

DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 02. 009

面向新型电力系统用户侧互动的网络架构演进 及发展思路

Evolution and development concept of the user-side interactive network architecture for new
power systems

张蒙晰, 位祺, 刘敏, 李疆生, 张文英, 金广祥, 郭慧芳*
ZHANG Mengxi, WEI Qi, LIU Min, LI Jiangsheng, ZHANG Wenying,
JIN Guangxiang, GUO Huifang*

(国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)
(State Grid Economic and Technology Research Institute Company Limited, Beijing 102209, China)

摘要:在当前能源转型背景下,高比例新能源的并网及海量电子设备的接入导致电力系统中数据流量激增,对用户侧通信网络架构提出了新的要求。基于当前电力系统业务发展现状及业务通信需求,系统分析了支撑新型电力系统用户侧互动的灵活以太网(FlexE)、多类别分级队列调度(HQoS)技术,阐述当前用户侧存在的安全问题。针对未来新型电力系统用户侧互动网络架构所面临的挑战给出了相应的发展建议,并系统梳理了网络架构演进过程,为建设新型电力系统通信网络提供技术支撑。

关键词:新型电力系统;用户侧资源互动;灵活以太网;多类别分级队列调度;电力系统通信网络
中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2023)02-0069-08

Abstract: In the context of the current energy transformation, the grid connection of a high proportion of new energy sources and the access of massive electronic equipment have led to a surge in data traffic in power systems, and also put forward new requirements on user-side communication network architecture. Based on the business development status and communication requirements of the current power system, Flex Ethernet (FlexE) and Hierarchical Quality of Service (HQoS) technologies that support the user-side interaction of new power systems are systemically analyzed, and the security problems existing on the user side are expounded. Corresponding development suggestions are given to the future challenges faced by the user-side interactive network architecture for new power systems, and the evolution process of the network architecture is systematically carded, so as to provide technical support for the construction of the new power system communication network.

Keywords: new power system; user-side resource interaction; FlexE; HQoS; power system communication network

0 引言

国家发展改革委、国家能源局于2022年2月10日发布《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》,提出要完善新型电力系统建设和运行机制^[1]。2022年7月23日,国家电网有限公司在第5届数字中国建设峰会上发布的《新型电力系统数字技术支撑体系白皮书》中指出要统筹通信网

络、安全防护等基础设施,深度融合数字与能源技术,使新型电力系统具有可观、可测、可调、可控的能力^[2]。

新型电力系统用户侧互动业务发展速度迅猛,虚拟电厂、需求响应等业务发展涉及包括智能融合终端、需求响应控制、智能表计等大量的网络设备接入,给电力系统的运行模式、安全控制等都带来了变化,对于通信网覆盖范围、运行可靠性、安全性、接入灵活性、网络性能指标要求更加严苛。因此,深入研究支撑新型电力系统用户侧互动网络架构的关键技术,实现资源的灵活配置变得尤为重要。文献[3]针对新型电力系统中分布式资源灵活调控的难题,从聚合调控、可靠通信、可信交易3个

基金项目:国网经济技术研究院有限公司自主投入科技项目(ZZKJ-2022-07)
Science and Technology Projects from State Grid Economic and Technological Research Institute Company Limited (ZZKJ-2022-07)

层面对服务于新型电力系统的虚拟电厂关键技术进行研究及展望。文献[4]基于分布式能源、“源网荷储”等典型业务场景,分析了新型电力系统业务对通信网络性能需求,设计了新型电力系统通信架构。文献[5]针对新型电力系统中配电侧分布式储能灵活应用难题,从安全稳定控制和市场激励2个维度对分布式储能进行研究,满足配电侧多元分布式储能的灵活调控。文献[6]针对新能源消纳所带来的电力系统调峰压力,研究电力辅助服务市场发展历程及典型地区市场政策机制,为新型电力系统调峰辅助服务市场的建设提供指导意见。综上所述,目前新型电力系统的相关研究主要针对整体网络架构、市场机制以及分布式资源灵活调控等。本文以新型电力系统用户侧互动为关键点,首先分析当前电力系统用户侧互动业务发展现状,详细阐述业务开展过程中的通信需求。其次,从灵活以太网(Flexible Ethernet, FlexE)技术、多类别分级队列调度(Hierarchical Quality of Service, HQoS)技术、用户侧安全性3个方面对新型电力系统通信网络架构进行了研究。最后分析未来新型电力系统用户侧互动所面临的挑战,提出未来用户侧通信网络建设发展建议,梳理网络架构演进过程。

1 新型电力系统用户侧互动业务分析

1.1 业务发展现状分析

随着“双碳”目标的提出,传统的调峰机组和现有的配电网管控机制难以经济、高效地实现供需两侧的平衡,而新型电力系统中冷热电三联供^[7]、电动汽车、智能家居、储能等用户侧资源数量多、分布广且性能各异,将海量的用户侧资源经过聚合可以呈现出巨大的调节能力。

