

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CAICI

中国通信企业协会团体标准

T/CAICI XXXX—XXXX

海上风电 5G 回传网络通信技术标准

5G backhaul network communication technology standards of offshore wind power

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国通信企业协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 缩略语	3
5 海上风电 5G 通信网络应用诉求	3
6 海上风电 5G 通信网络应用价值	4
7 海上风电传输网络设计	4
7.1 无线前传组网方式	4
7.2 无线回传组网方式	5
7.3 塔筒专线承载方式	6
7.4 设备及端口配置要求	6
7.5 设备安装要求	7
8 海上风电无线网络设计	8
8.1 总体架构	8
8.2 宏站部署方式	8
8.3 室分部署方式	9
8.4 技术要求	10
9 海上风电核心网设计	10
9.1 总体要求	10
9.2 5G 电力切片安全隔离	10
9.3 数据不出园区	11
10 海上风电网络安全设计及要求	11
10.1 安全增强方式要求	11
10.2 传输网保护与恢复要求	13
11 海上风电网络运维要求	13
11.1 远程视觉运维	13
11.2 数字孪生系统	14
参 考 文 献	15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国通信企业协会标准化管理委员会提出并归口。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件起草单位：中国移动通信集团设计院有限公司、中国移动通信集团广东有限公司惠州分公司、北京电信规划设计院有限公司

本文件主要起草人：程广展、陈鑫雄、熊毅、刘仁柱、王艳涛、陶东升

本文件为中国通信企业协会首次发布。

海上风电 5G 回传网络通信技术标准

1 范围

本文件规定了海上风电场5G回传网络总体架构和建设方式，明确了组网设计、设备配置、安装要求以及网络安全和运维要求。

本文件适用于海上风电场内的通信网络设计、设备配置及运行维护。其他5G垂直行业场景可参考执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T51308-2019 海上风力发电场设计标准
- GB/T50571-2010 海上风力发电工程施工规范
- GB/T37424-2019 海上风力发电机组运行及维护要求
- GB 51096-2015 风力发电场设计规范
- GB 50689-2011 通信局(站)防雷与接地工程设计规范
- GB 51120-2015 通信局(站)防雷与接地工程验收规范
- GB/T 51369-2019 通信设备安装工程抗震设计标准
- GB 50217-2018 电力工程电缆设计标准
- GB 51194-2016 通信电源设备安装工程设计规范
- GB 51199-2016 通信电源设备安装工程验收规范
- YD 5059-2005 电信设备安装抗震设计规范
- YD/T 2374-2011(2024) 分组传送网（PTN）总体技术要求
- YD/T 2397-2012(2024) 分组传送网（PTN）设备技术要求
- YD/T 5200-2021 分组传送网（PTN）工程技术规范
- YD/T 5092-2024 波分复用（WDM）光纤传输系统工程技术规范
- YD/T 5264-2021 数字蜂窝移动通信网5G无线网工程技术规范
- YD/T 5230-2016 移动通信基站工程技术规范

YD/T 5263-2021 数字蜂窝移动通信网5G核心网工程技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1 海上风电场 Offshore Wind Farm

位于沿海多年平均大潮高潮线以下海域的风力发电机组，包括潮间带、潮下带滩涂、近海、远海等不同海域，以及在相应开发海域内无居民的海岛上建设的风力发电场。

3.2 风机塔 Wind Turbine Tower

风机塔筒就是风力发电的塔杆，在风力发电机组中主要起支撑作用，同时吸收机组震动。

3.3 海上升压变电站 Offshore Substation

海上风电场内，用于布置电气系统、安全系统和辅助系统等设备，汇集风电场电能经升压后送出的设施。

3.4 陆上集控中心 Onshore Control Center

陆上集控中心主要用于监控海上风电装置的状态和数据，实时掌握风力机的运行情况、发电量、风速等基本数据信息。可以将海上风电的电能进行变电，转化为适合传输和使用的电能。

3.5 前传网络

5G前传网络是5G接入网中连接有源天线单元（AAU）与分布式单元（DU）的传输网络。其核心功能是承载AAU与DU之间的基带信号传输，包括原始无线射频数据（I/Q数据）、控制信令及同步信号等。

3.6 回传网络

5G回传网络是5G承载网中连接集中单元（CU）与核心网的传输网络，负责承载用户面数据（UPF流量）、控制面信令及网络管理信息。

3.7 MTN 切片

MTN切片是国际电信联盟（ITU-T）在G.mtn标准中定义的一种承载网切片技术，旨在为5G网络提供端到端的硬隔离资源划分能力。其核心目标是通过时隙化通道分割，实现网络资源的精准分配与隔离，满足垂直行业对差异化服务质量的需求。

