

电力业务与公网5G匹配模式及 合作建设

Matching Mode and Cooperative Construction of Power Service with Public 5G Network

苏俊浩¹, 刘 晗², 王玉东³, 辛培哲³, 李正浩², 刘明刚¹ (1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250100; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

Su Junhao¹, Liu Han², Wang Yudong³, Xin Peizhe³, Li Zhenghao², Liu Minggang¹ (1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

摘 要:

论述了电力系统应用5G网络的优势,并从电力业务空间分布、QoS性能、业务架构及安全防护等多角度与5G网络进行匹配,提供了5G与电力业务匹配的系统级框架;从公网资源独享专用与电力业务分区的角度,阐述了电力公司与运营商合作建设5G网络的模式,提出了合作建设的总体架构,为5G网络在电力系统的规模化应用指明方向。

关键词:

5G公网;新型电力系统;电力5G专网;共享共建

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.06.010

文章编号:1007-3043(2023)06-0051-07

中图分类号:TN915.85

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It discusses the advantages of applying 5G network in power system, matches 5G network from multiple perspectives, such as power service spatial distribution, QoS performance, service architecture and security protection, and provides a system level architecture for matching 5G with power service. From the perspective of exclusive use of public network resources and power service division, it expounds the mode of cooperation between power companies and operators to build 5G network, proposes an overall framework for cooperative construction, and points out the direction for the large-scale application of 5G network in power system.

Keywords:

5G public network; New power system; 5G private network for power; Sharing and co-construction

引用格式:苏俊浩,刘晗,王玉东,等. 电力业务与公网5G匹配模式及合作建设[J]. 邮电设计技术,2023(6):51-57.

0 引言

5G使能增强型移动宽带(eMBB)、超低时延和超可靠通信(uRLLC)、海量机器类通信(mMTC)三大典型应用场景,其高可靠、低时延、大连接和灵活接入的技术特性,以及通过切片实现的安全隔离能力和网络资源及性能的确定性,可有效支撑高弹性电网的资源配置和高电气化终端的多元互动,将成为构建新型电力系统的关键通信技术支撑。

以新能源为主体的新型电力系统在通信过程中具有海量接入、实时突发的特点,传统通信方式在新型电力系统中存在瓶颈。首先,光纤通信敷设成本高、实施难度大,无法解决海量分布式能源和配用电终端的通信接入需求;其次,4G虽应用于用电信息采集、配电自动化“二遥”等电力业务,但无法从根本上保证业务时延、可靠性等关键指标。尽管国家能源局技术政策上允许无线公网应用于分布式能源、配用电终端、小型发电厂等场景的电力监控业务^[1],但是4G网络无法在技术上实现核心网、承载网等通信资源的物理隔离与专用,网络性能和安全的确定性、可控性

收稿日期:2023-05-07

差,导致电力监控业务无法在4G公网上得到应用推广;230/1 800 MHz无线专网可承载配电自动化“三遥”等秒级时延的电力监控业务和低速率管理信息类业务,但其时延性能和误码性能无法满足配网差动保护、智能分布式馈线自动化(Feeder Automation, FA)等配电网关键业务^[2]的10 ms级时延、99.999%可靠性要求,也不能承载视频监控、无人机巡检等大带宽及高速移动类业务,应用场景大大受限。

根据5G共建共享政策,需探索依托运营商5G网络,通过公网资源专用、参数优化等方式,实现安全、可靠、高效的电力业务承载。在构建电力5G网络的过程中应从多角度分析5G网络与电力业务的匹配度。同时,电力与运营商共建共享5G网络的技术模式也影响电力业务实际应用性能,应根据电力业务安全防护要求和性能需求有针对性地开展测试验证。

1 5G应用于新型电力系统的技术优势

1.1 5G端到端的物理隔离技术优势

5G切片按需实现空口、承载网、5G核心网(5GC)的物理隔离。空口支持用户与运营商共享基站的物理资源块(PRB)隔离及用户独享基站的专用频率隔离,承载网具备基于灵活以太网(FlexE)的物理隔离机制,核心网根据用户需求进行网元的独享定制化部署。5G核心网基于服务的架构(SBA),对于有特殊要求的一般行业用户,用户平面功能(UPF)可下沉专用,既缩短业务流传输路径降低承载网业务时延,又实现业务流安全可靠的本地落地。对于安全隔离要求高的电力行业用户,支持会话管理功能(SMF)、核心接入和移动管理功能(AMF)等5G核心网控制面网元(5GC-CP)独享,提高整网的可控性和安全性。

