

面向智能电网的 5G-A 确定性网络技术研究

Research on 5G-A Deterministic Network Technology for Smart Grid

汪保友,姚赛彬,郭文浩(中国联通上海分公司,上海 200080)

Wang Baoyou, Yao Saibin, Guo Wenhao(China Unicom Shanghai Branch, Shanghai 200080, China)

摘要:

面向智能电网超低时延、超大带宽、超精授时和超强安全的确定性网络的通信需求,提出 SMART 综合解决方案。该方案融合了网络切片、MEC 边缘计算、3CC 载波聚合、RedCap 轻量化 5G、TSN 时间敏感网络等技术。通过综合运用 5G/5G-A 先进无线技术,为智能电网打造定制化资源与服务质量保障兼备的精品网络解决方案。该方案支持业务隔离机制,能更精准地满足电网业务对安全性、可靠性和灵活性的严格要求,实现差异化服务保障,助力智能电网的高效稳定运行。

Abstract:

Aiming at the deterministic network communication requirements of ultra-low latency, ultra-high bandwidth, ultra-precise timing, and ultra-strong security in smart grids, the SMART comprehensive solution is proposed. The scheme integrates network slicing, MEC edge computing, 3CC carrier aggregation, RedCap lightweight 5G, TSN time sensitive network and other technologies. By leveraging the comprehensive application of 5G and 5G-A, a premium network solution can be tailored for smart grids, offering customized resources, guaranteed service quality, and business isolation. This solution supports business isolation mechanism, which can more accurately meet the stringent requirements of smart grid operations for security, reliability, and flexibility, enabling differentiated service assurance and supporting the efficient and stable operation of the grid.

Keywords:

Smart grid; 5G private network; 5G-A; Wireless communication; Deterministic network

关键词:

智能电网; 5G 专网; 5G-A; 无线通信; 确定性网络

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.012

文章编号: 1007-3043(2025)02-0064-07

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 汪保友,姚赛彬,郭文浩. 面向智能电网的5G-A确定性网络技术研究[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 64-70.

1 概述

智能电网是实施新能源战略和优化能源资源配置的重要平台,涵盖发电、输电、变电、配电、用电、调度和通信信息平台等各个环节^[1]。随着大规模配电网自动化、低压集抄、分布式能源接入、用户双向互动等业务的快速发展,各类电网设备、电力终端、用电客户的通信需求爆发式增长,由于点多面广,传统光纤覆盖建设成本高、业务开通时间长、运维难度大,难以有

效支撑其“可观、可管、可控”。同时输配电线路无人机巡检等移动性场景也对无线通信提出了刚需,因此迫切需要构建安全可信、接入灵活、双向实时互动的通信接入网。面临的主要挑战如下。

a) 超低时延能力挑战。生产控制 I/II 区是智能电网的重要环节,对网络有极低时延、抖动要求,同时具有严格的安全隔离和自助管控要求,如:配网差动保护、配电自动化等核心业务,需要 10 ms@99.999% 以下的确定性低时延能力以及 1 μ s 以下的高精度授时能力。这对网络的确定性时延提出巨大挑战。

b) 上行超宽带能力挑战。管理信息 III/IV 区业务

收稿日期: 2024-12-16

主要包括输电线路无人机巡检、配电房视频综合监视以及移动式现场施工作业管控等。此类业务的主要内容是视频传输,对网络带宽要求很高。机器视觉应用的速率取决于像素和帧率,像素方面从500万、1000万向2000万以及更高像素发展,单摄像头速率从几十Mbit/s到几百Mbit/s,采用压缩模式也有100Mbit/s。海量数据回传需求对网络上行超宽带的能力提出极大挑战。

c) 高精度授时能力挑战。电力系统装置如电源管理单元(Power Management Unit, PMU)、保护终端、数据传输单元(Data Transfer Unit, DTU)等都内置了时钟,但这些时钟之间由于时钟初始值或时钟计时精度等问题难以同步,导致其相应的采集数据也会出现时间偏差,进而影响电力业务的正确执行。在实际工程中,配网差动保护要求对时精度 $<10\ \mu\text{s}$;配网PMU要求对时精度 $<1\ \mu\text{s}$ 。目前NTP网络授时精度在ms级,因此,需要通过卫星授时(授时精度在10ns级)等技术来实现全网设备的同步对时。如何利用GNSS卫星高精度授时,实现通信+授时一体化网络部署,是配电自动化场景的一大挑战。

d) 安全防护能力挑战。作为民生基础行业,电力需要专属网络来保证其业务数据安全。电力监控系统安全防护的总体原则为“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”,为不同分区业务提供差异化的安全隔离服务,强化边界防护,提高内部安全防护能力,保证电力生产控制系统及重要数据的安全。这对通信网络的安全防护能力提出严格挑战。