3.8 FlexE 接口技术

FlexE是一种基于以太网技术的接口解决方案，通过解耦MAC层与PHY层的传统绑定关系，实现接口资源的灵活管理与带宽按需分配。

3.9 SR-TP

SR-TP是面向传输的分段路由隧道技术，结合了传统MPLS-TP的传输特性（如OAM、APS保护）和SR的源路由机制，专为5G承载网设计，提供高可靠、低时延的端到端业务承载能力。

3.10 半有源波分

半有源波分复用是一种结合无源与有源设备优势的5G前传技术，旨在解决光纤资源紧张与运维管理难题。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件：

SPN:切片分组网（Slicing Packet Network）

STN:智能传输网络(Smart Transport Network)

IP RAN:无线接入网IP化(IP Radio Access Network)

CPE:客户终端设备(Customer Premise Equipment)

ODF: 光纤配线架（Optical Distribution Frame）

UPF:用户面功能（User Plane Function）

MEC:多接入边缘计算（Multi-access Edge Computing）

BBU:室内基带处理单元（Building Base Band Unit）

CU:集中单元（Centralized Unit）

DU:分布单元（Distributed Unit）

RRU:射频拉远单元（Remote Radio Unit）

AAU:有源天线单元（Active Antenna Unit）

CPRI:通用公共无线电接口（Common Public Radio Interface）

OAM:操作维护管理（Operation Administration and Maintenance）

VPN:虚拟专用网络（Virtual Private Network）

TDM:时分复用（Time Division Multiplexing）

SRV6:基于IPv6的段路由（Segment Routing IPv6）

RB:资源块（Resource Block）

GIS:地理信息系统（Geographic Information System）

AR:增强现实（Augmented Reality）

5 海上风电 5G 通信网络应用诉求

5.1 信号覆盖需求

海上风电场普遍地理位置偏僻，离岸距离越来越远，分布越来越广，由最初的潮间带、潮下带，逐步发展到近海和深海区域，困扰海上风电的通信问题愈发明显，通信信号弱、不稳定、时延高、衰减大、

干扰强。因此海上风电场室外海域需要广覆盖，风机塔筒和升压站室内需深度覆盖，以满足人员生产作业及日常巡检维护的通信需求。

5.2 智能转型需求

5G网络具有大带宽、低时延、大连接等特点，可满足企业自动化、智能化、数字化转型升级需求。

低时延：毫秒级精准负荷控制、主动配电网差动保护等控制类下行业务。

大连接：智能配电网、智能辐射防护、智慧消防、物联网数据采集等信息采集类上行业务。

大带宽：输变电路状态监控、先进融合通信系统、无人机智能巡检、机器人智能巡检维修等移动巡检类业务应用。

5.3 安全保障需求

海上风电场的办公人员需要同时访问公网和办公内网，存在异地漫游、业务隔离、数据不出园、本地业务保障等需求，需打造专属的数据通道，提升办公效率、便利性及安全性。

海上风电场远离陆地，时常处在高温暴晒、高盐腐蚀、高湿大雾等恶劣环境中，海上风电机组安装的通信设备会经历台风、腐蚀、湿热、霉菌等多重挑战，因此设备应具备适应性好、可靠性高、品质优秀、故障率低等特点，以确保正常海上通信和业务开展。

6 海上风电 5G 通信网络应用价值

海上风电5G通信网络通过大带宽、低时延等特性实现风机运行数据实时回传与远程智能运维，结合无人机巡检和AR远程协作将故障响应效率提升50%，网络可用性达99.99%，风机利用率提升12%，智能调度系统将海缆巡检效率提高60%，并实现全海域通信时延波动小于5ms，为海上风电稳定并网与规模化扩展提供技术保障。其“宏站+室分+水下光网”立体组网模式突破传统卫星通信成本高、4G覆盖距离短的瓶颈，为深远海风电开发提供安全高效的数字基础设施支撑。助力政府新能源高质量发展，推动实现“双碳”目标，促进数字经济发展。

7 海上风电传输网络设计

7.1 无线前传组网方式

前传网络宜采用半有源波分架构进行组网，半有源波分支持前传网络的 OAM，支持链路保护倒换，实现前传网络的统一管控。前传网络接口支持 25Ge CPRI，连接 RRU 和 BBU，满足 10KM 传输要求。前传网络 OAM 支持光链路诊断和 LOS 告警，电流电压告警，光发送和接收功率告警，温度告警，日常状态监控，以及远程调试。半有源波分支持链路保护倒换，实现前传网络保护。

