要加强电力无线专网和通信接入网建设,通过灵活使用多种通信技术实现通信网深度全覆盖,满足海量基础数据可靠连接和业务传输的通信需求<sup>[7]</sup>。

3) 平台层主要负责数据统一接入和分类管理,同时运用深度学习与多源信息融合相结合的数据分析方法对各类数据进行聚合分析和价值挖掘,还能结合云边协同技术将智能服务下沉至边缘,并提高系统实时响应速度<sup>[5]</sup>。

4) 应用层需要充分发挥平台层的数据优势推进电网企业业务转型升级,并满足新兴业务的发展需求,为客户管理、电网运维、综合能源辅助服务<sup>[16]</sup>、车联网<sup>[2]</sup>和虚拟电厂<sup>[18-19]</sup>等对内、对外业务提供决策支撑,加快形成以电网为枢纽,以数据为中心的智慧服务系统<sup>[15]</sup>。

### 1.2 能量与信息融合的物联网技术

网络层是当前电力物联网建设的重点之一。传统电力通信网虽然已经通过光纤、无线专网等方式完成了电网关键节点的连接,但是已经不能满足随着智能电网建设而日益增长的通信需求<sup>[7]</sup>。LPWAN和5G等物联网技术都在发挥着自身特有的连接优势,为海量终端设备接入电网提供经济可靠的解决方案。除此之外,以PLC技术为代表的能量与信息融合的物联网技术,能够充分开发利用现有资源进行信息传输,可以与LPWAN和5G等物联网技术

一起推进电力物联网的建设进程。

PLC 技术与电网天然契合,能够复用电力线作为通信载体实现数据、信号或图像传输,其国际标准可以根据工作频段划分为窄带、中频带以及宽带三类<sup>[11]</sup>。其中:窄带 PLC(Narrowband Power Line Communications, NB-PLC)标准主要包括 G3-PLC 和 PRIME,中频带 PLC 标准 IEEE1901.1 是基于国家电网的高速电力线载波通信(High-speed Power Line Communication, HPLC)技术规范进一步完善补充并于 2018 年正式发布,而宽带 PLC 标准则主要包括 IEEE1901 和 HomePlug。HPLC 是在低压电力线上进行高速数据传输的宽带电力线载波通信技术,其传输速率和通信可靠性相比窄带 PLC 技术而言也有了较大的提高,能够更好地承载电力物联网业务,目前主要应用在智能电表、智能家居和新能源监控等场景<sup>[20]</sup>。除电能外,别的能量通道(如管道、无线电能传输、可见光)也能作为信息传输通道。

管道声波通信可以利用声波携带特定信息并随水、热、气网的能源输送管道中的流体一同传递到每家每户,不需要额外铺设通信线路就能实现能量与信息融合传输,用户还能通过解调器从管道里提取出的声波信息制定相应的用能响应策略<sup>[21]</sup>。

无线电能与信息共享通道传输技术,不仅能有效缓解分离通道传输时的串扰问题,还能让发射端控制器在充电过程获取负载的感知数据或为其设定系统参数,在输电线路监测设备和巡线机器人等需要兼顾供电与通信的场景中有广泛的应用价值<sup>[22]</sup>。

可见光通信(Visual Light Communication, VLC)技术也为下一代网络高速数据传输提供了一种绿色节能的通信方式。VLC 可以利用随处可见的 LED 照明设备作为发射天线,通过控制 LED 以人眼无法察觉的频率快速闪烁的方式对外传输比特流,具有兼顾照明与通信功能、私密性强和几乎不受电磁干扰的优势<sup>[23]</sup>。虽然 VLC 的通信距离受视距链路所限,但是尚未被利用的海量可见光频谱资源能解决当前无线频谱紧缺问题,使 VLC 更具发展潜力。VLC 不仅能应用在室内通信,还能以太阳能电池板为接收端在室外实现点对点的高效信息交互<sup>[24]</sup>。

能量与信息融合的物联网技术具有广泛的经济效益和应用价值,能更为灵活地将感知终端融入到电力能源系统的各个生产环节<sup>[17]</sup>,拓宽信息获取渠道,促进物联网与电力(能源)系统的相互渗透和融合,并加快实现电力(能源)系统从单纯的能量网络向“能量+信息”网络的转变<sup>[8]</sup>。

### 1.3 能量与信息融合的物理基础

“熵”(Entropy)是热力学与信息论中的核心概

念。热力学熵与信息熵有着异曲同工之妙,热力学熵是从热力学第二定律中导出的重要概念,用于度量系统的混乱程度。Shannon 借鉴热力学熵的概念,定义了信息熵,并用其描述信息内容的不确定性大小或系统含有的平均信息量,信息熵的表达式为

$$H = -\sum_i^n p_i \ln p_i \quad (1)$$

式中,  $p_i$  是随机事件  $i$  发生的概率。信息熵与 Boltzmann 统计热力学熵的表达形式极为相似,两者仅相差了一个 Boltzmann 常数  $k_B$ ,且都被用来表征系统的不确定度<sup>[25]</sup>。信息是能量的表征,麦克斯韦妖的提出意图推翻热力学第二定律,但 Szilard 通过气体分子实验证明了信息的获取需要消耗能量。在信息熵的概念提出之后,1961 年 Landauer 借助实验得出擦除 1 bit 信息至少需要消耗  $k_B T \ln 2$  焦耳能量,并产生热,其中  $T$  是外界环境温度。Landauer 的实验证明了麦克斯韦妖的存在并不违反热力学第二定律,并揭示了能量与信息之间的潜在联系。