面向智能电网的确定性网络通信需求,本文提出SMART综合解决方案^[2-6],融合网络切片(Slicing)、MEC边缘计算、3CC载波聚合、RedCap轻量化5G、TSN时间敏感网络等先进技术,满足电力行业超低时延、超大带宽、超精授时、超强安全的确定性网络通信需求,为智能电网提供具有定制化资源和服务质量保障、业务隔离的精品网络解决方案,可以更好地满足电网业务的安全性、可靠性和灵活性需求,实现差异化服务保障。方案在某电力公司进行落地测试验证,通过综合运用5G/5G-A技术,为客户提供了良好的确定性网络服务体验,关键服务指标(如可用性、带宽、时延、可靠性、抖动、安全隔离等)都得到良好保障。

2 SMART电力专网设计方案

5G经过4~5年的演进,作为5G的演进和增强版,

5G-A已逐步成熟,5G-A的“下行万兆、上行千兆、超低时延、千亿连接”等关键特征,极大拓展了无线网络通信能力的边界。为满足电力行业超低时延、超大带宽、超精授时、超强安全的确定性网络通信需求,本文研究采用5G/5G-A技术为智能电网提供“最后一公里”无线接入通信覆盖的解决方案,提出SMART电力专网设计方案(见图1),融合专网切片(Slicing)、MEC边缘计算、3CC载波聚合、RedCap轻量化5G、TSN时间敏感网络等技术,提供具有定制化资源和服务质量保障、业务隔离的精品网络解决方案^[7-8]。

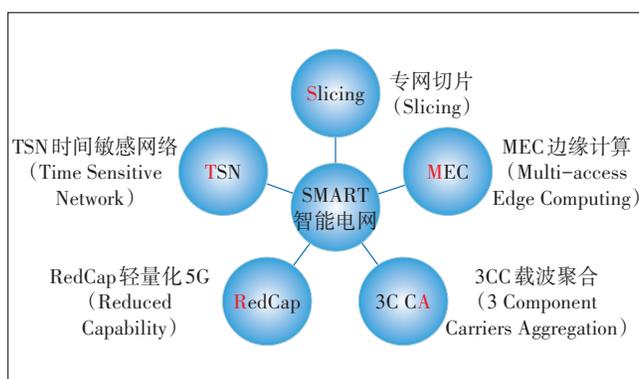


图1 电力专网SMART设计思路

5G电力专网端到端网络整体架构如图2所示。

在图2中,配电、用电、输电、变电等环节的业务数据由电力终端设备采集,通过端侧的电力授时5G CPE、5G摄像头、5G工业网关等多种类型的终端,快速接入5G网络。电网数据经过无线接入网及承载网到达5G核心网,再由5G核心网接入到电力业务主站。边+管侧通过UPF下沉部署和边缘云计算能力,确保数据不出园的安全需求以及本地数据分流以满足低时延要求。通过电力切片管理平台,对无线网、承载网、核心网进行E2E切片管理,确保横向安全隔离、纵向认证的网络,避免流量迂回。云侧是电网云,包括生产区业务主站、管理区视频监控云平台,通过云平台+AI,快速满足企业业务需求。

3 SMART关键技术

3.1 灵活的E2E网络切片,实现差异化专网服务

网络切片能够将网络资源灵活分配,将网络能力灵活组合,可以基于5G网络虚拟出多个具备不同特征的逻辑子网,提供面向不同场景的按需定制网络服务,网络切片是满足业务差异化、多元化需求的保证。根据电网业务场景特点,电网业务切片规划如表1所示