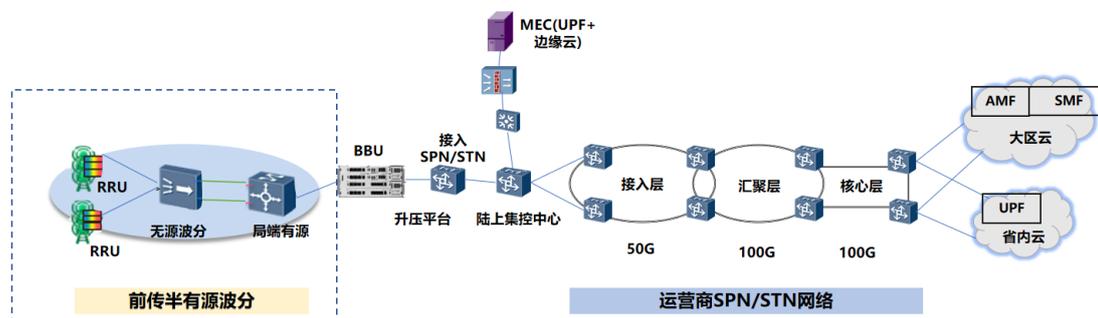


图1 无线前传组网示意图

7.2 无线回传组网方式

在升压站部署 SPN/STN 接入层设备（以下简称传输接入设备），在陆上集控中心部署 SPN/STN 汇聚层设备，构建 SPN/STN 传输网络系统为 5G 回传业务提供陆地核心网接入通道。塔筒侧通信系统通过复用现有客户侧 ODF 配线架进行光缆跳接，确保海上风电场 5G 业务的数据传输需求，实现业务数据传输的网络切片化分组隔离，同时优化传输资源利用率。陆上集控中心 SPN 节点宜采用双路由接入运营商 SPN/STN 网络，提高整个传输网络的安全性。

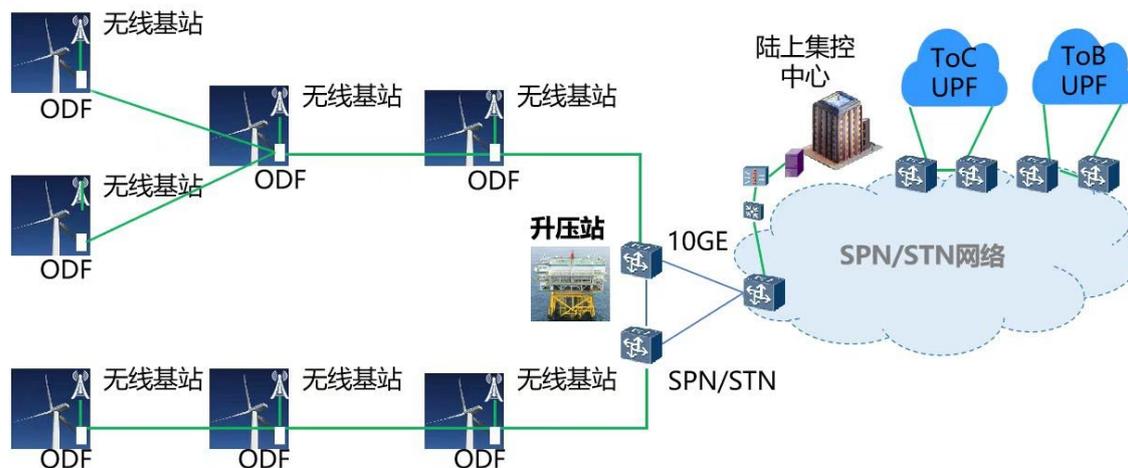


图2 无线回传组网示意图

SPN 是我国自主创新的新一代传送网综合业务承载技术，基于 IP 和以太网融合技术，实现 L0-L3 层的多层次组网，提供多种类型的管道切片能力。通过 MTN 通道级切片技术支持基于 TDM 的刚性隔离传输机制，构建端到端刚性隔离传输通道；通过分组交换提供 L2/L3 VPN 能力，实现基于 SR 的灵活分组连接，提供弹性可扩展的软切片。针对多种业务承载需求，按需对一张物理网络进行资源切片隔离，形成多个虚拟网络，实现差异化承载服务。

STN 技术同样定位为实现 4G/5G 等移动回传业务、政企以太专线和云专线等多业务的融合承载技术，其技术本质是由 IP RAN 发展而来，通过引入 SRv6/EVPN 基础协议和 FlexE 接口技术，升级演进为 STN 技术方案。运营商传送网可以 STN 技术为基础，向新型城域网方向演进，从而实现城域范围内