端到端的物理隔离能力,为5G通过“公网专用”的商业和技术模式,按需实现不同安全分区电力业务的横向隔离创造了技术可行性。在提高了业务安全性的同时,资源的物理独享为时延、可靠性、速率等性能的确定性提供了根本保证。此外,5G核心网网元的灵活部署,为适配分布在省、市(县)、厂站的各类电力主(子)站提供了良好的技术能力。5G具备空间和资源的物理隔离能力,在承载新型电力系统的大规模分布式能源调控等监控业务更为安全高效。

1.2 5G低时延及高可靠技术优势

5G低时延高可靠技术为电力保护控制业务提供系统级方案。上行免授权(Uplink Grant-free)调度模

式^[3]取消UE调度请求(Scheduling Request, SR)信令的发送,降低交互时延;参数配置集(Numerology)调整子载波间隔(SCS),减小物理帧长;调整低码率的调制与编码策略(MCS)表及混合自动重传请求(HARQ)时序参数 $K^{[4]}$ 可提高传输可靠性;双工模式配置上下行频分双工(FDD)或时分双工(TDD)模式,帧结构配置时隙配比,共同调整空口时延。

在系统帧结构、频谱带宽(体现在可用PRB数量)、多天线(MIMO)等时间、频率、空间基础物理资源确定的前提下,业务速率、可靠性与空口时延存在逻辑关系。空口总时延由传输次数和单次传输时延决定,其中传输次数由信干噪比(SINR)、MCS和可靠性等因素决定,单次传输时延则由帧结构、双工模式、调度模式和时隙参数等因素决定。在TDD模式下传输时延会因数据到达时刻不同而在一定范围内变化,图1所示为带宽、可靠性与空口时延逻辑关系示意。

a) 传输次数计算。如图1所示,输入初始空口参数与业务带宽需求 w ,计算传输块大小(Transport Block Size, TBS);根据文献[3]TBS的计算过程倒推中间变量 N_{info} ;根据 N_{info} 确定MCS索引值(MCS Index);获取误块率(Block Error Rate, BLER);计算传输次数 N 。图1中, u 为子载波间隔参数, N_{RE} 为可用子载波数, R 为目标码率, Q_m 为调制阶数, V 为UE层数, r 为业务可靠性, T 为空口时延。

b) 时延估算。结合空口参数计算时延的过程中,调整时序参数和调度模式仅影响时延估算过程,调整其他因素同时影响传输次数的计算。假设确定某种业务带宽及可靠性需求,若减小 K 值,可直接降低空口时延;若增大SCS,一方面减小时隙长度,同时减小TBS降低MCS阶数,将影响传输次数。

通过引入灵活的SCS参数、Grant-free和SR等调度模式、时序参数及基于LDPC/Polar码的MCS等机制,提高5G对时延和可靠性的控制能力,达到更为严格的指标。

1.3 5G技术优势在新型电力系统中的应用要点

横向隔离是《电力监控系统安全防护规定》的基本要求之一。利用5G端到端的隔离能力,在电力与运营商共建5G中,可为不同安全隔离要求的业务进行差异化的组网,灵活实现从逻辑隔离到物理隔离的定制化方案。