未来随着火电等能源进一步退出,综合能源、车网互动、微电网、虚拟电厂等新型用能方式迅速发展^[8],通过聚合并协调用户侧资源参与电网调峰、调频等辅助服务,可促进“源网荷储”协同互动,实现新型电力系统的灵活、稳定、经济运行。以下是几种典型的用户侧互动业务。

1.1.1 综合能源服务

随着可再生能源技术的发展,未来新型电力系统中清洁能源占比将扩大。基于“云大物移智链”技术,建立以用户为中心的综合能源服务系统,对能源生产、传输、交易、消费等环节实时监测,不同种类的能源之间协调互补,参与电力系统用户侧互动^[9]。开展综合能源服务业务可提升用能效率,降低用能成本,助力能源转型。

1.1.2 虚拟电厂

作为用户与电网互动的“桥梁”,虚拟电厂将地理位置分散的分布式电源、可调节负荷、储能等多种资源进行聚合,既可作为电厂向电力系统供电,也可作为用户侧资源参与电力系统互动,助力电网调峰、调频等辅助服务^[10]。

1.1.3 车网互动

电动汽车不仅可以从电网中获取电能,也可接收指令,参与电网削峰填谷。电动汽车、充放电基础设施、电网三者之间完成能量与信息互联互通^[11],促使电网互动更加灵活,助力能源转型。

1.2 业务需求分析

针对未来新型电力系统的业务承载需求,新型电力系统通信传输网层面需要进行高可靠性和弹性化改造,对传输网进行合理的规划,来提升业务的可靠性。对于某些长距离传输的高可靠性业务需求,可以通过端到端传输网硬切片方式进行传输。

为了适应临时性突发业务的可变带宽传输需求,传输网应当具备智能化管控中心,可以根据业务的实时传输需求进行灵活切片管理和网络智能重构。对于目前传输网层面也存在包括光业务单元(Optical Service Unit, OSU)、FlexE/同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)/多业务传送平台(Multi-Service Transport Platform, MSTP)^[12]、光传送网(Optical Transport Network, OTN)等主流传输技术,考虑长距离跨网需求的条件下,应当设计面向多传输体质的电力通信网络物理/逻辑隔离技术,提升当前通信网对新型电力系统用户侧业务的承载能力。

用户侧互动业务点多面广,通常会发生短时高并发业务的突发性传输需求,现有的通信网络容易出现瓶颈链路或瓶颈节点,难以保障规模化用户侧资源的灵活接入。在大量突发报文接入设备后会导致出现短时拥塞问题,现有的重要用户侧资源大多通过最大带宽容量计算方法进行配置,并通过专线方式接入,而没有充分考虑不同类型的业务实时传输需求,导致部分链路带宽长时间处于闲置状态,从而导致网络资源利用效率低下。因此需要引入HQoS技术,缓解网络拥塞,确保新型电力系统用户侧业务的服务质量。

2 通信网络架构演进及发展思路

2.1 FlexE技术

随着新型电力系统快速发展,未来各类业务承载的互联网协议(IP)化趋势明显,需要传输网配以

具备快速切片按需构建能力, FlexE 通过捆绑技术可以实现超大带宽接口, 且可基于时隙级别进行业务调度。目前在 FlexE 2.0 标准中已经提出了 200/400 GB 的 FlexE 模式。FlexE 技术通过在传统以太网架构中增加 FlexE Shim 实现了物理层 (Physical, PHY) 和介质访问控制层 (Media Access Control, MAC) 的解耦, 使得 MAC 层的数据流速率不再受 PHY 制约。目前主要应用于超大带宽接口、IP+Optical 灵活组网以及 5G 网络切片等。

2.1.1 FlexE 技术原理

新型电力系统用户侧 FlexE 架构由 FlexE Client, FlexE Group, FlexE Shim 构成, 如图 1 所示。FlexE Client 与以太网中各类用户接口相对应, 可基于带宽需求进行灵活配置以支持不同速率的用户业务流。该层级中业务数据流的以太帧以原子数

据块的形式在 FlexE 架构中进行分发调度, 原子数据块采用 64/66 B 的编码方式。FlexE Group 由一路或多路的以太网 PHY 组成, 可承载 FlexE Client 用户业务数据流, 组内每个 PHY 都有唯一的编号。FlexE 的核心是通过将 100 GE PHY (GE: Gigabit Ethernet, 千兆以太网) 划分为多个时隙, 以时隙承载原子数据块, 多个由原子数据块组合成的 Calendar 组件在通道中循环往复, 最终形成时隙数据承载通道^[13]。FlexE Calendar 作为组件, 支持数据链路层的 FlexE Client 数据流与 FlexE Group 的 PHY 通道中时隙的映射与反映射, 根据数据链路层中不同用户业务流所需带宽及每个物理层中时隙的分布情况, 形成 Client 到时隙的映射关系, 该映射关系基于 FlexE 中的更改机制可实时变化, 实现带宽资源实时调整。