固移融合、云网一体、管控分离和虚实共管等。

根据接入的运营商情况，合理选择SPN或STN技术。SPN和STN两种方式对比分析如表1所示：

表1 SPN和STN技术对比表

类别	SPN	STN
网络设备	SPN 传输专用设备	标准路由器设备
	支持 SR-TP、FlexE（含 FlexE 交叉）等标准协议	支持 IP/MPLS、OAM、SRv6、FlexE 等标准协议
	核心汇聚设备为 300mm 深，接入设备为 300mm 深	核心汇聚设备为 800mm 深，接入设备为 300mm 深
组网方案	优点：端到端的管理	优点：支持异厂家设备组网，设备解耦
	缺点：维护工作量较大，厂家依赖性较高，解耦困难	缺点：全动态组网，设备要求高；运维技术能力要求高
网络管理	各厂家提供各自管控融合平台系统，第三方提供上层编排器	按标准协议和企业标准实现第三方网管以及 SDN 控制器管控
业务自动化	通过编排器对网管和控制器协调调度实现互通	通过 IP 控制器统一调度
故障定位	网业分离，多网络运维	一张网络综合业务承载
SR	SR-TP/SR-TE 通过隧道标签来实现数据的转发与连接	SRv6 进一步简化转发面，可实现跨域，是云网协同的最佳技术
MTN	支持 MTN 通道切片技术	不支持通道级交叉技术
高精度同步	单跳 5ns	单跳 50ns

7.3 塔筒专线承载方式

为满足塔筒侧多业务专线接入，原则上在塔筒配置客户侧 SPN CPE 设备。因 CPE 是末端网元，塔筒与升压平台之间只能采用星型组网，光模块按照风机离升压站的距离相应配置，宜采用单纤双向光模块时，每个塔筒需要 1 芯海缆至升压站。

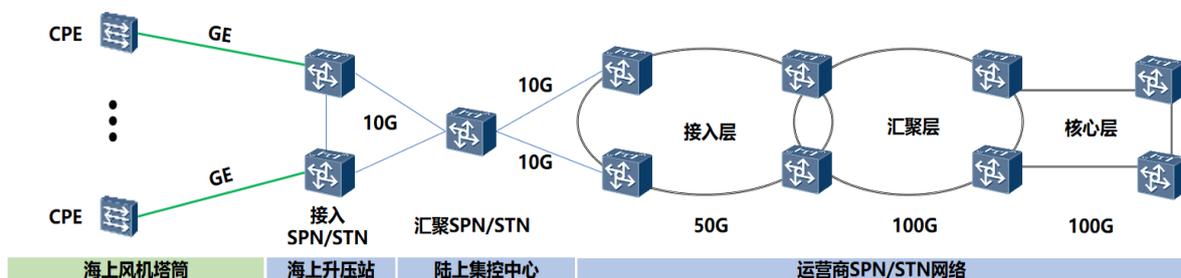


图 3 CPE 组网示意图

7.4 设备及端口配置要求

7.4.1 传输接入设备能力及配置要求

传输接入设备应采用无阻塞的交换网，至少实现 0.48T 线速交换能力，单端口最大接入能力应达到 100GE。传输接入设备指标要求如表 2 所示。

表 2 传输接入设备指标要求表

项目	要求
设备高度	不低于 3U
业务槽位数	不少于 8 个
分组交换容量	不低于 480G
单槽位容量	不低于 100G
最大单板密度	1*100GE、2*50GE、10*10GE

7.4.2 传输接入设备光接口参数

传输接入设备配置的光接口主要参数原则上应满足下表要求。

表3 接入设备光接口主要参数

序号	设备接口类型	波长范围 (nm)	平均发送光功率 (dBm)	接收灵敏度 (dBm, BER=10 ⁻¹²)	消光比 (最小值)
1	50GE-10km	1304.5-1317.5	-4.5~4.2	-8.4	3.5
2	50GE-40km	1304.5-1317.5	-3.4~6.0	-15.1	6
3	10GE-10km	1310	-8.2~0.5	11	
4	10GE-40km	1550	-4.7~4	-14.1	
5	10GE-80km	1550	1~4	-26	
6	GE-10km	1310	-9~-3	-19	
7	GE-40km	1310	-4~5	-22	
8	GE-80km	1550	0~5	-22	

7.4.3 CPE 设备能力及配置要求

CPE 设备应支持固定专线接入，支持双上行及双电源保护，可用于基础版 SPN 切片专线及优享版入云专线等场景。CPE 设备能力及配置要求如下表 4 所示。

表4 CPE设备能力及配置要求表

设备类型	产品能力要求
CPE	(1) 设备尺寸：高度 1U 及以下且宽度不大于 19 英寸标准机架 (2) 端口数量：支持不低于 2 个 GE 光口，不低于 4 个 GE 电口 (3) 支持 Eline、L3VPN、MPLS-TP、SR-TP、Inband-OAM、MPLS-TP OAM、APS 等能力。 (4) 支持双电源保护。 (5) 支持即插即用和“掉电告警上报”功能。 (6) 支持网元统一纳管，业务统一发放。

7.5 设备安装要求

7.5.1 传输接入设备安装要求

传输接入设备接电要求：设备安装位置应支持直流或交流电接入，优先应具备-48V直流供电。

机房温度要求：夏季24-27℃，冬季18-27℃。机房相对湿度：40%~70%。

防雷接地要求：通信局站的防雷接地应执行GB 50689-2011《通信局（站）防雷与接地工程设计规范》相关规定，接地系统必须采用联合接地方式。室内的走线架及各类金属构件必须接地，各段走线架之间必须电气连通。