能量与信息如影随形,信息传输的完成需要物质载体并消耗能量,虽然在实际应用中信息传输与能量传递通常被割裂成两个相对独立的过程,但不可否认的是信息传输完成的同时也完成了能量传递,能量与信息共享通道传输具有可行性。Shannon 指出,通信接收方是否能完整提取出在信道传输的信息是一个不确定性问题,需要考虑信号衰减和噪声干扰等因素对通信的影响。连续信道的极限通信速率,即信道容量  $C$  可由香农公式计算。

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

式中:  $B$  是信道带宽;  $S$  是信号功率;  $N$  是信道内部的高斯噪声功率;  $S$  和  $N$  的比值为接收端的信噪比。香农公式揭示了信道传输能力与带宽、信号功率以及噪声功率之间的关系,可以用于评估信道的数据传输能力。其次,香农公式除了表述当通信速率低于信道容量时,接收端总能找到一种方法将信号从信道里完整提取出来之外,还表示当信道容量一定时,信噪比和带宽可以互换。香农公式的提出为通信技术的发展提供了研究思路,通信系统可以使用不同的调制方式与编码技术来提高自身通信性能以不断逼近理论极限值,还能通过提高信噪比的方式减少频带资源的占用或在恶劣环境下使用扩频技术来保障通信可靠性<sup>[26]</sup>。除此之外,通信技术的发展还能促进信息与能量的深度融合,并为电力(能源)系统带来巨大的变革,有效推进新型电力系统的建设进程<sup>[27]</sup>。

### 1.4 能量与信息融合的关键问题

能量与信息融合的物联网技术具有较好的经济效益和广阔的应用前景, 因此如何提高通信的有效性和可靠性是目前亟需解决的关键问题。虽然 PLC 技术能复用电力线进行通信, 但是电力线并非专为通信设计, 其信道特性和噪声干扰仍然是阻碍 PLC 技术通信可靠性和有效性的主要因素。

1) 信道时变性强。电力线信道主要因为噪声干扰的强时变性和电网连接的各类负载设备投入切出的不确定性导致的信道阻抗和电网结构的变化而对外呈现出较强的时变性, 其特征仍难以被精确描述, 通信接收方也容易因为多径效应引起的信道频率选择性衰落而无法解调出完整信息<sup>[28]</sup>。

2) 信号衰减大。信号衰减程度一般随通信距离的增加而增大, 但因为电力线信道时变性强, 各点阻抗并非连续不变且阻抗变化难以预测, 对外呈现出较强的频率选择性, 容易出现信号在近处衰减幅度高于远处的反常现象, 严重降低了信道的通信性能<sup>[12,14]</sup>。除了电网结构以外, 信号衰减特性还会受线路本身的长度和横截面积等参数的影响<sup>[28]</sup>。

3) 噪声干扰复杂。噪声种类可以根据频率特征或功率谱分布规律大致分为背景噪声, 窄带噪声和脉冲噪声三类<sup>[13]</sup>。背景噪声源种类多样, 噪声的幅值相对较小, 但频域分布较广且变化不明显。窄带噪声的主要来源是线路周边多个中短波广播信号的叠加。脉冲噪声主要是由接入电网的电力设备引起的, 开关器件工作时会产生与工频同步的周期性谐波脉冲, 用电负载的投切瞬间也会产生时长短、幅值大的突发噪声<sup>[14]</sup>。除此之外, 多个 PLC 网络引发的网间干扰也是影响 PLC 通信成功率的因素之一。

正交频分复用(OFDM)技术是目前 PLC 主流使用的多载波调制技术<sup>[13]</sup>, 能将信道按一定间距划分为若干个彼此正交的窄带子载波, 并利用快速傅里叶变换及其逆过程将待发送的比特流调制到通信质量较好的多个子载波上并行发送, 还加入了保护间隔与循环前缀, 能有效提高 PLC 抗信道衰落和抗干扰的能力。

综合利用自顶而下和自下而上的信道建模方法能更好地将实测数据与通信理论相结合, 建立更精准的信道模型和噪声模型, 并寻找更具针对性的策略应对电力线的信道特性和各类噪声引发的通信问题<sup>[14,28]</sup>, 如可以结合深度学习准确识别出不同噪声环境下的电力线信道传输特性<sup>[29]</sup>, 设计 PLC 模组时最大程度上匹配 PLC 负载并配以多级滤波器, 尽可能降低阻抗失配和噪声带来的影响, 还能采用多级中继技术提高通信距离, 等等。其余能量与信息融