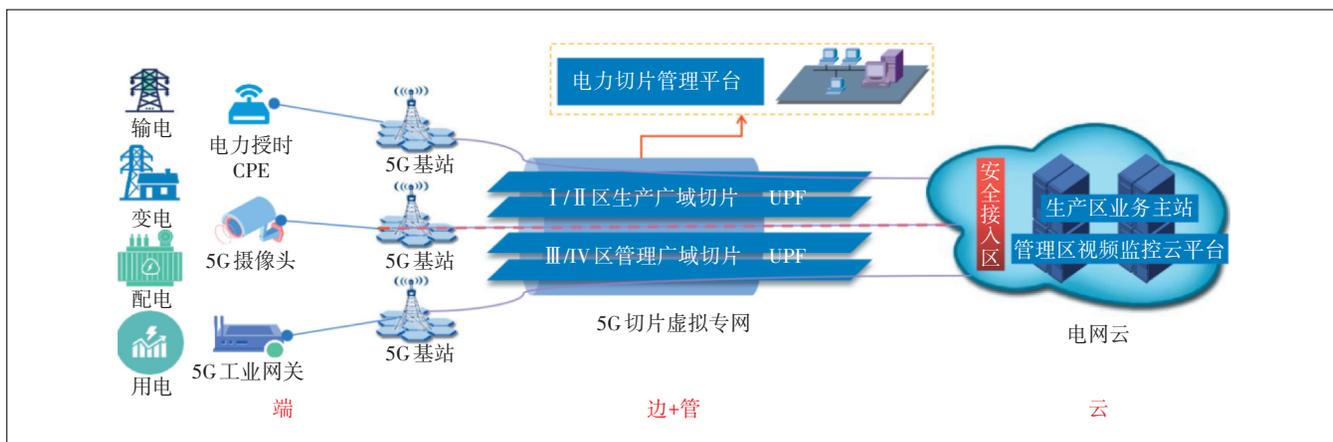


图2 5G电力专网端到端网络整体架构

表1 电网业务切片规划

业务场景	业务大区	带宽要求	时延要求	可靠性要求	隔离性要求	切片类型
差动保护	生产控制 I/II区	中	高	高	高	uRLLC
配网自动化	生产控制 I/II区	中	高	高	高	uRLLC
精准负荷控制	生产控制 I/II区	低	中	高	高	uRLLC
用电信息采集	管理信息 III/IV区	低	低	中	低	mMTC
配网状态监测	管理信息 III/IV区	低	低	中	低	mMTC
智能巡检	管理信息 III/IV区	高	中	中	低	eMBB
视频监控	管理信息 III/IV区	高	低	低	低	eMBB

示。

uRLLC 切片适合对时延和可靠性要求高的场景,可以对电网中生产控制业务单独部署,主要应用于差动保护、配网自动化以及精准负荷控制等场景。mMTC 切片适合对连接数量要求大的场景,主要应用于用电信息采集、设备资产管理等连接数量大但带宽时延要求低的应用场景。eMBB 切片适合对带宽要求高、但时延要求不高的场景,多用于智能巡检、视频监控等场景。

通过构建 E2E 网络切片,从无线侧到核心网实现端到端的资源隔离^[9-11],在无线侧、传输侧、核心网侧都有相应的实现方式,具体如图3所示。

表2对各网元切片能力做了简单描述。

考虑到电力业务数据不出园区和降低时延的需求,建议5G核心网切片配置专用的UPF用户面(必选,下沉部署)、AMF+SMF(可选)。同时基于电力业务高可靠性需求,生产控制、管理信息大区对应的电力专用UPF用户面网元采用板级主备,SMF/AMF复用大网设备,采用同城主备方案。承载侧建议采用Flex-E硬

切片隔离。基站侧采用RB资源预留切片。

3.2 就近部署MEC算力,降低电网业务时延

MEC边缘计算是在网络边缘侧通过连接和计算能力的下沉部署,将网络业务流量在本地分流和处理。MEC系统相对于5G核心网是AF+DN的角色,MEC系统和UPF之间采用N6接口连接;MEC系统以非可信AF的角色通过NEF→PCF→SMF影响用户面策略,或以可信AF的角色通过PCF→SMF直接影响用户面策略;MEC平台系统可以与5GC NEF/PCF进行更多的交互,调用其他的5GC开放能力,如消息订阅、QoS等。MEC系统架构如图4所示。

在图4中,5G核心网可以分为控制面和用户面,控制面网元主要包含AMF、SMF、NSSF、AUSF、UDM、PCF、NEF、NRF等,用户面主要为UPF。5G核心网中与电网业务转发强相关的网元主要为SMF、UPF。在电力终端与5G网络连接建立后,SMF、UPF将负责电力业务的会话管理和业务转发,SMF负责电力业务的IP地址的分配管理、UPF选择、策略实施、QoS中的控制部分等,UPF负责电力业务的路由转发、策略实施、流量报告、QoS处理等,相当于业务的出口网关。5G核心网用户面UPF与MEC之间的N6接口需要通过专线承载,以确保E2E安全隔离。

我们为智能电网独立部署专用的UPF用户面网元,并将其下沉部署至电力指定机房,同时引入MEC技术,降低电网业务时延。UPF/MEC部署位置按“就近部署”原则下沉至不同层级,尽量和电力主站/子站等业务系统的部署对齐,避免路由迂回。在智能电网中通过UPF+MEC下沉及网络侧策略配置,可以将电网所需的流量全部在边缘区域内直接分流,在本地采