设备安装布置要求：设备平面布置应根据近、远期规划统一安排，以近期为主，便于维护、施工和扩容。设备之间的布线路由应合理，考虑安全性需求，减少往返，使布线距离最短。

7.5.2 CPE 安装环境要求

CPE设备接电要求：设备安装位置应支持交流或直流电接入。交流电压范围要求：100V~240V。直流电压范围要求：-38.4V~-57.6V（采用-48V电源时）。

环境温度及湿度要求：设备长期工作环境温度范围为-5~+40℃，相对湿度保持在40%~65%。

8 海上风电无线网络设计

8.1 总体架构

根据实际业务需求和场景特点，结合设备功能特性，在升压站区域规划部署宏基站，同时在风机塔筒部位按需配置室内分布系统，以此实现海上风电场区域无线信号全覆盖，保障智慧风电系统的通信需求。

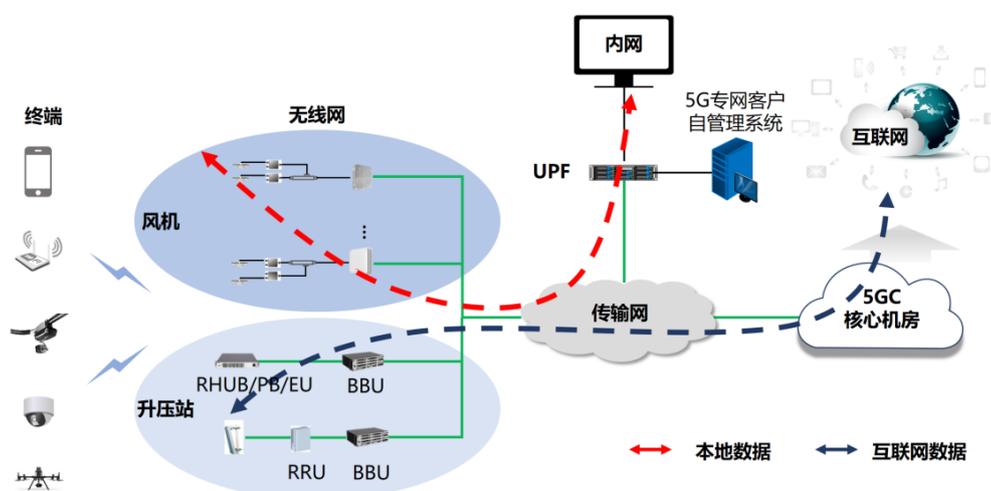


图4 无线网架构示意图

8.2 宏站部署方式

在海上升压站顶部平台设置多根抱杆，RRU 及天线采用杆挂方式安装，BBU 采用壁挂或机柜嵌入式安装方式部署于升压站机房机柜内。

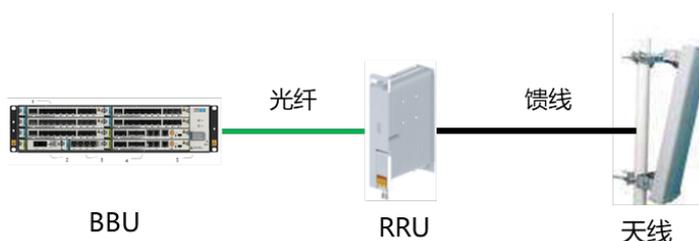


图 5 宏站设备拓扑图

8.3 室分部署方式

鉴于风机塔筒内部覆盖空间有限且业务并发需求较低,为优化移动通信覆盖效果并合理控制建设成本,推荐采用 5G 一体化小基站结合微室分系统的部署方案。

采用 5G 一体化小基站结合微室分设备,实现风机塔筒内部信号全覆盖。针对机舱旋转可能导致的线缆磨损问题,机舱区域采用无线信号引入方式,并部署全向玻璃钢天线进行覆盖;塔架 1 层采用全向玻璃钢天线覆盖,2 层至 5 层根据实际需求选用全向玻璃钢天线或定向天线覆盖。无线网络业务传输采用支持 1588V2 时钟协议的 SPN/STN 设备承载,光模块规格依据风机塔筒与升压站之间的实际距离进行适配配置。

根据海上风电场整体布局规划,海上风机建议采用一字型单链和 Y 字型单链两种组网方式。对于一字型单链组网,一体化小基站通过风机 ODF 配线架实现设备连接,具体为上联光口与上游风机对接,下联光口与下游风机上联口连接,形成级联组网;对于 Y 字型单链组网,一体化小基站设备可配置 3 个下联光口,分别与下游风机的上联口对接,实现多向级联组网。同时,采用收发合一光模块技术,确保单纤双向传输,每条链路仅需占用一根纤芯即可满足业务传输需求。