合的物联网技术可以借鉴 PLC 技术的发展经验来寻找提高自身通信效率与可靠性的研究方向。

## 2 能量与信息融合的典型技术——PLC-IoT

### 2.1 PLC-IoT 概述

PLC-IoT 是华为基于 HPLC/IEEE1901.1 标准规范并结合自身特有的通信技术, 主要面向物联网场景设计的中频带低压电力线载波通信技术, 其通信频段为 0.7~12 MHz, 采用了 OFDM 等多项技术提高通信可靠性, 可以通过多级组网扩展通信距离, 还率先完成了 IPv6 化改造, 可以承载丰富的物联网协议实现数据高效安全传输, 还能与其他无线通信技术一同使用, 进一步提高通信网络的覆盖率和通信成功率, 构建多模网络共存的新格局<sup>[23,30]</sup>。表 1 是 PLC-IoT 与窄带 PLC 技术的性能比较<sup>[11]</sup>。

表 1 PLC-IoT 与窄带 PLC 的比较

技术名称	PLC-IoT	G3-PLC	Prime
通信频段	<12 MHz	35.9~90.6 kHz	42~89 kHz
应用层峰值速率	2 Mbps	33.4 kbps/240 kbps	128.6 kbps
通信时延	0.05~0.8 s	5~10 s	5~10 s
通信距离	1~15 km	10 km	1 km
OFDM 子载波间隔	24.414 kHz	1.562 5 kHz/4.68 kHz	0.488 kHz
OFDM 子载波数	512	36/72	97
300 节点组网耗时	<5 min	1 h	1 h

从表 1 中可以看出, 相比窄带 PLC 技术而言, PLC-IoT 在通信性能上有较大的突破, 能够更充分地开发利用现有的电力线资源实现高速、可靠和低时延的长距离通信。PLC-IoT 提供的高质量通信能够广泛应用在具有低时延高可靠性或低速率大连接场景特征的电力物联网业务, 如智能电表、配电物联网以及智能充电桩等。

### 2.2 PLC-IoT 关键技术

基于 IPv6 协议的 PLC-IoT 关键技术主要体现在物理层和链路层两个方面, 其技术架构如图 2 所示。

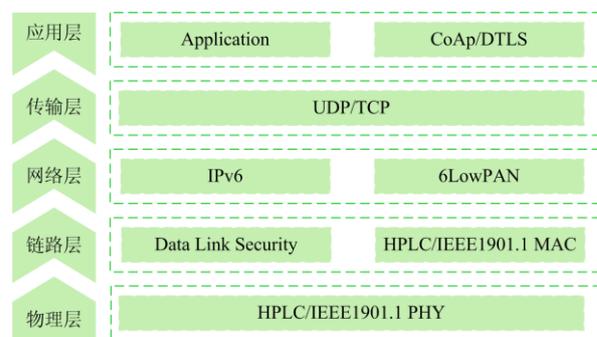


图 2 PLC-IoT 技术架构

Fig. 2 Technology architecture of PLC-IoT

PLC-IoT 的物理层工作在电力线阻抗较为稳定的 0.7~12 MHz 频段, 不仅能够降低信号衰减程度, 还能避免大多数低频带噪声带来的影响。抗噪声技术能够结合实测数据和通信理论对不同类型噪声给出相应的抗噪声算法, 并为通信模组配备多级滤波器尽可能滤除带外噪声。PLC-IoT 以 OFDM 技术作为调制方式并按 24.414 kHz 的间隔将工作频段等距划分成 512 个子载波, 频段选择和自适应技术和抗信道衰减及负载变化技术能够实时监测信道实况, 自适应选择其中通信质量较好的子载波用于数据传输和信息备份, 有效降低噪声干扰、负载变化以及信道频率选择性衰落给通信带来的影响, 并保障通信成功率。其次, PLC-IoT 能够通过关闭部分 OFDM 子载波并调控发射功率的方式避免与特定无线频段相互干扰, 满足 EMC 准入要求。

PLC-IoT 的链路层包括网络管理和媒体访问控制(MAC)两个子层。网络管理子层主要负责网络组建、网络维护以及路由管理。多网络自动协调技术与白名单技术的结合能够有效解决多台区通信串扰和多网络带宽协调问题。自动快速组网技术能够让中央协调器(Central Coordinator, CCO)上电后迅速开展 PLC-IoT 网络组建工作, 并支持最多 15 级中继和 4 096 个站点(Station, STA)接入, 单个站点平均入网时间只需 30 s, 通信距离最远能达 15 km, 实现终端通信的“即插即用”, 有效扩大通信网络的覆盖范围<sup>[20,31]</sup>。动态自适应多路径路由技术让站点根据实时信道情况自适应选择质量更好、路径更短的邻居站点作为代理并动态更新网络路由。MAC 子层不仅负责数据帧的封装/卸装, 还基于载波侦听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)和时分多址接入(TDMA)两种信道冲突避免机制将已有信道资源划分为一个个信标周期, 并动态分配给设备或业务进行数据传输, 4 级服务质量(QoS)还能满足不同优先级业务的传输需求, 保障发送方能将数据帧以最优路径通过信道可靠传输到接收方<sup>[30,32]</sup>。