在众多参数中,对5G低时延高可靠影响显著且在工程中便于选择和配置的主要参数主要为双工模式和调

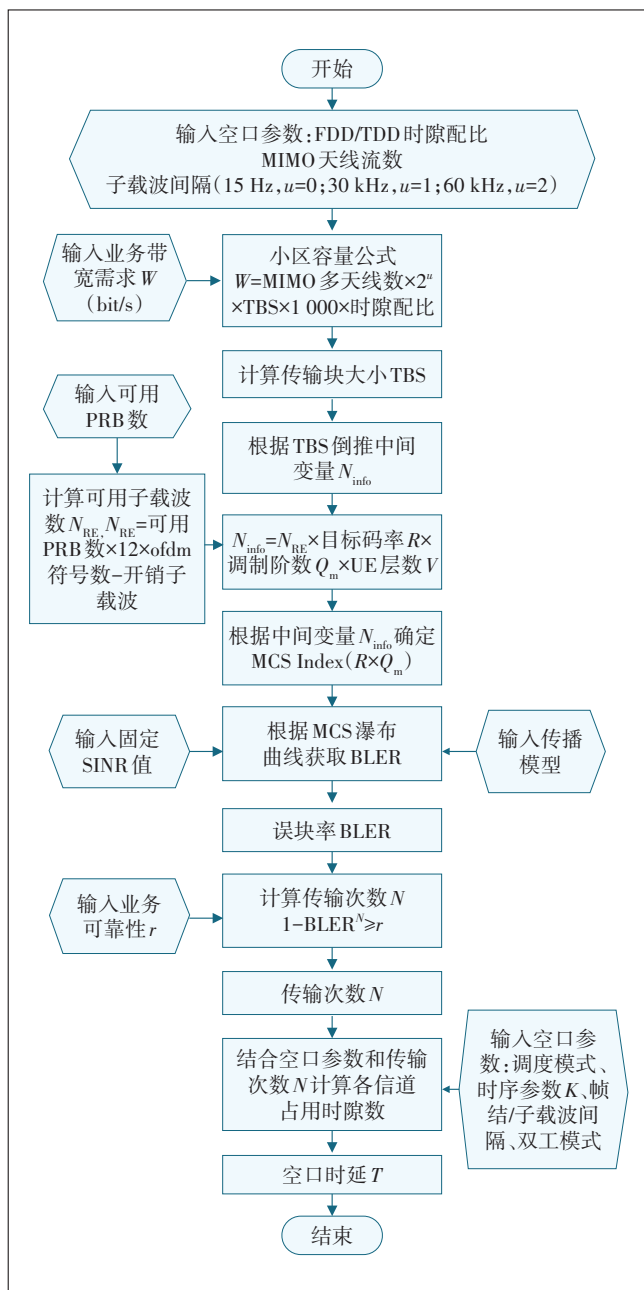


图1 带宽、可靠性与空口时延逻辑关系

度模式。以运营商(中国电信、中国联通)典型帧结构

DDDSUDDSUU 为例,分析 FDD/TDD 免调度、SR 调度模式空口时延,结果如表 1 所示。从表 1 可见,采用免调度和 FDD 模式能够极大地减小时延,满足智能分布式 FA、配网差动保护等新型电力系统业务的低时延需求。

与 4G 固定的核心网架构及单一的空口参数相比,通过将 5G 技术优势与电力业务需求相结合,将进一步推动 5G 在新型电力系统应用的新模式、新业态,支撑能源产业高质量发展^[5]。

2 电力业务与运营商 5G 网络匹配度分析

按空间分布布局 5G 网络,确定 5G 网络优先覆盖区域,明确当前网络重点解决的业务需求;按业务性能匹配 5G 网络场景,确定 5G 网络性能需求及切片类型;按业务架构部署 5G 网络用户面网元,确定 UPF 共享模式及下沉位置;按业务安防需求部署 5GC-CP,确定 AMF、SMF 核心网网元的共享模式及合作方式。图 2 所示为电力业务与 5G 网络匹配及网络建设流程。

2.1 电力业务空间分布与运营商 5G 网络匹配度

根据电压等级不同,电力业务分为主网业务和配网业务,主网业务指 35 kV 以上高电压等级输电线路配合的电网业务。配网业务指 35 kV 及以下终端配电网业务,如配电自动化业务(“二遥”“三遥”)、用电负荷控制、智能分布式 FA(馈线自动化)等。电力业务空间分布与 5G 网络匹配度如表 2 所示。

2.2 电力业务性能需求与运营商 5G 网络匹配度

2.2.1 5G QoS 性能分析

电力业务可分为生产控制类、信息管理类、采集类、移动类等 4 类典型场景。生产控制类业务安全性高、对时延敏感,同时具有海量终端接入的需求;信息管理类业务以数据传输为主,对传输带宽要求高;采集类业务对终端接入数量要求高,对传输带宽及时延要求相对低;移动类终端具有移动性、广域性特点,对传输带宽及接入数量有需求。3GPP TS 23.501 中表

表 1 运营商空口时延分析

SCS= 30 kHz	FDD 免调度				FDD SR 调度				TDD 免调度				TDD SR 调度			
	单次传 输	一次重 传	二次重 传	三次重 传	单次传 输	一次重 传	二次重 传	三次重 传	单次传 输	一次重 传	二次重 传	三次重 传	单次传 输	一次重 传	二次重 传	三次重 传
DL/ms	0.5	2.5	4.5	6.5	0.5	2.5	4.5	6.5	2.95	5.35	7.75	10.0	2.95	5.35	7.75	10.0
UL/ms	1.5	2.5	3.5	4.5	2.5	3.5	4.5	5.5	4.20	5.90	7.40	9.2	5.55	7.20	8.70	10.6
DL+UL/ms	2.0	5.0	8.0	11.0	3.0	6.0	9.0	12.0	7.15	11.25	15.15	19.2	8.50	12.55	16.45	20.6