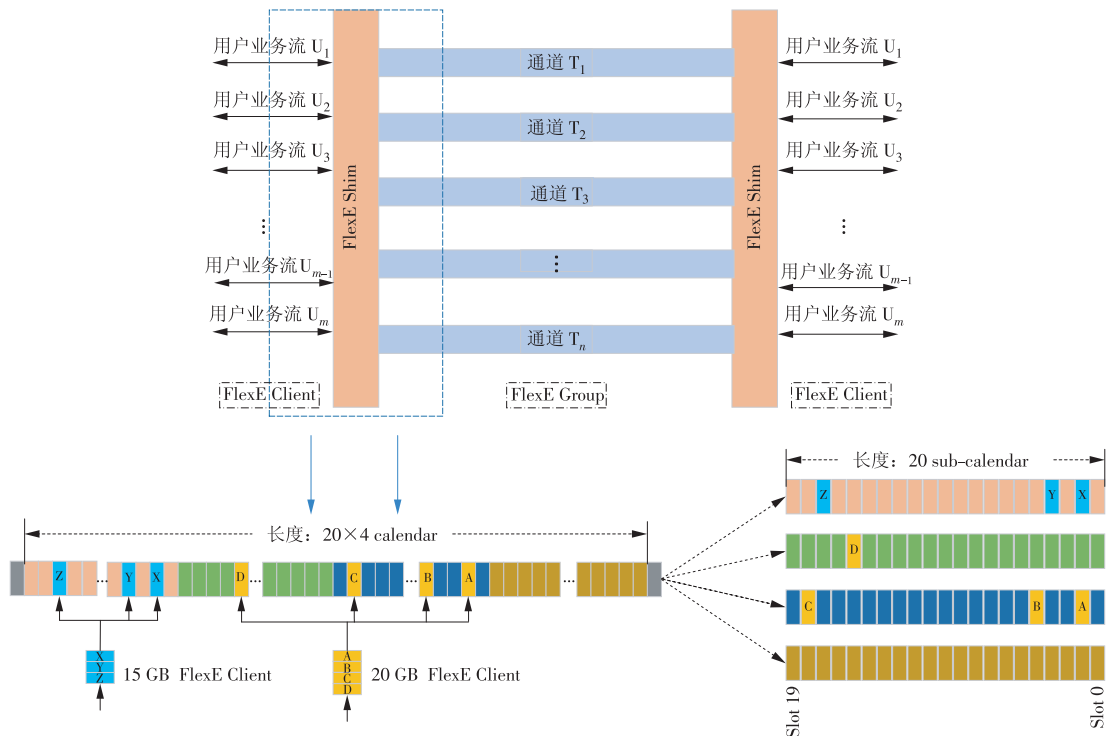


图1 新型电力系统用户侧 FlexE 架构

Fig. 1 User-side FlexE architecture of a new power system

由图 1 可知, 不同带宽的 FlexE Client 用户业务数据插入到 calendar 中, 用于承载数据的时隙并不位于同一 PHY 通道, 可同时使用多个 PHY 通道传输用户业务数据, 提升了业务传输速率。同理, 可将多个 PHY 通道所接收到的用户业务数据重新组装, 恢复 FlexE Client 的用户业务数据^[14]。

2.1.2 FlexE 技术典型应用场景

2.1.2.1 超大带宽接口

传统的以太网端口捆绑, 当流量过大时, 会导致丢包。FlexE 可通过捆绑技术使得多路 PHY 组合, 通过时隙分发机制均匀传输比特流^[15], 实现超

大带宽接口, 解决传统网络链路带宽小, 网络资源利用率低的问题。

2.1.2.2 灵活组网

传统网络中, 路由器与光传输设备的速率绑定, 无法实现带宽资源的灵活分配。FlexE 技术使得以太网接口与光传输设备解耦, 简化了二者间的映射关系, 可实现跨地域灵活组网。

目前, FlexE 接口与光传输设备对接广泛使用的是 FlexE 标准所定义的 Unaware 模式, 可在不对硬件设备进行升级的情况下, 利用现有的光传输设备实现业务承载。

2.1.2.3 5G网络切片

考虑到新型电力系统的发展,用户侧业务增多,各类业务对时延和可靠性等的需求不同。基于FlexE技术的通道化功能可将物理接口划分为多个弹性子通道接口,在子通道端口分片上划分不同的网络切片,各个网络分片的业务相互隔离^[16],可保障业务安全性,满足不同用户的差异化服务需求。此外,网络切片技术在兼容现有业务的同时,也支持在不增加网络部署状况下开展新型业务^[17]。