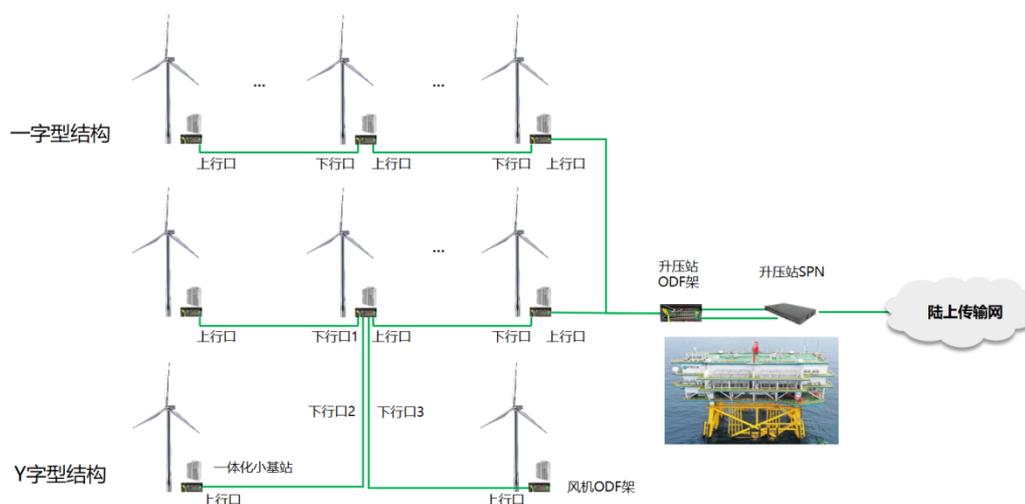


图 6 一体化小基站级联示意图

8.4 技术要求

一体化小基站设备的一般技术要求如下：

表5 一体化小基站技术要求表

项目	要求
无线协议	支持 3GPP R15 无线协议功能
支持频段	1.8GHz/2.6GHz 等
载波带宽	40/60/80/100MHz
输出功率（含天线增益）	24dBm±1.5dBm/通道
EVM	≤3.5%@256QAM, ≤5%@64QAM
上行灵敏度	NR: ≤-97dBm, LTE: ≤-101dBm
激活态用户数	≥128
连接态用户数	≥256
同步	支持 GPS, IEEE 1588V2 同步
网管接口	支持 TR069 接口协议
QoS	支持 QoS 控制
操作维护	支持远程/本地维护
	支持在线状态管理
	支持性能统计
	支持故障管理
	支持配置管理
	支持本地或远程软件升级和加载
	支持日志
	支持连通性诊断
支持告警上报	
供电方式	AC 220V 或 DC -48V

9 海上风电核心网设计

9.1 总体要求

根据海上风电行业的业务痛点及应用需求，在海上风电场机房按需下沉部署 2B 专享型 UPF/UPF+/MEC 设备。海上风电场的基站及专享 UPF 通过传输设备接入地市传输网络，并与 5GC 控制面实现对接；同时，专享 UPF 通过专用直连链路接入电力内网系统，从而实现 5G 电力切片的网络隔离及数据不出园区安全要求。

9.2 5G 电力切片安全隔离

5G 电力虚拟专网的核心网通过部署专用 UPF 设备实现核心网层面的网络隔离，传输网采用 FlexE 硬切片技术实现传输通道的物理隔离，并依托三层 VPN 网络在硬切片内部实现不同电力控制类业务的逻辑隔离，无线接入层则通过 RB 资源预留机制确保空口资源的专用隔离。

9.3 数据不出园区

核心网 UPF 下沉部署至海上风电场陆上集控中心机房，通过配置防火墙白名单策略实现电力业务数据流量的本地闭环传输；同时设置 N6、N9 接口禁止向园区外开放，有效防止业务数据外泄；通过绑定专用 DNN 且仅关联下沉部署的专享型 UPF，确保终端用户数据仅在海上风电场园区 5G 基站、传输网接入节点、下沉专享型 UPF 及海上风电场专网内部网络之间传输，构建端到端本地透传专用通道，从而实现数据不出园区的安全目标。

10 海上风电网络安全设计及要求

10.1 安全增强方式要求

针对5G安全风险威胁，原则上要求构建终端、管道、平台等层面的安全防护能力以及5G电力专网的安全管理能力，有效满足不同安全等级的电力业务的需求。

10.1.1 5G 电力终端接入认证及控制要求

一般应具备终端接入二次认证、机卡绑定等控制方式。

1) 终端接入二次认证要求

鉴于海上风电企业业务涉及生产数据安全且具备更高保密等级需求，除完成移动网络主认证鉴权流程外，通常需叠加企业自主管控的二次认证机制。该机制指在终端用户与运营商域外专用网络间建立身份认证链路，使海上风电企业可实施所属终端的 PDU 会话建立自主控制，确保合法用户安全访问数据网络，有效阻断非授权实体对行业专网的接入，从而强化内网系统自主管控能力与安全防护水平，满足用户对网络接入的增强型安全保障需求。