注:时序参数 K_0 取 0,其余 K 值参数取 2。

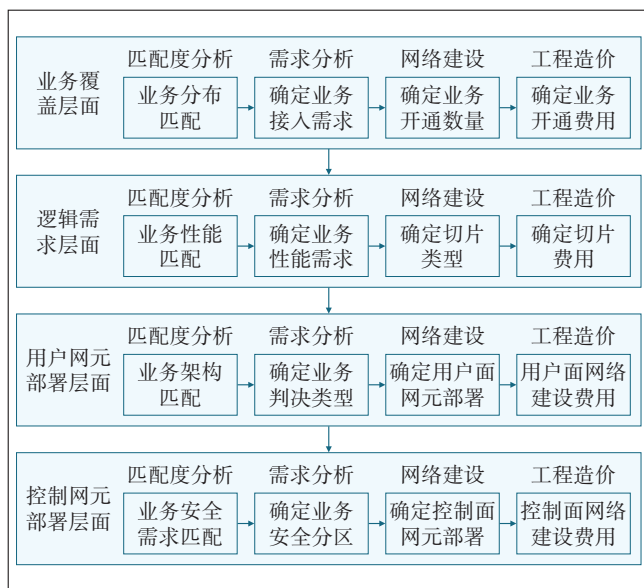


图2 电力业务与5G网络匹配及网络建设流程

表2 电力业务空间分布与5G网络匹配度

电压等级	现状	5G网络匹配	5G网络现状
35 kV 以上主网	光纤覆盖完善, 现网资源齐全	匹配度低	5G网络覆盖随着电压等级升高呈下降趋势, 500 kV 及以上变电站和输电线路, 由于站址和线路走廊多为人烟稀少郊区, 存在5G覆盖盲区, 主网场景需要与运营商协同建设和热点区域补盲
35 kV 及以下配网	配用电网场景具有海量终端接入需求, 光纤覆盖成本高、难度大, 对5G无线接入的需求最为迫切	匹配度高	配用电网场景人员密集, 运营商5G网络覆盖广, 与5G网络覆盖适配性较好

5.7.4-1 给出了标准化的5QI到QoS特性映射^[6], 电力业务5QI如表3所示。

2.2.2 时延性能分析

2.2.2.1 空口时延

根据表1的结果, 典型的TDD UL空口时延在5~11 ms, FDD UL空口时延在2~6 ms。

2.2.2.2 承载网时延

运营商承载网使用SPN、IPRAN或STN技术, 设备转发机制相似, 差异主要体现在路由控制技术。通过组织某设备厂家开展测试, 切片交叉PE节点典型时延约为13 μs, 切片交叉P节点典型时延约为3.45 μs。

当UPF部署在边缘时, 承载网时延忽略不计。

当UPF部署在地(市)时, 对于地(市)200 km的光缆长度、10个地(市)内承载网节点的网络, 租用运营商承载网的时延约为2 ms。

表3 电力业务5QI

业务大类	业务类型	带宽需求	时延需求	可靠性需求/%	5QI值
采集类	用电信息采集/高级计量	<2 Mbit/s	<200 ms	99.9	2
	分布式能源调控采集类	上行峰值800 kbit/s, 下行峰值400 kbit/s	<3 s		4
移动类	变电站巡检机器人	4~10 Mbit/s	<200 ms		2
	输电线路无人机巡检	4~10 Mbit/s	<200 ms		2
管理类	配电房视频综合监控	20~100 Mbit/s	<200 ms		2
	移动现场施工作业管控	20~100 Mbit/s	<200 ms		2
	应急现场自组网综合应用	20~100 Mbit/s	<200 ms		2
	高清视频监控	4~10 Mbit/s	<200 ms		2
控制类	分布式能源调控控制类	≤19.2 kbit/s	<1 s	99.999	2
	精准负荷控制	≤256 kbit/s	<50 ms		30
	配电网微型同步相量测量PMU	≤10 Mbit/s	<50 ms		30
	配电自动化	≤19.2 kbit/s	<10 ms		82
	配电网差动保护	2 Mbit/s	<10 ms		82
	智能分布式FA	2 Mbit/s	<20 ms		13

当UPF部署在省公司时, 对于省干1 000 km光缆长度、10个省干承载网节点的网络, 租用运营商承载网的时延约为4 ms。

2.2.2.3 核心网时延

UPF转发时延与业务流量相关, 典型时延在2 ms以内, 根据某设备厂家提供的典型实测数据, 在64 Gbit/s吞吐量情况下, UPF转发时延为0.6 ms, 抖动在10 μs左右。