综上所述,基于上述FlexE架构,可实现新型电力系统用户侧业务互动带宽资源的灵活配置,支持用户侧开展多样化的需求响应业务^[18]。

2.2 HQoS技术

传统的服务质量(Quality of Service, QoS)技术基于单个端口进行网络流量管理,划分语音、视频、数据等业务的优先级,但对用户并不敏感。同一优先级的流量会竞争同一端口队列资源,无法精细划分端口上多个用户的多种流量,属于一级调度。随

着新型电力系统的发展,网络设备不断升级,用户侧接入业务的种类、数量明显增多,业务划分日益清晰。考虑到在新型电力系统用户侧网络架构部署中,若不将用户划分纳入网络流量管理,不同用户间的流量会相互影响,将导致带宽资源无法得到合理分配。本文研究了HQoS^[19]技术,其基于QoS技术将传统的一级调度变为多级调度,首先基于端口为不同用户分配用户带宽,再基于用户为不同业务划分业务带宽,实现对多个用户的多种业务进行调度,最大化利用网络资源,缓解网络拥塞。

HQoS组件与QoS类似,分别为报文分类与标记、流量监管、流量整形、拥塞管理等^[20]。各组件在网络中的部署位置不同。HQoS队列调度原理如图2所示,分为流队列、用户队列、类队列、目标端口4个层级。图中:SDN为软件定义网络(Software Defined Network);PQ/WFQ为优先级队列/加权公平队列(Priority Queue/Weighted Fair Queue)。

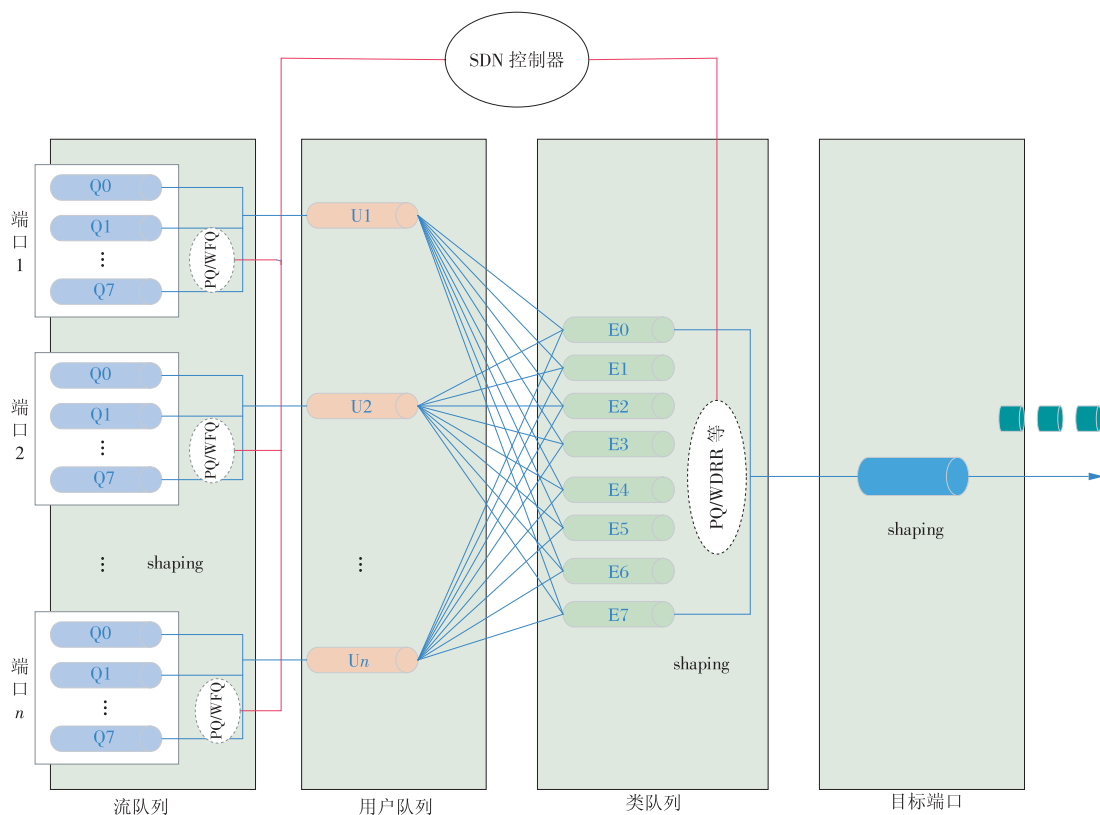


图2 HQoS队列调度原理

Fig. 2 HQoS queue scheduling principle

第1层级为流队列,单个端口上每个用户的业务依次划分为Q0—Q7等8个流队列,每个流队列可通过设置shaping来限制队列的最大带宽。按照传统QoS技术基于端口对每个用户的业务流量进行调度,首先对报文进行分类标记,设置优先级使各类报文进入不同的流队列,每个流队列采用PQ,

