

# SPN小颗粒切片在电力行业的应用与研究

## Applications and Research on SPN Fine-Grained Slicing in Power Industry

曹志强<sup>1</sup>, 韩少飞<sup>2</sup>, 刘晓春<sup>1</sup>, 刘 薇<sup>3</sup> (1. 中国移动通信集团河北有限公司张家口分公司, 河北 张家口 075000; 2. 华信咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310052; 3. 中国移动通信集团河北有限公司, 河北 石家庄 050000)

Cao Zhiqiang<sup>1</sup>, Han Shaofei<sup>2</sup>, Liu Xiaochun<sup>1</sup>, Liu Wei<sup>3</sup> (1. China Mobile Communications Group Hebei Co., Ltd. Zhangjiakou Branch, Zhangjiakou 075000, China; 2. Huaxin Consulting and Designing Institute Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 3. China Mobile Communications Group Hebei Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

### 摘 要:

当前配电网面临海量终端接入与实时交互需求激增等问题,但传统光纤覆盖成本高、公网承载能力不足,难以满足电力业务高安全、低时延需求。SPN小颗粒切片技术以时隙级物理隔离、超低时延传输(单跳时延降低50%)和10M级灵活带宽分配三大突破,构建低成本、高可靠通信底座。该技术基于国产化设备及G.MTN国际标准,支撑分布式能源接入、实时双向互动等核心场景,适配新型电力系统需求,加速5G+智能电网规模化部署,为能源数字化升级提供关键技术支撑。

### Abstract:

Current power distribution networks face challenges including massive terminal access and surging real-time interaction demands, while traditional fiber-optic coverage imposes high costs and public networks lack sufficient capacity to meet the high-security and low-latency requirements of power services. SPN fine-grained slicing technology addresses these issues through three breakthroughs: time-slot-level physical isolation, ultra-low latency transmission (single-hop latency reduced by 50%), and 10 Mbit/s-level flexible bandwidth allocation. This technology constructs a cost-effective and highly reliable communication infrastructure based on domestic equipment and the G. MTN international standard. It supports critical scenarios such as distributed energy integration and real-time bidirectional interactions, aligning with the requirements of next-generation power systems. By accelerating the large-scale deployment of 5G+Smart Grids, SPN fine-grained slicing provides key technical support for energy digitalization.

### Keywords:

Fine-grained; Slicing; Hard isolation; Low latency; Power systems

**引用格式:** 曹志强, 韩少飞, 刘晓春, 等. SPN小颗粒切片在电力行业的应用与研究[J]. 邮电设计技术, 2026(5): 73-78.

## 0 引言

电力通信网作为支撑智能电网发展的重要基础设施,保证了各类电力业务的安全性、实时性、准确性和可靠性要求。构建大容量、安全可靠的光纤骨干通信网<sup>[1]</sup>以及泛在多业务灵活可信接入的配电通信网,

是通信网络建设的2个重要组成部分。在骨干通信网侧,经过多年建设,35 kV以上的主网通信网已具备完善的全光骨干网络和可靠高效数据网络,光纤资源已实现35 kV及以上厂站、自有物业办公场所/营业场所全覆盖。

在配电通信网侧,由于点多面广,需要实时监测或控制海量设备,信息双向交互频繁,且现有光纤覆盖建设成本高、运维难度大,公网承载能力有限,难以

收稿日期: 2026-03-11

### 关键词:

小颗粒; 切片; 硬隔离; 低时延; 电力

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.05.014

文章编号: 1007-3043(2026)05-0073-06

中图分类号: TN915

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



有效支撑配电网各类终端的可观可测可控。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呈爆发式增长,迫切需要构建安全可信、接入灵活、双向实时互动的“泛在化、全覆盖”配电通信接入网,并采用先进、可靠、稳定、高效的新兴通信技术及系统予以支撑,这是智能电网发展对配电网通信提出的新需求。

因此,从发展趋势看,未来智能电网的大量应用将集中在配电网侧,应采用先进、可靠、稳定、高效的新兴通信技术及系统,丰富配电网侧的通信接入方式,由被动承接基础业务需求转向主动引领业务发展,提供更泛在的终端接入能力、面向多样化业务的强大承载能力、差异化安全隔离能力及更高效灵活的运营管理能力。

1 电力网络设计思路及架构

1.1 电力5G应用设计思路和功能框架

电力5G应用总体架构由终端、电力5G虚拟专网和电力业务系统组成(见图1)。其中,终端包括业务终端和通信终端,电力5G虚拟专网包括无线基站、承载网和核心网,电力业务系统包括电力安全接入区和电力业务主站。电力企业可根据需要部署电力专用DN-AAA对电力5G终端进行二次身份认证和授权。