5G TDD UL端到端时延测算如表4所示。综上所述, 空口时延和UPF的部署位置是5G端到端时延的主要组成部分。通过优化空口参数、UPF下沉地(市)等手段, 5G TDD系统可将端到端时延控制在14 ms以内, 基本满足配网差动保护、智能分布式FA等关键业务的要求。在UPF边缘部署时, 5G FDD系统可将端到端时延控制在7 ms以内。

表4 5G TDD UL端到端时延测算

方案	时延/ms	备注
边缘UPF部署	5.6~11.6	空口时延+UPF转发时延
UPF地(市)部署	7.6~13.6	空口时延+承载网+UPF转发时延
UPF省公司部署	9.6~15.6	空口时延+承载网+UPF转发时延

2.2.3 时间同步性能分析

电网电力调度和故障分析判断对时间同步有广泛需求,尤其在实时控制领域,电力自动化设备(系统)直接使用时间同步系统实现时间同步^[7]。根据电力业务时间同步精确度要求可分为1 μ s、1 ms、10 ms和1 s 4个等级,目前5G网络针对eMBB场景的时间精度需求可达到1.5 μ s,同时3GPP标准引入的时间基准参数将进一步提高时间分辨率^[8-9]。

2.3 电力业务架构需求与运营商5G网络匹配度

根据业务架构可将电力业务分为点对点交互类、本地判决类和远端判决类。

点对点交互类指电力UE两两交互,数据通过UPF转发而不需上传至主站,典型业务包括配网差动保

护、智能分布式FA等。

本地判决类指电力UE数据本地传输、本地处理,数据流经边缘UPF上传至局域主站,局域主站处理下发控制命令至UE,典型业务为变电站巡检机器人。

远端判决类指电力UE数据通过UPF经安全接入区上传至部署于地(市)公司或省公司的业务主站,主站处理下发控制命令至UE^[10-11]。典型业务包括配电自动化、精准负荷控制、用电信息采集等。

图3所示为业务架构数据流向示意,局域范围的本地判决类业务UPF部署于业务所在厂站,广域范围的远端判决类业务UPF部署于地(市)、省公司中心主站。局域或广域范围的点对点交互类业务UPF根据数据流部署在边缘或地(市)机房。