WFQ^[21]等队列调度技术安排报文的转发次序,且流队列支持加权随机早期检测(Weighted Random Early Detection, WRED)、流量整形,可以对具有较高优先权的数据包进行优先处理,对超过额度带宽的业务流量进行缓存。

第2层级为用户队列,通过访问控制列表

(Access Control List, ACL)对用户进行划分。该层级中 $U_1—U_n$ 分别对应 n 个用户,每个用户对应类队列中的8种业务优先级。用户队列既可以作为调度器对第1层级的流队列进行调度,也可作为被调度的虚拟队列,队列中不存在数据包缓存单元。此外,用户队列可通过流量整形来限制每个用户的带宽,相比于普通用户,可为VIP用户提供高带宽,确保服务质量。

第3层级为类队列,基于业务类型再次划分网络流量。图中8个类队列对应8种业务类型,包含注册(Registration)、报告(Report)、事件(Event)、选择(Option)等,该层级中类队列可配置PQ、加权差分轮询(Weighted Deficit Round Robin, WDRR)等队列调度技术。此外,与流队列一致,可支持WRED及流量整形,来保证不同优先级业务的合理调度。类队列与流队列之间存在映射关系,报文依映射关系进行传输。

第4层级为目标端口,为网络设备的物理接口。其与第3层级的8个类队列相对应,用户数据经过目标端口调度后转发最终的调度结果^[22]。目标端口配置流量整形,限制输出用户数据的流量速率,确保带宽在规定范围内。流队列、类队列层级的调度策略由SDN控制器进行实时控制。

综上所述,在新型电力系统用户侧引入HQoS技术,改变了传统调度技术在面临多用户、多业务场景时,可能出现同种业务、不同用户之间竞争网络资源,无法保证高优先级用户服务质量的问题。HQoS技术通过多级层次化队列调度,细化了用户及用户业务,可缓解网络拥塞问题,保证不同用户业务的服务质量,也节约了用户侧网络部署成本。

2.3 安全性

用户侧的互动设备多运行在互联网环境,需要考虑为用户侧设备提供安全防护,包括传输安全、外网设备访问安全和边缘计算安全,从而消除用户侧设备所受到的威胁,保障新型电力系统用户互动安全。

2.3.1 传输安全

第3代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)标准提出了接入网络与核心网络的接口,用户面功能(User Plane Function, UPF)与企业云的接口,以及基站与基站之间的接口 X_n 之间的信号,可以用更为安全、可靠的物理隔离方法,实现基站间流量的转发,这样就能减少(Internet Protocol Security, IPSec)隧道数目,降低设备处理的负担,提高系统的安全性^[23]。

相比于传统网络的安全保护机制,5G传输安全

能确保用户侧设备的互认证、负荷资源控制指令、用户隐私数据的加密和完整性保护,从而避免用户侧传输网络中的数据泄露和终端恶意攻击。传输网安全防护如图3所示,将用户侧网络划分出几个网络域,不同网络域之间通过智能网关进行连接。

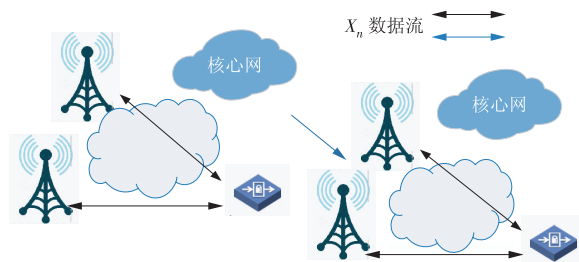


图3 传输网安全防护

Fig. 3 Transmission network security protection

2.3.2 外网设备访问安全

外网设备安全是指在用户侧互动切片(User Side Interaction Slice, USIS)网和外部网之间部署防火墙和通信安全网关,以确保切片内网和外网的安全。参与电力系统业务互动的用户还可以通过智能防火墙对传输数据进行监控,只允许传输用户侧互动服务的数据流,来确保外网设备访问安全^[24-25]。

入侵监测系统(Intrusion Detection System, IDS)可针对不同的网络攻击方式,来弥补网络中防火墙的缺陷^[26-27]。该系统对用户侧互动中的网络资源进行实时监测,准确地发现各类攻击,及时上报并及时处理,实时维护网络安全,降低非法侵入造成的伤害。