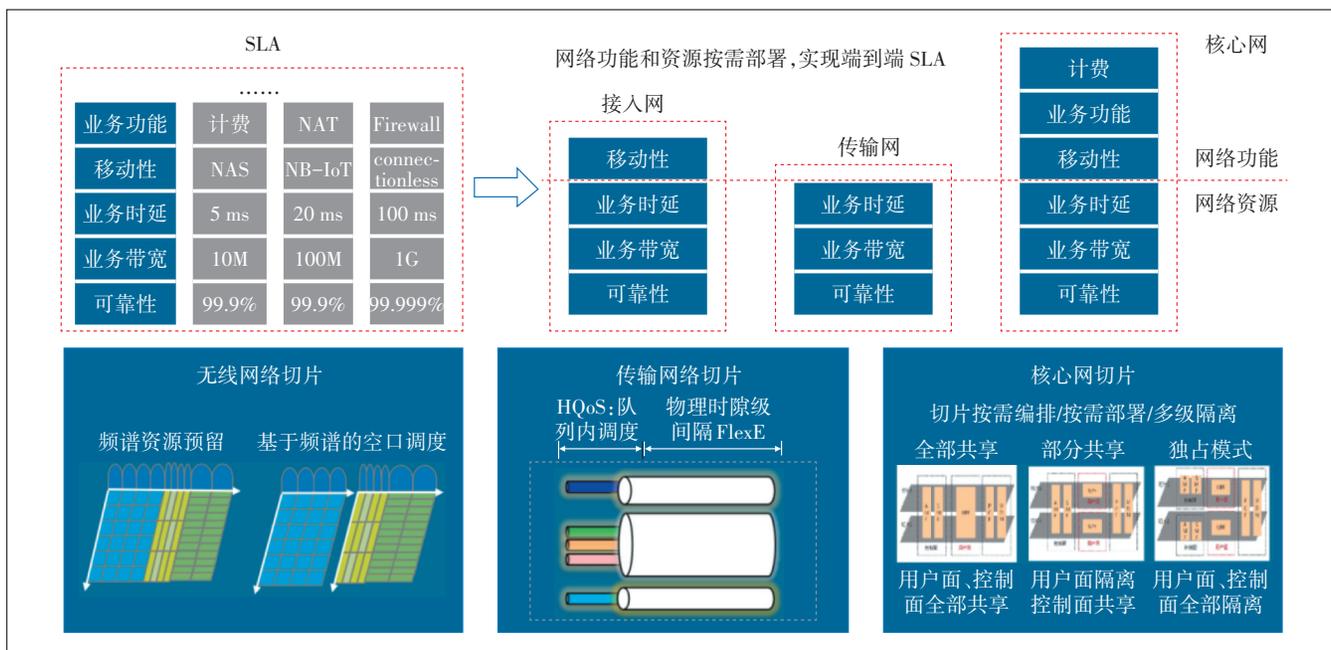


图3 5G E2E网络切片实现方式

表2 各网元切片能力

网元	能力描述
基站侧网络切片能力	QoS切片:采用传统能力进行业务保障,隔离性弱
	资源预留切片:采用RB资源预留进行业务保障,隔离性强
承载侧网络切片能力	QoS切片:采用5QI→DSCP,以及VLAN优先级进行差异化,隔离性弱
	Flex-E隔离:基于时隙隔离,严格隔离
核心网网络切片能力	AMF隔离:信令面隔离
	UPF隔离:用户面隔离

集、处理、分析,降低对核心网络及骨干传输网络的占用,降低电力业务端到端时延,满足配电网差动保护等对5G网络的超低时延需求。由于不用穿越公网,满足了电网数据不出局站的需求,提高了敏感与重要数据的安全性;同时也可减少云端集中处理带来的大量传输带宽的租赁成本。