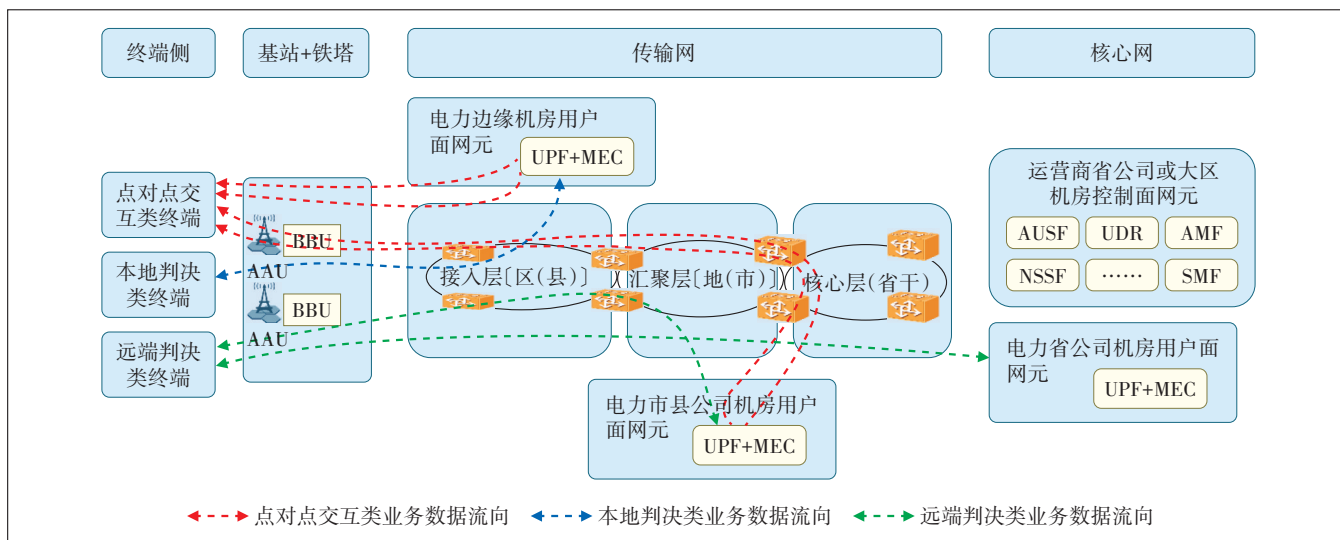


图3 业务架构数据流向

2.4 电力业务安全需求与运营商5G网络匹配度

将电力监控系统安防需求^[12-13]与3GPP标准^[14-19]进行匹配,分析电力5G网络在无线网、核心网及承载网所采取的安全技术及架构^[20-23]。在确定UPF共享程度及部署位置的情况下,按电力业务安全分区的隔离性要求,确定gNB及5GC-CP的共享程度及部署位置。将电力业务架构与安全需求统一考虑,电力业务与5G网络匹配的结论如表5所示。

3 电力与运营商合建5G方案

3.1 合建方式

根据基站、核心网资源独享程度将运营商5G网络分为3种专网方式^[24-25]:虚拟专网为5G gNB、核心网资源全共享方式;混合专网为基站、核心网控制面共享,

用户面用户独享方式;独立专网为基站、核心网用户面及关键控制面网元用户独享方式。运营商可提供的行业专网方式如表6所示。本文分析运营商5G专网特点以及电力业务需求,创新性地将现有运营商5G专网与电力业务网进行匹配,提出合作建设电力5G网络的方案。

3.1.1 虚拟专网方式

虚拟专网方式完全复用公网5G资源,适用于隔离度、敏感度不高的电力业务,适合于互联网大区、外网业务。

电力与运营商合作方式:电力租用运营商5G虚拟专网,共享公网资源,无需单独建设网络设备,可通过VPN、DNN等技术实现逻辑隔离。

3.1.2 独立专网方式

表5 电力业务架构及安全需求与5G网络匹配度分析

所属大区	业务类型	业务架构	基站	核心网	
				用户面网元共享程度	控制面网元共享程度
生产控制大区	配电自动化	远端判决类	共享或独享基站	独享用户面网元	独享接入控制 AMF 网元及会话管理 SMF 网元
	精准负荷控制				
	分布式电源				
	配网 PMU				
	智能分布式 FA	点对点交互类			
	配网差动保护				
管理信息大区	用电信息采集	远端判决类	共享基站	独享用户面网元	共享核心网网元
	无人机巡检				
	智能配电台区				
	电动汽车充电桩				
	移动现场作业管理				
	应急现场管理				
	变电站巡检机器人	本地判决类			
互联网大区	远程视频会议	远端判决类	共享基站	共享用户面网元	共享核心网网元

表6 运营商可提供的行业专网方式

运营商提供的专网模式			5G网络网元共享程度		
中国移动	中国联通	中国电信	基站	核心网用户面网元	核心网控制面网元
优享	虚拟专网	致远	共享	共享	共享
专享	混合专网	比邻	共享	独享	共享
尊享	独立专网	如翼	可用户独享	独享	关键网元独享

独立专网方式为行业用户独立建设全部或部分 5GC-CP, 行业用户独享 UPF, gNB 及空口频率可按需独享, 安全隔离度最高, 适合于生产控制大区业务。

电力与运营商合作方式: 电力用户通过租赁或运营商转售等方式, 独享 UPF 及 SMF/AMF (可选)。UPF 部署于地(市)电力公司机房用于电力广域场景接入或部署于变电站、发电厂等电力园区场景。SMF/AMF 网元部署于运营商 5GC 机房。

3.1.3 混合专网方式

混合专网方式为行业用户独享 UPF, 与运营商共享 gNB 及 5GC-CP, 适用于隔离度、敏感度较高的管理信息大区业务。

电力与运营商合作方式: 电力用户通过租赁或运营商转售等方式独享 UPF, 保证数据转发的隔离性。电力与运营商共享 5GC-CP, 向运营商提出业务接入及性能需求保证业务接入能力。电力专用 UPF 部署于省、市电力公司机房用于电力广域场景业务落地,

或部署于变电站、发电厂等用于电力园区场景业务落地。图4所示为运营商合作建设方式示意。

3.2 建设及运维

电力 5G 应用初期, 以电力企业租用运营商的 5G 核心网、承载网资源为主, 并由运营商代维。资产需归属电力企业的, 可由运营商转售。随着运营商 5G 能力开放平台和电力企业 5G 管理平台的推进以及电力企业 5G 运维经验的积累, 远期 UPF、SMF、AMF 等独享网元可按需移交电力企业与运营商共管、共维。