除此之外, PLC-IoT 的网络层基于 IPv6 协议和轻量级 IPv6 协议(6LoWPAN)完成了 IPv6 化改造并在传输层集成了 TCP/UDP 协议, 支持 TCP/IP 标准的 IP 网络通信和 IPv4/IPv6 双协议栈, 各 PLC 设备以 IPv6 地址的形式在网络中呈现。网关主要负责网络里报文转发与协议转换, 能屏蔽底层差异并提供端到端的 IP 网络通信服务, 为 PLC-IoT 无缝演进到多模网络共存奠定了基础。而 PLC-IoT 的应用层支持的数据包传输层安全性协议(DTLS)和受限应用

协议(CoAP)则分别负责站点入网认证和业务数据可靠传输。

### 2.3 PLC-IoT 应用优势

PLC-IoT 技术架构囊括多个通信规范、数据传输协议和加密协议, 并采取设备入网验证和通信报文加密等多种举措应对未来可能面临的网络通信风险, 满足电力物联网长远发展的需求。除此之外, PLC-IoT 结合边缘计算技术充分发挥自身应用优势, 并提高本地数据分析能力。

1) 网络组建迅速。PLC-IoT 头端模块担任 CCO 的角色, 上电后自动开展 PLC 网络的组建工作, 负责终端入网认证, 并动态分配信标时隙, 有序安排网络里其余设备的数据发送与接收<sup>[32]</sup>。典型环境下 300 节点组网时长小于 5 min, 远低于窄带 PLC 技术的用时, 可以支持最多 6 个 PLC 网络协调共存, 能有效地应对多台区通信串扰的问题。

2) 无忧台区识别。边缘计算网关可以在本地仅通过程序对 PLC 信号进行分析得出末端设备所属台区, 并根据结果决定是否放行 PLC 信号, 能够有效避免因多台区通信串扰导致的设备台区归属误判和台区线损计算异常等问题, 不仅保障台区户变关系的准确建立和台区线损计算的准确计算, 而且极大缩减现场人工排查的工作量<sup>[33]</sup>。

3) 物理拓扑识别。针对配电台区中低压设备数目繁多, 拓扑结构复杂, 人工录入难度大的问题。边缘计算网关仅通过分析 PLC 信号和电气数据就能识别出台区低压设备物理层级关系、连接关系和分组关系, 给出完整的低压设备拓扑信息, 并根据拓扑结构变化动态更新<sup>[31]</sup>。

4) 全网精确对时。网关通过 PLC 链路进行 PLC 通信模块的定向升级, 并向全网低压设备同步时间, 同步误差小于 1 ms, 同步采集全网电气量数据, 可以完成谐波分析、故障定位等高级功能。

5) 停电主动上报。PLC-IoT 兼顾线路监视功能<sup>[12]</sup>, 不仅在线路故障时让终端借助超级电容主动上报停电信息, 并协助工人抢修线路故障, 有效改善供电服务质量, 还能结合边缘计算对线路运行数据进行实时分析, 并找出电网风险隐患, 保障电力系统安全运行。

6) 支持双模/多模通信。PLC-IoT 在边缘计算网关负责协议转换的情况下无缝演进到双模/多模网络共存<sup>[23,30]</sup>, 与微功率无线通信技术混合组网时打破了二者各自的固有局限性, 优势互补。PLC-IoT 可以为微功率无线通信技术解决信号穿墙问题, 而

微功率无线通信技术作为载波通信环境恶劣或线路故障时的备用通信方式, 不仅能可靠上报停电信息, 还能与 PLC-IoT 的数据采集互为冗余, 满足重点设备的通信可靠性需求, 并扩大通信网络的覆盖范围。

PLC-IoT 与边缘计算技术的有机结合能够更好地让 PLC-IoT 充分发挥自身实时控制的应用价值, 并依托电力线承担电力物联网大部分场景的信息传输任务, 进一步推进 PLC-IoT 的生态建设进程。

### 3 PLC-IoT 赋能智慧电力

#### 3.1 PLC-IoT 应用场景

PLC-IoT 与电力系统的特点十分互补, 提供的低时延高质量通信几乎适用于所有低压业务场景, 能够满足不同用户类型的业务需求, 并提供数据增值服务, 不仅应用在配电物联网、智能电表和新能源监控等电力运营场景, 而且应用在智能家居、智能楼宇和智能充电桩等用户侧场景。

1) 配电物联网。PLC-IoT 为配电网数据采集和设备运行状态监测提供经济可靠的解决方案。智能配变终端及各类低压末端设备可以嵌入 PLC-IoT 尾端通信模块, 并借助电力线进行信息交互, 有效应对目前配电台区量测覆盖不足的问题, 促进了配电网与物联网的深度融合。智能配变终端在边缘计算技术的支持下, 实时更新台区网络拓扑并简化末端设备接入流程, 减少人力录入和维护的工作量, 进一步在停电故障发生时自动安排系统隔离故障, 并通过故障定位与故障原因分析协助运维人员主动抢修停电故障, 有效提高了配电网的供电可靠性<sup>[33-34]</sup>。