2.3.3 云和虚拟化安全

5G通过SDN和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)来支撑核心网的服务体系结构。采用NFV技术,将软硬件分离,以软件方式完成NFV,而非专用硬件平台,将电力系统用户侧互动业务功能以虚拟功能网络元的形式部署在云化用户侧互动服务平台^[28],并且SDN技术在用户侧互动通信网络中可以有效地提高数据的传输速度,能有效地优化资源配置^[29]。

针对不同等级的用户需求,5G网络切片可支撑不同等级的安全服务与管理。比如,企业可为用户侧互动业务配置监管系统,对用户侧终端设备异常进行监测预警,对网络中数据流量进行清洗、判断。如果数据有异常,就会发出警报,并不再与异常来源端进行数据传输。

通常可以采取用户侧互动的历史日志管理、数据备份和保护、安全管理协议等方法来保障安全。此外,根据业务安全需求可提供安全测试、代码审计、安全集成等服务^[30]。

3 新型电力系统用户侧互动网络架构发展趋势

3.1 新型电力系统用户侧互动面临的挑战

在“双碳”背景下,新能源、储能、柔性负荷等快速增长,综合能源服务、虚拟电厂等新型用能业务的广泛应用,多形态电网并存,耦合关系复杂,使得新型电力系统用户侧运行状况及用户的用能方式都发生了很大的改变,给电力通信网的建设提出了新的要求。

海量的边缘网关、传感器等电力电子设备接入,设备采集信息的频次及实时性相比传统设备均有提高,要求新型电力系统用户侧网络架构具有大带宽通信、超低时延控制能力。新型电力系统用户侧互动各环节都与通信技术深度融合,新型业务形态下通信服务机制应更加灵活、高效。用户侧通信网规模及通信网终端数量爆发式增长,源荷两侧随机性增强,未来新型电力系统用户侧通信网络的运维难度将更大。

此外,在新型电力系统中,随着智能终端设备的大量接入,电力系统业务的日益丰富,数据的传输和流动频率提高,各环节数据交互更趋复杂。且电力系统与政府、外部企业间的数据更加开放共享,数据在传输过程中可能会遭受到攻击,这些都导致用户数据隐私得不到安全保障。

3.2 新型电力系统用户侧互动发展建议

随着“双碳”目标下新型电力系统的建设发展,未来用户侧资源将多样化,用户侧业务互动也将更加复杂,应深入研究智能负荷聚合、调控技术等,以支撑新型电力系统用户侧大规模资源参与业务互动。此外,可在用户侧广泛部署传感设备,数据采集智能终端,实现系统间各层级互联,数据共享,完成用户侧数据的实时感知。深入研究先进的输配电技术、对电力系统发输变配环节进行智能监控与巡检,基于人工智能技术对各环节设备进行故障诊断,及时进行预防性检修,实现新型电力系统的最优运行。

研发电力人工智能平台,增强新型电力系统自适应特性,提高自主学习能力,实现对新型电力系统的全景感知、精准智能控制、高效互动。打造新能源集控支撑平台,支撑新能源电站参与电网互动,实现新能源的跨区域协调控制,促进新能源消纳,加快能源转型。

构建安全防护体系。对电力行业数据等级进行划分,评估不同等级用户数据的安全风险,建立面向新型电力系统的数据安全监测体系,基于态势

感知技术,完成对不同等级用户数据的采集、传输、存储、使用。

此外,设计终端安全接入网关、信息安全网络隔离装置等硬件,提升新型电力系统网络安全保障能力,以支撑新型电力系统“源网荷储”各环节的安全交互。

3.3 用户侧网络架构演化分析

“十三五”期间,针对能源互联网的发展给电力通信网的建设带来的机遇与挑战,国家电网提出完善网格化基础光缆网架,对传输网进行省际、省级 OTN 与 SDH 双平面,地市骨干传输 SDH 单平面的整体网络架构建设,对整体网络架构进行扁平化改造。此外开展建设以卫星通信为核心的应急通信系统,提高网络架构的稳定性及资源调度灵活性。

“十四五”期间,随着新型电力系统的建设,业务需求日益多元化。电力通信网络架构建设中可引入 FlexE 技术,业务流可基于时隙在 PHY 通道中时隙映射,突破了传统架构中端口带宽的限制,可实现电力系统业务的灵活高效互动。

另外,针对新型电力系统多元化业务竞争网络资源的问题,建议在通信网络架构中部署 HQoS,对网络流量进行多层次划分,实现网络资源的合理分配,保障电力系统用户业务服务质量。

未来,随着电力系统中分布式资源大规模并网及海量终端设备的接入导致电力系统业务对带宽、可靠性、时延、覆盖范围等将提出更高要求。可考虑引入切片分组网(Slicing Packet Network, SPN) over OTN、移动增强型光网络(Mobile-optimized Optical Transport Network, M-OTN)、无线接入网 IP 化(Internet Protocol-Radio Access Network, IP-RAN) over OTN 3 种模式对传统骨干传输网中 SDH+OTN 模式作出改进^[31]。