4 结论

本文分析 5G 在新型电力系统中应用的安全隔离和低时延高可靠技术优势, 创新性地将 5G 技术优势与电力业务需求深度结合, 将加快 5G 技术的行业应用和推广。从业务空间分布、性能指标、业务架构、安全隔离等角度全面分析 5G 与电力业务的匹配性, 并结合电力业务与 5G 网络架构, 总体设计了电力与运营商合作建设 5G 的技术模式。为电力行业提供了可参考的 5G 行业专网架构, 可促进“智能电网+5G”等能源领域 5G 应用推广。

当前, 5G 正由试点验证阶段向应用阶段过渡, 依然存在郊区变电站、输电线路、地下配电室等覆盖盲区, 以及设备功耗高等问题需要解决, 需进一步结合卫星通信、宽窄带自组网等技术共同实现多体制电力无线通信技术广覆盖。此外, 电力与运营商的商业模式、产业生态也需进一步探索和完善。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力监控系统安全防护总体方案(国能安全 2015 36 号) [R/OL]. [2023-04-12]. <https://jz.docin.com/p-2618673123.html>.
- [2] 窦开明. 配电网 WAMS 通信规约及组网技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [3] 梁建生, 陈晓冬. uRLLC 关键技术与空口时延分析[J]. 移动通信, 2020(2): 35-39.
- [4] 3GPP. Physical layer procedures for data specification; TS 38. 214[S/OL]. [2023-04-12]. <ftp://3gpp.org/Specs>.
- [5] 国家发展改革委. 能源领域 5G 应用实施方案(发改能源 2021 807 号) [R/OL]. [2023-04-12]. <https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/bookpdf/probation?SiteID=1&bookID=141064>.
- [6] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS) Stage1 specification; TS 23. 501[S/OL]. [2023-04-12]. <ftp://3gpp.org/Specs>.
- [7] 刘源, 毕天姝, 徐全, 等. 配电网高精度同步相量测量技术方案与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 23-29.