2) 智能电表。智能电表不仅为用户提供更透明的用电信息, 还引导用户参与电网峰谷调节, 并根据电价变化自发地调节生产活动, 加强了用户和电网的灵活互动。PLC-IoT 技术提供的低时延高质量通信可以保障高级量测体系(AMI)的集中器依托电力线就能在任意时刻与区域内各个智能电表进行双向可靠通信, 并实现并发抄表和采集更细粒度的用电信息。集中器借助边缘计算技术进行实时数据分析, 实现电表故障识别、反窃电识别与非侵入式负荷识别等高级功能<sup>[20]</sup>。

3) 智慧用能。PLC-IoT 智能电表通过微功率无线延伸, 接入水/气/热表等能源计量装置。集中器通过电力线统一管理各计量表, 并定时采集各表数据, 实现多表合一远程集中抄读和统一计费, 本地进行用能管理和精细化的能效分析, 识别用户异常耗能行为, 并为高耗能的场景或设备的节能改造提

供决策支撑。

4) 新能源监控。与现场总线通信技术相比, 集中器在 PLC-IoT 技术的支持下仅依托电力线不仅能够高效可靠地监控风机和光伏组件的运行状态, 并收集数据, 还能结合边缘计算和人工智能技术对采集数据进行多维度实时分析, 并给出平抑新能源出力的随机波动的最佳方案, 促进风、光等新能源的最大限度消纳, 及时发现和定位出现异常的设备组件<sup>[19,34]</sup>。

5) 智能充电桩。随着电动汽车保有量的持续增长, PLC-IoT 为配套充电基础设施的通信建设提供经济可靠的解决方案, 如图 3 所示。网关通过电力线能够实时掌握连接的各个智能充电桩和配套设施的工作状况, 实现车辆充电控制以及充电费用的实时计算, 并结合边缘计算技术实现无感支付; 并结合电价变化和用户需求有序安排充电工作, 辅助参与电网峰谷调节, 有效降低了用户的充电支出, 推动人-车-桩-网的协同发展<sup>[34-35]</sup>。

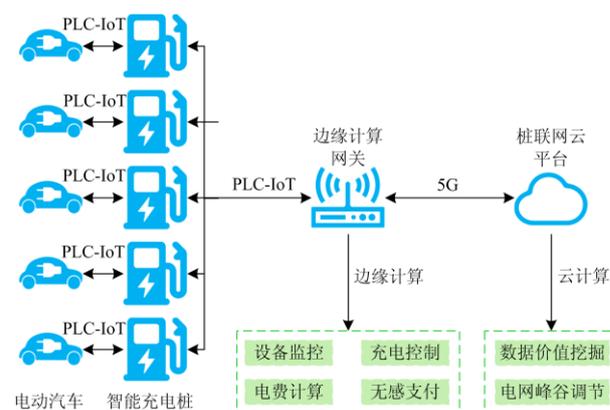


图 3 PLC-IoT 在智能充电桩的应用

Fig. 3 Application of PLC-IoT in smart charging piles

6) 智能家居。PLC-IoT 家庭网关通过全屋电力线联结嵌入了 PLC-IoT 通信模块的智能插座与各类智能家电, 无需专门布线就能够搭建高效、稳定、永久在线的家庭智能网络, 各类电器通电即联网, 即插即受控<sup>[36]</sup>。PLC-IoT 网络并沿电力线部署多个无线接入点连接其他无线设备, 实现异构网络设备的互联互通。家庭网关以自身为中心, 结合边缘计算与人工智能实现全屋家电联动, 为用户提供全新高效、节能的智慧生活体验。

7) 智能楼宇。除了智能家居之外, PLC-IoT 还可以应用在智能楼宇场景。网关通过电力线实现楼宇内配电房、照明系统以及中央空调等公共设施的全联接、全感知, 能够本地进行数据实时分析, 监