3.3 高低频3CC载波聚合,助推用户极致体验

众所周知,无线通信需要占用无线电磁波频段。3CC载波聚合就是将3个频段进行合并,组成更大的频段带宽,进而实现更高的速率。形象类比就像把3

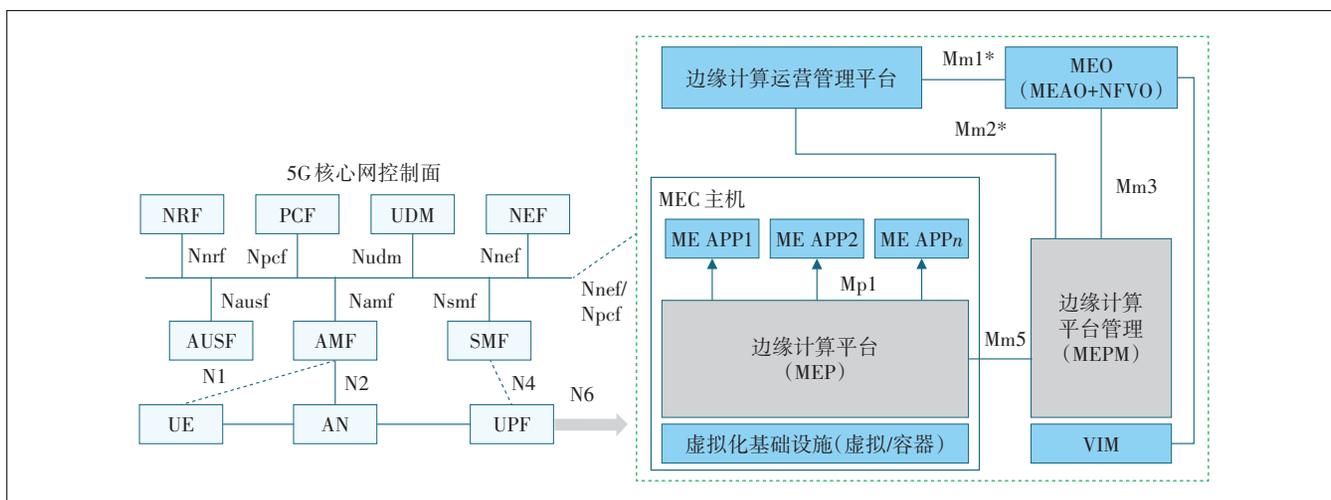


图4 MEC端到端系统架构

个不同的车道合并成一个更宽的车道,以此提升车辆通行能力。电力行业采集类业务,采集频次具有从低频次向高频次(如采集频次将从天、小时级提升至分钟级)的发展趋势;其中视频监控、智能巡检场景会有大量的高速率终端或高清摄像头,对传输速率和带宽有超高要求,通过3CC载波聚合可很好满足此类需求。在中国电信和中国联通(简称“电联”)共建共享的大环境下,采用3.5 GHz 200 MHz+2.1 GHz 40 MHz的3CC载波聚合组网方案,充分利用电联的频谱资源,将其聚合成240 MHz无线频谱带宽,使网络下行体验速率超4 Gbit/s、上行体验速率超1 Gbit/s,大大提升用户的体验,此外,利用高低频组合有效扩展覆盖范围,可缓解偏僻地区覆盖瓶颈问题。

参与载波聚合的每个载波被称为分量载波。承载信令传输并管理其他分量载波的分量载波,被称为主载波(Pcell, Primary cell)。用来扩展带宽和提高速率,由主载波来决定何时增加或删除的载波,被称为辅载波(Scell, Secondary cell)。3CC载波聚合关键技术包括灵活频谱接入(Flexible Spectrum Access, FSA)和多频段服务小区(Multi-Band Serving Cell, MB-SC)。FSA可以进行智能多载波寻优,将上行全频段自由拆分、灵活组合,实现控制信道合一与数据信道统一调度,有效提高资源利用率,改善上行体验。MB-SC可以将非连续的分散频谱集成重构,形成虚拟大带宽,能进一步提高资源利用率,改善上行体验。目前,采用了高通X75基带和联发科M80基带的终端,一般都可以支持3CC。

3.4 RedCap轻量化5G,赋能用电负荷精细化管理

5G网络的低时延、高可靠、广覆盖等特性,可被广泛应用于电力行业。配电自动化“三遥”(遥信、遥测、遥控)、配网差动保护、变电站巡检机器人、输电线路无人机巡检、移动式现场施工作业管控、原始用电信息采集、电动汽车充放电优化控制、商业楼宇智慧用能等,都会需要大量5G终端。由于电力行业对通信模块的需求量大,所以对成本也更为敏感,此外,工业级的通信设备对功耗都有具体的要求,一旦新增的通信单元功耗过大,也无法很好地融入原系统。

RedCap轻量化5G,通过对5G技术进行一定程度的“功能裁剪”,降低了终端和模组的复杂度、成本、尺寸和功耗等指标。同时,RedCap基于5G系统,可以按需实现与5G切片、5G LAN、高精度授时、uRLLC等5G增强功能结合,满足5G行业应用不同领域的增强需