建议海上风电企业通过部署 DN-AAA 服务器或升级现有 AAA 服务器，采用 UPF 转接方式实现与 2B 核心网控制面的对接。鉴于当前产业技术成熟度评估结果，推荐采用 PAP/CHAP 协议作为二次认证实施方案。

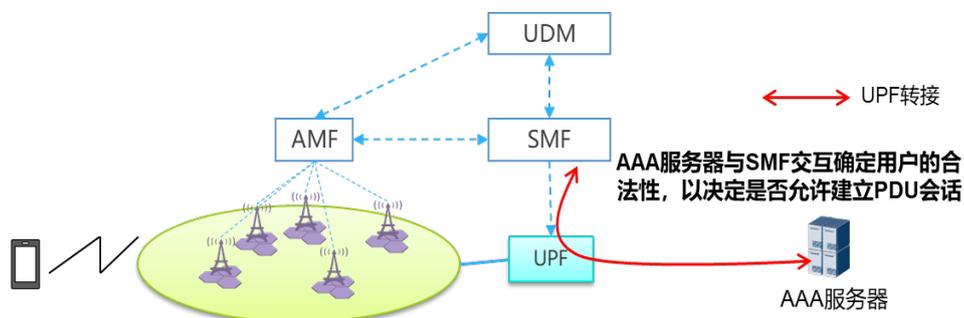


图 7 终端接入二次认证方案

2) 机卡绑定要求

通过机卡绑定方式解决电力专用 SIM 卡丢失盗用等问题，防止恶意终端插入 SIM 卡访问授权业务，

影响配网业务以及造成敏感信息外泄。

电力企业可基于 IMSI 和 IMEI 的绑定关系对接入企业内网的 5G 终端进行准入控制。电力企业在 DN-AAA 系统中设定终端接入 5G 园区网时的 IMSI 和 IMEI 的绑定关系，符合绑定关系要求的终端才能通过 DN-AAA 的认证并接入。

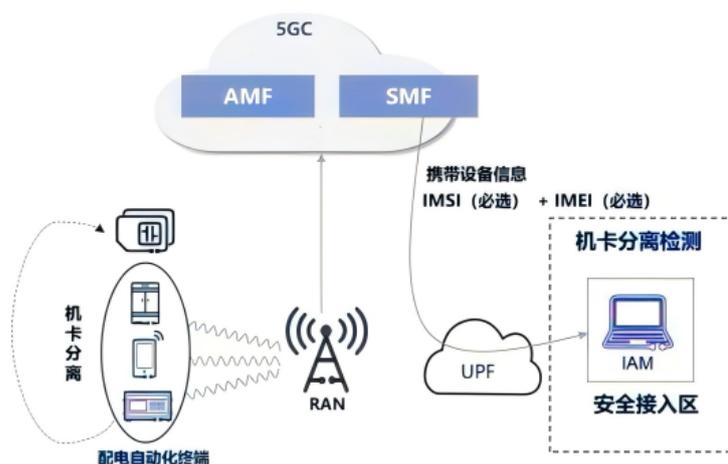


图 8 终端接入机卡绑定方案

10.1.2 5G 电力边界安全防护要求

建议在 UPF 设备的企业网络边界部署防火墙系统，实施数据安全审计机制，构建企业网络边界的立体化防护体系。可依据电力行业安全规范，在电网企业内网边界及安全接入区部署符合等保要求的安全防护设备（抗 DDoS 攻击、入侵检测、访问控制、WEB 流量检测等安全能力等），系统化提升运营商网络边界与企业内部网络边界的安全防护水平。