此外,可考虑基于 5G 网络和电力通信网的融合网络建设,保障电力系统业务对时延、带宽、可靠性等的需求,提升网络资源利用效率。

4 结束语

在当前电力系统中新能源高比例渗透,业务多元化背景下,本文对当前电力系统用户侧业务现状、通信需求的分析及对支撑新型电力系统用户侧网络架构的关键技术的研究,可为未来新型电力系统通信网络的部署及进一步优化提供技术支撑。对新型电力系统用户侧互动未来的发展建议,可为新型电力系统高可靠性、灵活性发展提供方向。

随着能源转型步伐的推进,未来应创新信息通信技术,加强物联网技术在电力系统中的研究与部

署,解决多元异构分布式电力大数据采集、分析、存储与安全管理问题。此外,加大政府对新型电力系统通信网络的建设,制定相关政策支撑新型电力系统建设,进一步探索新型电力系统用户侧网络架构的演进,助力新型电力系统数字化转型。

参考文献:

- [1]国家发展改革委,国家能源局.关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL].(2022-03-26)[2022-08-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
- [2]国家电网有限公司.国家电网公司发布《新型电力系统数字技术支撑体系白皮书》[R].2022.
- [3]康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18):3-14.
- [4]欧清海,王盛鑫,余蕊,等.面向新型电力系统的电力通信网需求及应用场景探索[J].供用电,2022,39(2):1-8,21.
OU Qinghai, WANG Shengxin, SHE Rui, et al. Exploration of power communication network requirements and application scenarios for new power systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2):1-8,21.
- [5]赵冬梅,徐辰宇,陶然,等.多元分布式储能在新电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J/OL].中国电机工程学报:1-23.(2022-08-25)[2022-10-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220824.1607.010.html>.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-23. (2022-08-25) [2022-10-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20220824.1607.010.html>.
- [6]孙莹,李晓鹏,蔡文斌,等.面向新能源消纳的调峰辅助服务市场研究综述[J].现代电力,2022,39(6):668-676.
SUN Ying, LI Xiaopeng, CAI Wenbin, et al. A research overview on ancillary services market of peak regulation oriented to accommodation of new energy [J]. Modern Electric Power, 2022, 39(6):668-676.
- [7]倪俊,徐晓伟,付鑫,等.基于需求响应的分布式能源冷热电三联供系统配置优化[J].自动化技术与应用,2021,40(10):112-116.
NI Jun, XU Xiaowei, FU Xin, et al. Configuration optimization of distributed energy CCHP system based on demand response [J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40(10):112-116.
- [8]邵冲,刘志文,黄豫,等.新型电力系统中需求侧资源的重要作用及发展趋势[N].南方电网报,2022-03-17.
- [9]曾鸣,许彦斌.综合能源系统要义:源网荷储一体化+多能互补[N].中国能源报,2021-04-12.
- [10]陈皓勇,胡建军.用户侧可调节资源亟待唤醒[N/OL].中国能源报,(2022-02-23)[2022-08-15]. http://www.cnenergynews.cn/guonei/2022/02/23/detail_20220223118063.html.
- [11]CHUKWU U C, MAHAJAN S M. Real-time management of power systems with V2G facility for smart-grid applications [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 5(2): 558-566.
- [12]YUAN H, CHEN Y, WANG Q. Ethernet service protection in MSTP networks [C]//2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2011: 2017-2020.
- [13]LIANG H, DA FONSECA N L S, ZHU Z. On the cross-layer network planning for flexible ethernet over elastic optical networks [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, 18(3): 3691-3705.
- [14]华为技术有限公司.灵活以太网技术白皮书(2018版)[R/OL].(2018-09-20)[2022-08-15]. <https://carrier.huawei.com/~media/CN BG/Downloads/Spotlight/5g/20180920>.
- [15]陈景文,黄旭阳. FlexE技术在SPN网络中的应用[J].通信电源技术,2022,39(4):36-38.
CHEN Jingwen, HUANG Xuyang. Application of FlexE technology in SPN network [J]. Telecom Power Technologies, 2022, 39(4):36-38.
- [16]DAI Y, JIANG S, WANG D, et al. A FlexE-based flexible bandwidth slicing and scheduling model for the Energy Internet [C]//2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). IEEE, 2022: 263-267.
- [17]欧阳春波,李春荣,胡永健,等.基于FlexE的承载网络切片隔离技术研究和应用[J].电信技术,2018(12):12-19.
OUYANG Chunbo, LI Chunrong, HU Yongjian, et al. Research and application of sharded isolation technology for bearer network based on FlexE [J]. Telecommunications Technology, 2018(12):12-19.
- [18]张朝.基于TSN和FlexE的实时网络带宽资源重构机制研究与实现[D].西安:西安电子科技大学,2020.
ZHANG Chao. Research and implementation of real-time network bandwidth resource reconfiguration mechanism based on TSN and FlexE [D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [19]徐青.承载大客户专线业务的PTN网络HQoS规划优化[J].通信技术,2018,51(12):2914-2919.
XU Qing. Optimization of HQoS planning for PTN network carrying VIP dedicated line service [J]. Communications Technology, 2018, 51(12):2914-2919.