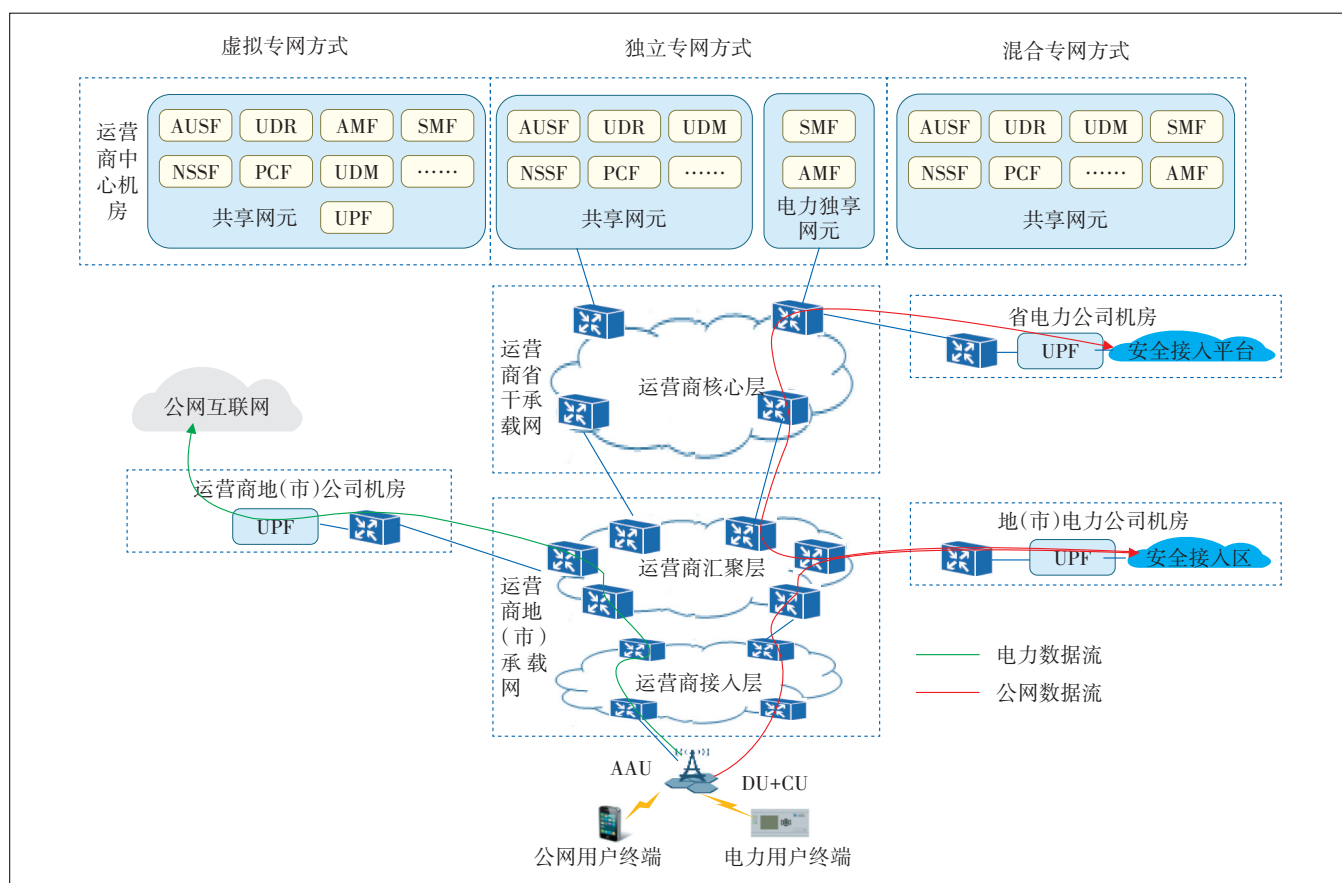


图4 运营商合作建设方式

- [8] 赵侠,陈一强,陈其铭,等. 基于5G的电力系统时间同步方案[J]. 移动通信,2020(7):7-12.
- [9] 袁通,高厚磊,徐彬,等. 5G高精度时间同步及在电网中的应用模式研究[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(8):47-53.
- [10] 杜鹏,晏亮,高保成,等. 基于电力调度数据网的广域数据采集方案[J]. 电力系统自动化,2019,43(13):156-161.
- [11] 徐箭,廖思阳,魏聪颖,等. 基于广域量测信息的配电网协调控制技术展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(18):12-22.
- [12] 张涛,赵东艳,薛峰,等. 电力系统智能终端信息安全防护技术研究框架[J]. 电力系统自动化,2019(19):7-14+91.
- [13] MCDANIEL P, MCLAUGHLIN S. Security and privacy challenges in the smart grid[J]. IEEE Security & Privacy,2009,7(3):75-77.
- [14] 3GPP. Services provided by the physical layer specification: TS 38. 202[S/OL]. [2023-04-12]. <http://3gpp.org/Specs>.
- [15] 3GPP. Medium access control (MAC) specification: TS 38. 321[S/OL]. [2023-04-12]. <http://3gpp.org/Specs>.
- [16] 3GPP. Radio link control (RLC) specification: TS 38. 322[S/OL]. [2023-04-12]. <http://3gpp.org/Specs>.
- [17] 3GPP. Packet data convergence protocol (PDCP) specification: TS 38. 323[S/OL]. [2023-04-12]. <http://3gpp.org/Specs>.
- [18] 3GPP. Radio resource control (RRC) protocol specification: TS 38. 323[S/OL]. [2023-04-12]. <http://3gpp.org/Specs>.
- [19] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS) Stage2 specification: TS 23. 502[S/OL]. [2023-04-12]. <http://3gpp.org/Specs>.
- [20] 汪强,徐小兰,张剑. 一种新的智能变电站通信业务安全隔离技术的研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(17):139-144.
- [21] 李映雪,陆俊,徐志强,等. 多技术融合的智能配电终端通信接入架构设计[J]. 电力系统保护与控制,2018,632(10):169-175.
- [22] 王自成,李广华,方芳,等. IEC 62351 国际互操作的总结与思考[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):1-6.
- [23] 李田,苏盛,杨洪明,等. 电力信息物理系统网络安全防护中的底线思维[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):162-167.
- [24] 马涛. 5G网络共享共建方案[J]. 电信科学,2019,35(9):153-157.
- [25] 张志荣,李志军,陈建刚,等. 5G网络共建共享技术研究[J]. 电子技术应用,2020,46(4):1-5.

作者简介:

苏俊浩,工程师,主要从事电力系统通信规划设计工作;刘晗,高级工程师,主要从事电力系统通信及数字化项目管理工作;王玉东,教授级高级工程师,主要从事电网智能化及电力通信网络规划工作;辛培哲,教授级高级工程师,主要从事电网智能化及电力通信网络规划工作;李正浩,工程师,主要从事电力系统数字化项目管理工作;刘明刚,高级工程师,主要从事电力系统通信规划设计工作。