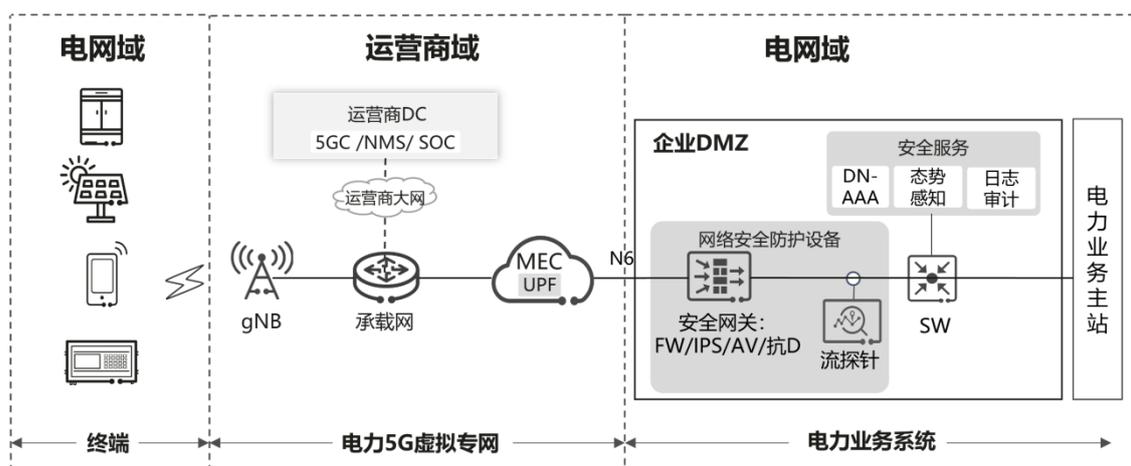


图 9 5G 电力边界安全防护

10.1.3 5G 电力安全管理要求

(1) 专网安全监视可视化要求

面向可独立采购安全监视及态势感知平台的电力企业，完成安全监视平台建设，对 5G 相关网络安全风险进行综合分析与展示。

(2) 专网访问审计要求

通过能力开放的形式将电力终端接入及终端异常信息开放给已具备安全管理平台的电力企业，综合提升电力企业对终端的监视及管控能力。

10.2 传输网保护与恢复要求

5G传输网应设置完善的保护恢复能力，确保网络可靠性，保护恢复方案应根据分层分域方式进行合理设置。

基站到核心网南北向业务：L3到接入需进行VPN和IGP分层部署，在各L3域内设置SR-TP线性保护和VPN FRR双节点保护,可按需对SR-TP隧道启用SDN恢复功能。

基站之间东西向业务：在IGP域内设置SR-BE Ti-LFA保护。

11 海上风电网络运维要求

11.1 远程视觉运维

基于海上风电视频监控业务需求，应建设面向海上风电场景的智能监控一体化信息平台。该平台以设备为核心，集成风电发电电气监控、机组运行监控、设备在线监测、辅助系统监控、视频图像监控以及气象环境监测等多源数据，实现统一数据采集、统一模型构建、统一数据处理、异构信息融合及综合数据分析功能。平台通过基础总线服务、数据存储服务等核心功能组件，采用微服务架构实现系统部署，为风电设备智能监控应用及设备全景一体化展示提供技术支撑。

气象服务中心：依托安全窗口期优化风电作业计划编制，提升气象预警时效性与精确度，确保生产作业安全及人员安全保障。

风电规划中心：基于气象数据、航道信息和风电场运行数据，实现多专业信息融合，确保资源调配的准确性与高效性。

集中监视中心：通过多维度实时监控，实现风电场“无人值守、少人值班”的智能化运维管理模式。

智能预警中心：基于大数据预测报告警与智能诊断分析技术，实时监测设备运行状态，有效保障设备运行可靠性。

智慧运维中心：基于多维度数据的统一聚合监控体系，支持 AR 远程指挥调度功能，实现施工作业人员第一视角实时回传至陆上管理平台，为安全施工与作业指导提供技术支撑。

风电机组缺陷智能识别系统：基于人工智能视觉分析技术，实现风力发电机组运行过程中常见缺陷（包括但不限于划痕、裂纹、锈蚀、脏污、涂层脱落及开胶腐蚀等）的自动检测与识别，并将诊断结果实时反馈至运维人员，为设备及时维修提供决策支持。

船舶特定区域智能识别系统：基于人工智能视觉分析技术，实时监测并识别特定类型船舶（包括但

不限于采砂船、运沙船、货船、渔船、巡逻船等)进入预设管控区域的行为,系统自动触发报警机制,并向进入目标区域的船舶用户发送预设提示信息(如海上风电设施避让提醒短信等)。

违规钓鱼智能监测系统:基于智能识别算法,对特定管控水域(禁止渔船等指定类型船舶进入的区域)实施实时监测,当系统检测到目标船舶进入禁入区域并存在违规钓鱼行为时,立即触发报警机制。

11.2 数字孪生系统

基于数字孪生技术平台,整合 GIS 空间信息技术、大数据分析、物联网感知、移动应用及智能算法等关键技术,构建覆盖风电场全要素(包括风电机组、升压站、储能室、配电室等)的统一监测与管理系统,实现环境参数、设备运行状态、视频监控等数据的实时采集与集中管理,并提供数据存储、智能分析及综合处理功能。系统支持全景漫游展示、风机运行监视、设备异常报警、发电功率预测、故障早期预警、检修计划管理等智能化应用模块的灵活配置。

参 考 文 献

- 1、李鑫，贺政，王迎春，高志英，胡济韬. SPN 与 STN 的技术方案对比讨[C].北京:电信工程技术与标准化, 2023.11