测设备运行情况，实时调控照明系统和中央空调的运行状态，得到舒适与节能的最优化解。

8) 虚拟电厂。PLC-IoT 提供的低时延高可靠性通信能更好地让网关依托电力线聚合所在区域内的分布式电源、柔性负荷和储能设备，并结合 5G 通

信和云边协同技术在现有电网基础上实现“源-网-荷-储”的跨区域快速响应调度，如图 4 所示<sup>[18]</sup>。

“源-网-荷-储”的协同联控不仅有效增强电网对新能源的接纳能力，应对建立以新能源为主体的新型电力系统的挑战，而且能推动需求侧响应的实施落地。

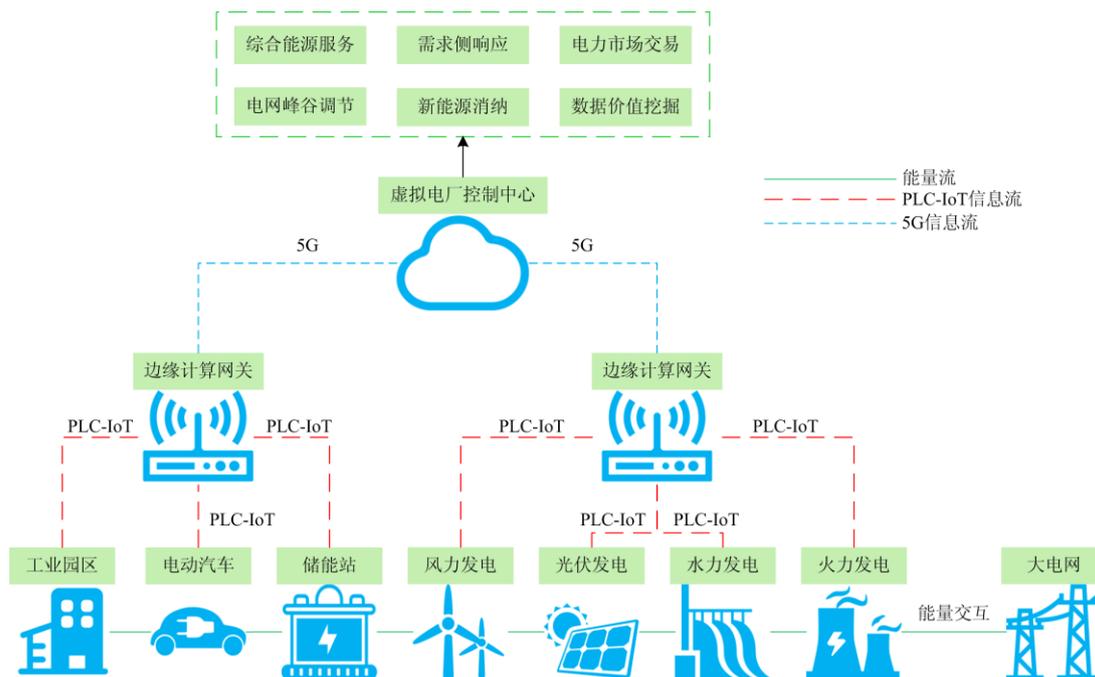


图 4 PLC-IoT 在虚拟电厂的应用  
Fig. 4 Application of PLC-IoT in virtual power plant

### 3.2 PLC-IoT 面临的机遇与挑战

数据价值驱动生态建设。在海量感知终端接入和基础数据连接下沉的背景下，PLC-IoT 要求电力物联网具备实时数据处理和有效挖掘数据价值的能。PLC-IoT 运用边缘计算提供的末端处理算力，以本地自治、云边协同等方式降低网络带宽占用和云端处理负担，并结合深度学习和多源信息融合理论寻找本地数据价值挖掘等问题的最优方法，以数据价值扩大 PLC-IoT 在电力物联网的产业生态影响力提升客户满意度。

场景需求驱动技术发展，PLC-IoT 的目标是只要有电力线的地方，终端设备间就能借助 PLC-IoT 技术实现互连互通。视频监控回传和便民 Wi-Fi 热点等泛视频宽带业务对 PLC-IoT 的带宽和延时提出了更高的要求。而在直流 PLC 领域，PLC-IoT 的高质量通信能够替代 RS485 等现场总线通信技术应用在智慧消防和智能烟感等有线传输场景中，具有兼顾通信与设备供电的优势，但要求 PLC-IoT 技术继续朝着低功耗和模块小型化方向进行改进。

PLC-IoT 为主干，多模网络延伸覆盖的 IPv6 终端通信解决方案不仅能更经济、安全地实现通信网深度全覆盖，还能加快需求侧响应的实施落地，并提升整体效能，促进能源、数据和业务的三流合一，有力推动通信网和电网深度融合的信息物理系统的建设进程，最终解决“最后一公里”通信问题。

### 4 多能流多信道泛在能源物联网

在以新能源为主体的新型电力系统建设背景下，综合能源系统运用多能流协同技术灵活调度电、冷、热、气等多种异质能源平抑间歇性新能源带来的并网冲击，增强电网对新能源的接纳能力<sup>[1]</sup>。电力(能源)物联网能够运用多项先进信息通信技术全面、高效地获取各类能源子系统的运行数据，并通过融合分析和数据挖掘等方式打破各能源系统间的信息壁垒，帮助综合能源系统更好地实现多能源系统协同规划与运行<sup>[2,16]</sup>。前面介绍的 5G、LPWAN 以及声波、可见光等能量与信息融合的物联网技术在通信成本、传输速率和覆盖范围等方面都各有优势。电力(能源)物联网能根据实际场景特征组合使