通过5G专网的形式,实现电力配电终端的覆盖,减少光纤铺设带来的巨大投资,同时通过无线+承载网+核心网的安全隔离、切片隔离设计<sup>[2-6]</sup>,在满足电力配电业务带宽需求的同时,保障新开通的IV区业务与

I区业务的安全隔离和稳定时延。

电力5G网络功能架构分为以下3个部分(见图2)。

a) 电力终端管理部分:负责电力终端的信息处理、状态管理等功能。

b) 切片管理部分:负责5G切片专网的管理,分为无线网络管理、承载网络管理以及电力专用核心网的管理。

c) 电力业务系统:主要是指电力生产控制大区、生产非控制大区以及管理信息大区的业务应用管理系统。

1.2 电力5G承载网络架构

以某地冀北电力为例,某通信运营商对本次配电网自动化终端进行了全覆盖,并依托已覆盖基站,将沿途承载基站均完成小颗粒切片板卡部署,满足电力业务隔离与时延稳定的要求。本次部署的SPN切片专网不仅承载前期开通的馈线自动化装置,同时也会承载未来2年规划新增的IV区监控业务,包括电力开关、融合终端等,新开通的IV区业务需要网络切片的安全隔离技术实现与I区业务的隔离。电力5G SPN承载网络架构如图3所示。