求。5G基线设备与RedCap设备对比如表3所示。

表3 5G基线设备与RedCap设备对比

能力	FR1(Sub-6 GHz频段)	
	基线设备	RedCap设备
最大带宽/MHz	100	20
终端最小接收的天线端口数	2T4R	1T1R或1T2R
下行最大支持MIMO layer数	2或4	配置1个接收天线的RedCap终端支持1个下行layer;配置2个接收天线的RedCap终端支持2个下行layer
下行最大调制阶数	256QAM	64QAM
双工模式	FD-FDD, TDD	支持HD-FDD type A

从表3可以看出:RedCap的频谱带宽更小,为20 MHz;RedCap减少了收发天线数量,并降低了MIMO层数,降低了对终端射频收发信机和基带处理模块的能力要求;RedCap采用了64QAM调制方式,意味着对射频和基带的要求大幅降低;RedCap采用半双工FDD(HD-FDD),不需要双工器,不仅节约了成本,还获得了更好的集成能力,减小了对设备空间的占用,有利于设备的小型化;RedCap引入了一些节省功耗的手段,例如增强的非连续接收特性(eDRX),采用更长的休眠模式,让终端减小功耗,获得更高的续航能力。

电网配电自动化三遥、配网差动保护、用电信息采集等业务都可以使用5G-A RedCap设备完成,这既满足电力系统的通信能力要求,又控制了海量电力设备的成本。比如在配电网领域,通过5G RedCap电力网关的配网差动保护技术,能大幅缩小电网故障所影响的区域,以最快的速度来消除故障,大幅缩短停电时间,最大限度地优化百姓用电体验。另外,5G RedCap电力网关,配合逆变器、微机保护、智能表计等智能终端设备,代替人工现场巡检,工作人员无需亲自到现场巡检就能及时发现问题,并快速做出准确判断和处理。

3.5 高精度授时同步,打造TSN时间敏感网络

电网配电自动化三遥、配网差动保护等场景,对低延时、低抖动和高可靠性要求非常严格。传统以太网采用的“Best-effort”通信机制从本质上缺乏确定性和实时性,TSN时间敏感网络基于传统以太网,通过时钟同步、数据调度、网络配置等机制,提供更可靠的、低延迟、低抖动的数据传输服务。与传统以太网相比,TSN时间敏感网络的优点为:提供微秒级确定性服务,保证各行业的实时性需求;TSN通过调度机制能够