用多种通信方式,最大程度地降低不同噪声环境对通信可靠性的影响,经济高效地实现设备间的互联互通和通信网深度全覆盖。例如,PLC-IoT 不仅能与微功率无线技术优势互补、协同发展<sup>[30]</sup>,还能与 VLC 技术有机融合,并为多种通信技术的融合提供经验借鉴<sup>[23]</sup>。PLC-IoT 作为 VLC 发射器的通信骨干网,无需额外布线就能为 VLC 解决信号传输受墙体或视距阻挡的问题,而广泛分布的 VLC 发射器又能为其余异构网络设备连接 PLC-IoT 网络提供多个无线接入点,有助于形成 PLC-IoT 为主干、多模网络共存的新格局,并扩大 PLC-IoT 产业生态影响力。

在多能流多信道泛在能源物联网中,不同通信方式各有优势,共同组成一张多元而又统一的通信大网,而网关作为这张大网的关键节点,肩负着异构网络设备互联互通和海量数据高效处理的艰巨重任。边缘计算能为网关的协议转换和数据处理工作提供算力,以满足区域内进行高效信息交换的需求。5G 技术不仅能实现多元化数据采集,还能作为分布式决策主体间进行信息交互的桥梁,推动虚拟电厂的大规模实施落地<sup>[8]</sup>。但是,海量感知终端接入电网后引起的数据问题也不容忽视。深度学习与多源信息融合理论相结合的数据分析方法从多维度洞察物联网数据中所蕴含的知识和价值,除了能够有效应对当前的数据处理难题,也能够助力电力变压器故障诊断、用电行为分析和能效管理等数据增值业务的开展<sup>[5]</sup>,并借此开拓电力(能源)物联网商业模式的实现路径,以数据价值驱动能源网络与信息网络从耦合逐渐走向融合,最终建成多能流多信道并存的泛在能源物联网。

## 5 结论

PLC-IoT 技术通过复用电力线所提供的低时延高质量通信能够满足电力物联网的数据传输需求,并结合边缘计算技术提高了本地数据处理能力,是能量与信息融合的物联网技术的成功实例,为同类技术的发展提供经验借鉴。因此,本文详细阐述了 PLC-IoT 关键技术和应用优势,在此基础上结合边缘计算技术总结和分析了 PLC-IoT 在电力行业的具体应用场景和发展方向,最后提出了建设多能流多信道泛在能源物联网的愿景,以期为进一步的研究提供参考。

## 参考文献

[1] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021,

- 41(9): 3-12.
- CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 3-12.
- [2] 傅质馨, 李潇逸, 袁越. 泛在电力物联网关键技术探讨[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 1-12.
- FU Zhixin, LI Xiaoyi, YUAN Yue. Research on key technologies of ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 1-12.
- [3] 陈皓勇, 王晓娟, 蔡永智, 等. 复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 1-10.
- CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, CAI Yongzhi, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 1-10.
- [4] WANG X, HAN Y, WANG C, et al. In-edge AI: intelligentizing mobile edge computing, caching and communication by federated learning[J]. IEEE Network, 2019, 33(5): 156-165.
- [5] 李波, 李凯, 钟苏生, 等. 基于电网多源数据融合的深度学习方法研究与应用[J]. 电子设计工程, 2021, 29(10): 116-119, 124.
- LI Bo, LI Kai, ZHONG Susheng, et al. Research and application of deep learning algorithm based on multi-source data fusion of power grid[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(10): 116-119, 124.
- [6] 陈皓勇, 李志豪, 陈锦彬, 等. 电力物联网: 数据科学视角及商业模式[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 33-40.
- CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Jinbin, et al. Power internet of things: data science perspective and business models[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 33-40.
- [7] 刘林, 祁兵, 李彬, 等. 面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3114-3130.
- LIU Lin, QI Bing, LI Bin, et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric internet of things[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3114-3130.
- [8] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
- CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.