- [20]何睿.GPON 系统中 HQoS 的研究与实现[D].上海:东华大学,2017.
HE Rui. The research and implementation of HQoS in GPON system[D].Shanghai:Donghua University,2017.
- [21]MUSTAFA E G, SAMANIA T B. The effect of queuing mechanisms first in first out (FIFO), priority queuing (PQ) and weighted fair queuing (WFQ) on network's routers and applications [J]. Wireless Sensor Network, 2016,8(5):77-84.
- [22]林涛.网络设备 QoS 特性的测试方法研究[D].北京:北京邮电大学,2013.
LIN Tao. Research on testing QoS function of network equipment [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [23]李彬,赵颖,祁兵,等.基于 5G 的需求响应通信安全问题分析与应用挑战[J].电网技术,2021,45(12):4778-4788.
LI Bin, ZHAO Ying, QI Bing, et al. Security issues and application challenge of 5G based demand response [J]. Power System Technology, 2021, 45(12):4778-4788.
- [24]刘广生,张松清.智能电网信息安全威胁及对策分析[J].微型机与应用,2017,36(5):8-10.
LIU Guangsheng, ZHANG Songqing. Analysis of smartgrid information security threats and counter measures [J]. Microcomputers and Applications, 2017, 36(5):8-10.
- [25]李惠军,陆建强,周霞,等.面向智慧园区系统的网络攻击关联分析与防护策略研究[J].综合智慧能源,2022,44(7):1-9.
LI Huijun, LU Jianqiang, ZHOU Xia, et al. Network attack association analysis and attack protection strategy for smart park systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7):1-9.
- [26]徐毅凯.防火墙与入侵检测技术在电力工控系统信息安全中的应用研究[D].南京:南京师范大学,2018.
XU Yikai. Application research of firewall and intrusion detection technology in information security of electric power industrial control system [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.
- [27]吕政权,李朝阳,王海峰,等.基于 GRU-CNN 的综合能源网络安全攻击检测方法[J].华电技术,2021,43(2):9-14.
LYU Zhengquan, LI Zhaoyang, WANG Haifeng, et al. An intrusion detection method for integrated energy network based on GRU-CNN [J]. Huadian Technology, 2021, 43(2):9-14.
- [28]ETSI GS NFV-SEC 012-2017. Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3; Security; System architecture specification for execution of sensitive NFV components (V3.1.1) [EB/OL]. (2017-01-01) [2022-08-22]. <https://www.antpedia.com/standard/7788594-8.html>.
- [29]董旭.端到端网络切片动态资源优化算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.
DONG Xu. Research on dynamic resource optimization algorithm of end-to-end network slicing [D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [30]华为技术有限公司.网络切片分级白皮书[R/OL]. (2020-03-13) [2022-08-22]. <https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/News/Categories-Slice--White-Paper-CN.PDF?la=zh>.
- [31]马万里,安毅,李洋,等.电力通信骨干光传输网演进策略研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(10):134-140.
MA Wanli, AN Yi, LI Yang, et al. Research on evolution strategy for electric power telecommunication backbone transmission network [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(10):134-140.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2022-09-02;修回日期:2022-10-29
上网日期:2023-02-25;附录网址:www.iienergy.cn

作者简介:

张蒙晰(1992),女,工程师,硕士,从事电力通信网规划与无线通信技术方面的研究,zhang_mxi@163.com;

位祺(1993),女,工程师,博士,从事电力通信网光传输方面的研究,weiqi@chinasperi.sgcc.com.cn;

刘敏(1987),女,工程师,硕士,从事电力通信终端接入网方面的研究,1054670168@qq.com;

李疆生(1975),男,正高级工程师,从事电力通信网光传输规划方面的研究,lijiangsheng@chinasperi.sgcc.com.cn;

张文英(1974),女,工程师,从事电力系统技术经济方面的研究,zhangwenying@chinasperi.sgcc.com.cn;

金广祥(1980),男,高级工程师,硕士,从事电力通信网方面的研究,jinguangxiang@chinasperi.sgcc.com.cn;

郭慧芳*(1998),女,在读硕士研究生,从事能源互联网信息通信技术方面的研究,ghfkyjyo@163.com。

*为通信作者。