实现周期性数据和非周期性数据在同一网络中传输,进一步简化了整个通信中的网络复杂性。

在TSN时间敏感网络中,高精度时间同步很关键。通过5G高精度授时同步可实现微秒级的高精度

时钟同步授时能力,一方面解决了电力业务高精度授时需求,另一方面间接降低了网络抖动的严苛要求。具体实现主要包括以下3个流程(见图5)。

a) 时钟源(北斗/GPS)到基站。时钟源来自北斗

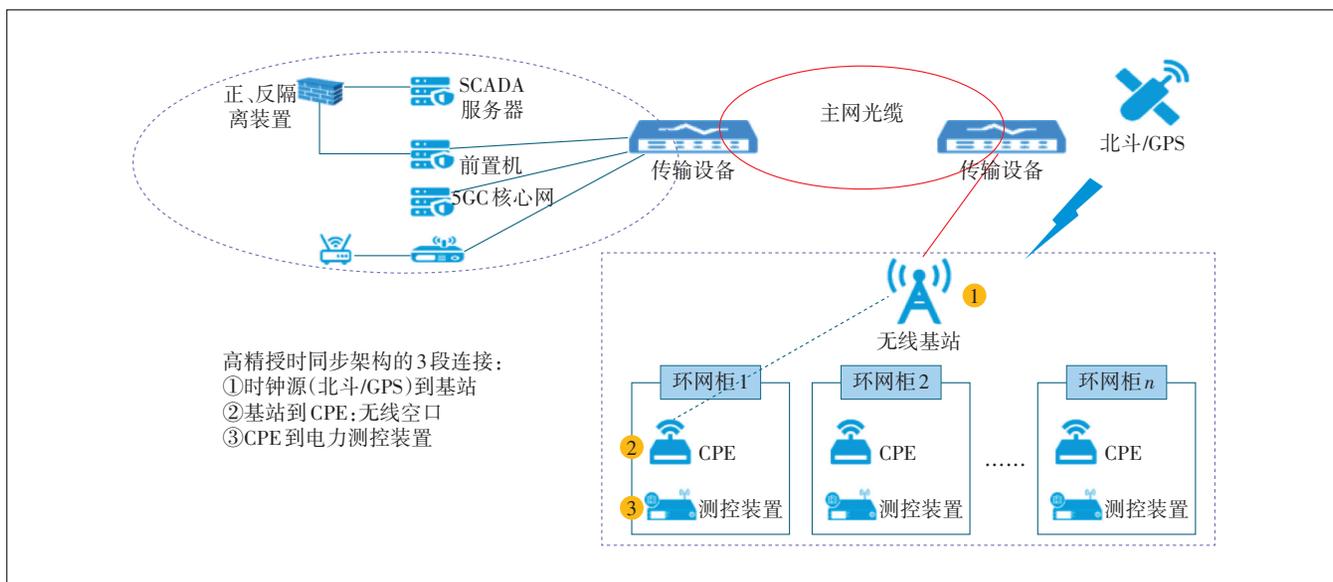


图5 基于5G网络的高精授时同步架构

或者GPS,5G基站通过自身北斗天线或GPS天线获取时钟,也可通过1588 V2协议从承载网获取时钟。推荐采用北斗或GPS+1588 V2异构组网、实现天地互备,提高网络授时的安全可靠。

b) 基站到CPE。5G基站将时钟信息通过空口广播(带内SIB16)或单播(携带SFN指示时钟参考点)方式传递给5G CPE。

c) CPE到电力测控装置。5G CPE将时钟信息通过IRIG-B码接口方式传递给电力终端,最终实现电力终端间微秒级的高精度时钟同步需求。

此外,时间同步的性能要求除了与时间同步机制本身强相关,还需要考虑信息处理本身的时延对时间同步精度的影响。通常信息系统延时主要由网络传输延时、网络设备逐跳转发延时以及系统对信息的处理延时组成。为了保证时间同步的精度,在组网方案上往往通过限制传输距离来限制传输时延;通过限制跳数上限以及限制单设备转发效率来降低转发时延。

3.6 端管云三级等保,防护智能电网安全

为防护智能电网的网络与数据安全,系统提供5G专网端管云三级等保、全栈可信可行的安全增强方案,包括基础网络安全、终端安全、数据传输安全、MEC边缘计算安全以及电力生产的安全态势感知,形

成事前预防、事中监测、事后溯源反制的端到端安全防护体系,保障业务连续性。电力5G专网安全防护框架如图6所示。

在图6中,电力5G专网安全防护框架包含基础网络安全、终端安全、数据传输安全、MEC边缘计算安全。

a) 基础网络安全措施包括切片隔离、5G网络态势感知、内生安全。通过无线网RB资源预留、承载网FexE-VPN硬切片、核心网专用UPF用户面下沉部署,实现5G专网切片隔离;通过部署5G网络态势感知系统,对基站、核心网、3A安全认证信息等进行网元监控防护;通过操作系统漏洞加固、机密数据保护、软件防篡改、主机安全检测、可信计算等措施强化网络内生安全。