- [9] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于 LPWAN 技术的能源电力物联网[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.
- [10] 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.
- [11] CANO C, PITTOLO A, MALONE D, et al. State of the art in power line communications: from the applications to the medium[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(7): 1935-1952.
- [12] LIANG D, GE S, GUO H, et al. Monitoring power line faults using impedance estimation algorithms in power line communication equipment[C] // 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), December 25-27, 2020, Chengdu, China: 404-408.
- [13] ZHANG Z, SUN Y, WANG D, et al. Modeling and research of noise characteristics for low voltage power line channel in OFDM communication system[C] // 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), August 26-27, 2017, Hangzhou, China: 116-120.
- [14] 王毅, 贾睿, 梁星, 等. 电器对低压电力线载波通信信道特性的影响[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2020, 32(3): 411-418.  
WANG Yi, JIA Rui, LIANG Xing, et al. Influence of electrical appliance on the channel characteristics of low voltage power line carrier communication[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2020, 32(3): 411-418.
- [15] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 9-20, 53.  
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20, 53.
- [16] 刘敦楠, 张婷婷, 李华, 等. 面向泛在电力物联网的综合能源系统规划模型[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 50-55.  
LIU Dunnan, ZHANG Tingting, LI Hua, et al. Integrated energy system planning model for ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 50-55.
- [17] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 70-82, 375.  
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous internet of things in electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 70-82, 375.
- [18] 李昭昱, 艾芊, 张宇帆, 等. 数据驱动技术在虚拟电厂中的应用综述[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2411-2419.  
LI Zhaoyu, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Application of data-driven technology in virtual power plant[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2411-2419.
- [19] 夏元清, 高润泽, 林敏, 等. 绿色能源互补智能电厂云控制系统研究[J]. 自动化学报, 2020, 46(9): 1844-1868.  
XIA Yuanqing, GAO Runze, LIN Min, et al. Green energy complementary based on intelligent power plant cloud control system[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(9): 1844-1868.
- [20] 王鸿玺, 唐如意, 吴一敌, 等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 92-98.  
WANG Hongxi, TANG Ruyi, WU Yidi, et al. Research and application of smart meter reading technology based on HPLC in customer side universal power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 92-98.
- [21] SU Nan, LIU Jianyan, LIU Qiang, et al. A robust underwater acoustic communication approach for pipeline transmission[C] // 2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), August 5-8, 2016, Hong Kong, China: 1-6.
- [22] 孙跃, 王佩月, 代林. 感应电能传输系统信号同步传输技术综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(17): 1-7, 30.  
SUN Yue, WANG Peiyue, DAI Lin. A review of synchronized signal transmission technology in induction power transmission system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(17): 1-7, 30.
- [23] KASHEF M, ABDALLAH M, AL-DHAHIR N. Transmit power optimization for a hybrid PLC/VLC/RF communication system[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(1): 234-245.
- [24] WANG Z, TSONEV D, VIDEV S, et al. On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1612-1623.
- [25] CHAKRABARTI C G, CHAKRABARTY I. Boltzmann-Shannon entropy: generalization and application[J]. Modern Physics Letters B, 2006, 20(23): 1471-1479.

- [26] 石荣, 杜宇. 从香农公式再看直扩通信与通信干扰之间的博弈[J]. 通信技术, 2019, 52(4): 782-788.  
SHI Rong, DU Yu. Viewing again on the game between DSSS communication and jamming from Shannon formula[J]. Communications Technology, 2019, 52(4): 782-788.
- [27] 慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从“信息-能量”基本关系看信息能源深度融合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2289-2297.  
CI Song, LIU Qianwei, KANG Chongqing, et al. Fundamental exploration into ICT-energy fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2289-2297.
- [28] 李松浓, 胡晓锐, 郑可, 等. 低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 99-106.  
LI Songnong, HU Xiaorui, ZHENG Ke, et al. Measurement and research on attenuation characteristics of low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 99-106.
- [29] 史建超, 胡正伟, 贺冬梅, 等. 基于深度学习的电力线信道传输特性识别方法[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4283-4290.  
SHI Jianchao, HU Zhengwei, HE Dongmei, et al. Transmission characteristic recognition method of power line channel based on deep learning[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4283-4290.
- [30] 史建超, 谢志远. 面向电力物联网信息感知的低压电力线与微功率无线通信融合方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 147-157.  
SHI Jianchao, XIE Zhiyuan. Fusion method of low voltage power line and micro power wireless communication for information perception of power internet of things[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 147-157.
- [31] 钟加勇, 熊小伏, 何迎春, 等. 面向台区智能终端的即插即用和拓扑识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 166-173.  
ZHONG Jiayong, XIONG Xiaofu, HE Yingchun, et al. Plug-play and topology identification methods for intelligent terminal in distribution station area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 166-173.
- [32] 任智, 刘顺辉, 任冬, 等. 一种高效低时延的宽带电力线通信网多跳 MAC 协议[J]. 电讯技术, 2021, 61(7): 880-886.  
REN Zhi, LIU Shunhui, REN Dong, et al. An efficient and low delay multi-hop MAC protocol for broadband power line communication networks[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(7): 880-886.
- [33] 王日宁, 武一, 魏浩铭, 等. 基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 83-89.  
WANG Rining, WU Yi, WEI Haoming, et al. Topology identification method for a distribution network area based on the characteristic signal of a smart terminal unit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 83-89.
- [34] 聂峥, 章坚民, 傅华渭. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 154-161.  
NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key technologies and application scenario design for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 154-161.
- [35] 刘东奇, 曾祥君, 王耀南. 边缘计算架构下配电台区虚拟电站控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2852-2860, 2870.  
LIU Dongqi, ZENG Xiangjun, WANG Yaonan. Control strategy of virtual power station in distribution transformer area under edge computing architecture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2852-2860, 2870.
- [36] 张保会, 付科源, 郑涛, 等. 用电设备智(自)联网的概念与实现技术(一)——定义、架构与功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 1-6.  
ZHANG Baohui, FU Keyuan, ZHENG Tao, et al. Conception and technologies of the smart (autonomous) internet of power consumption equipments part 1: conception, architecture and functions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 1-6.

收稿日期: 2021-10-03

作者简介:

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、运行与控制, 新能源发电与智能电网技术, 综合能源系统与能源物联网, 电力经济与电力市场等; E-mail: eehychen@scut.edu.cn

蔡伟钧(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制、电力物联网;

陈健润(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统。

(编辑 姜新丽)