b) 终端安全措施包括USIM卡主认证,机卡绑定和/或位置控制模式的二次认证,切片接入资源控制,终端接入零信任,全面收缩业务资源暴露面,预防DDoS攻击。

c) 数据传输安全措施包括采用国密算法对无线空口数据进行加密和完整性保护,UPF与MEC之间的N6接口通过专线承载、采用国密算法进行数据加密和完整性保护。

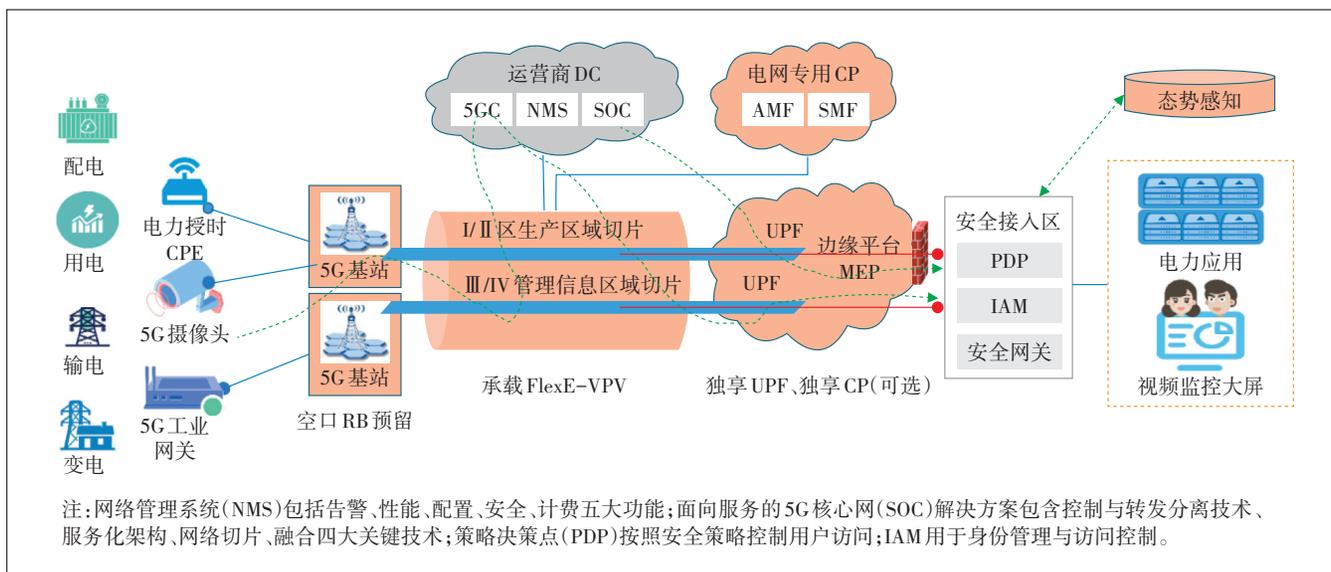


图6 电力5G专网安全防护框架

d) MEC边缘计算安全措施包括用户数据不出专网控制与审计以及N6口异常流量监控分析。通过PDP策略决策点、IAM身份管理与访问控制、安全网关与电力中心/变电站中控室的电力应用系统,进行安全接入。

4 结束语

本文在分析智能电网通信需求的基础上,提出SMART综合解决方案,并对方案中的各项关键技术和网络部署做了简明介绍。该方案具有如下特点:灵活的E2E网络切片,实现差异化专网服务;就近部署MEC算力,降低电网业务时延;高低频3CC载波聚合,助力用户极致体验;RedCap轻量化5G,赋能用电负荷精细化管理;高精度授时同步,打造TSN时间敏感网络;端管云三级等保,防护智能电网安全。该方案可满足电力行业超低时延、超大带宽、超精授时、超强安全的确定性网络通信需求;解决了工业互联网领域的确定性网络通信共性需求,也可广泛应用于智能制造、智能工厂、智慧港口、智慧园区等领域,为千行百业数智化转型构建可靠稳定柔性通信基础措施,推进全行业绿色低碳、节能减排。

参考文献:

[1] 余竞航,赵一辰,宋浒. 基于强化学习的边缘计算智能电网资源调度算法[J]. 电信科学, 2024, 40(1): 115-122.
[2] 武明亮,冯瑜瑶,纪金树,等. 5G在智能电网中的应用研究[J]. 邮电设计技术, 2022(8): 50-55.

[3] 朱斌,林琳,王光全,等. 5G边缘计算及切片网络一体化部署策略研究[J]. 邮电设计技术, 2022(6): 1-7.
[4] 3GPP. Evolution towards 5G-advanced [EB/OL]. [2024-08-05]. <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/ran-Webinar-2021>.
[5] 3GPP. Summary for RAN Rel-19 package: RP-232745[R]. 2023.
[6] IMT-2020(5G)推进组. 5G-advanced场景需求与关键技术白皮书[R/OL]. [2024-07-08]. <https://www.c114.com.cn/wireless/2935/a1215862.html>.
[7] 中国联合网络通信集团有限公司. 启新聚势 扬帆未来:中国联通5G行业专网产品体系2.0白皮书[R/OL]. [2024-05-08]. <https://www.guifanku.com/765843.html>.
[8] 5G确定性网络产业联盟. 5G确定性网络@电力系列白皮书I:需求、技术及实践[R/OL]. [2024-07-08]. https://www-file.huawei.com/-/media/CORP2020/pdf/download/5GDN_Smart_Grid_White_Paper_cn.pdf.
[9] 王东山,马跃,李艳,等. 面向电力业务的“IP数据网+光传输网”协同统一控制技术[J]. 电信科学, 2019, 35(3): 116-121.
[10] 王翊丞,郭瑞,蒙彤,等. 智能电网中基于代理盲签密的隐私保护方案[J]. 计算机工程, 2023, 49(5): 150-164.
[11] 华为技术有限公司. 迈向智能世界白皮书——无线网络:加速迈向5.5G,使能从万物互联到万物智联[R/OL]. [2024-07-08]. <https://www.modb.pro/doc/107410>.

作者简介:

汪保友,毕业于复旦大学,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为5G-A无线通信技术、大数据与人工智能、网络与信息安全;姚赛彬,毕业于上海交通大学,上海联通无线网络运营中心总经理,高级工程师,硕士,主要研究方向为无线通信前沿技术、通信网络规划、无线网优化;郭文浩,毕业于上海交通大学,工程师,主要负责5G专网运营及无线网络用户感知运营工作。