2 SPN小颗粒切片方案配置要点

2.1 小颗粒业务介绍

2.1.1 SPN小颗粒切片必要性

SPN当前提供的切片颗粒度为5G/1G,可以提供行业专属管道,但在面对高价值业务独占切片的需求时,会出现业务带宽诉求与大颗粒切片带宽之间落差

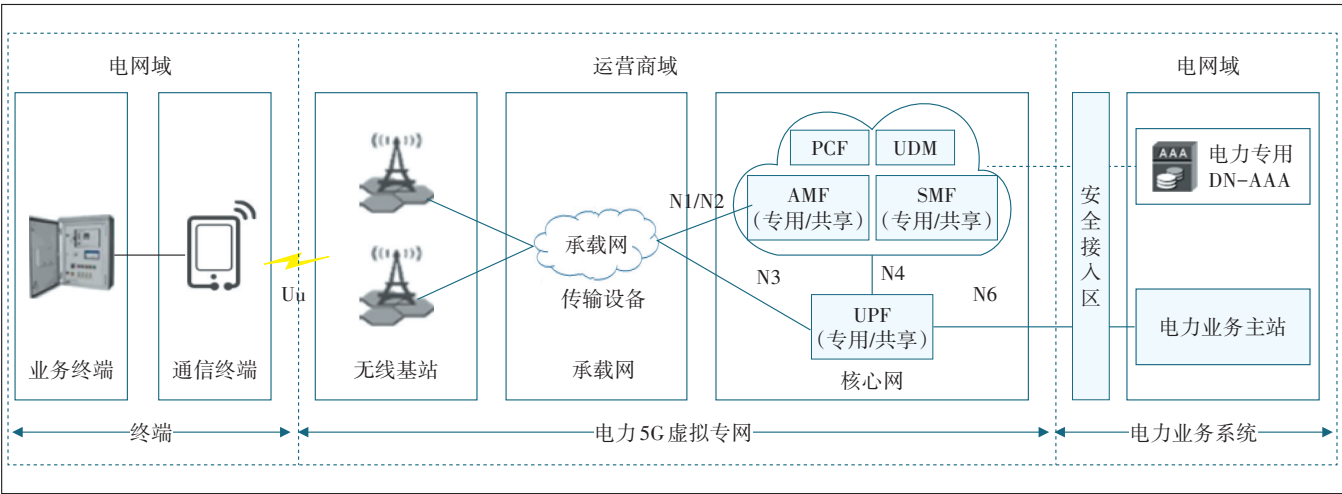


图1 电力5G应用总体架构

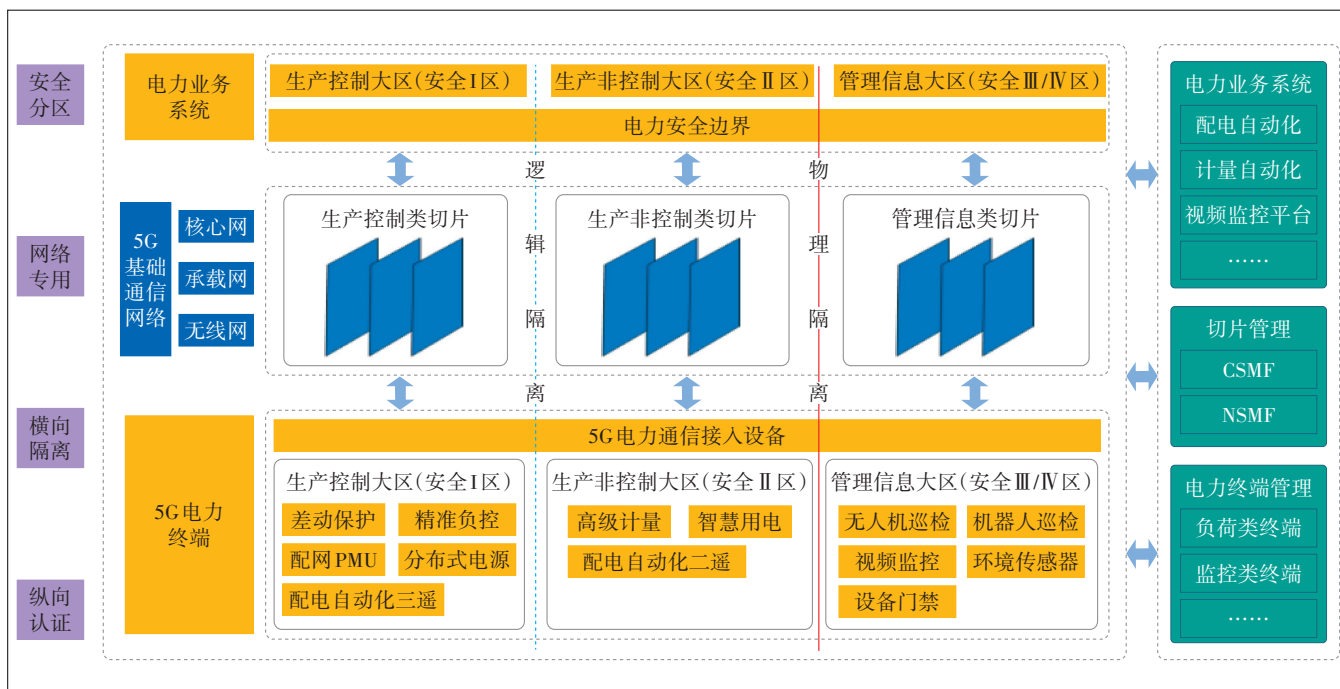


图2 电力5G网络功能架构

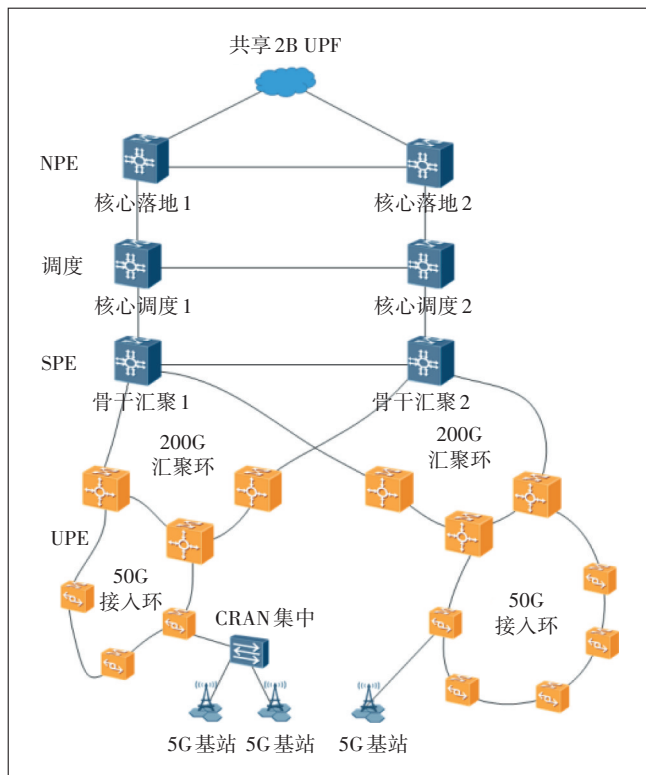


图3 电力5G SPN承载网络架构

较大的问题,进而导致网络资源效率降低。如何兼顾业务品质、安全隔离和最大化网络资源效率?小颗粒

切片技术应运而生。

#### 2.1.2 小颗粒技术原理

小颗粒切片技术原理示意如图4所示。该技术不改变现有FlexE接口,而是在 $n \times 5G/1G$ 通道内划分更小粒度的时隙,基于小粒度时隙灵活分配业务带宽,交叉矩阵支持两级。小颗粒切片技术可前向兼容SPN现有FlexE接口(1G/5G),无需更换现网板卡,叠加小颗粒交叉板即可。

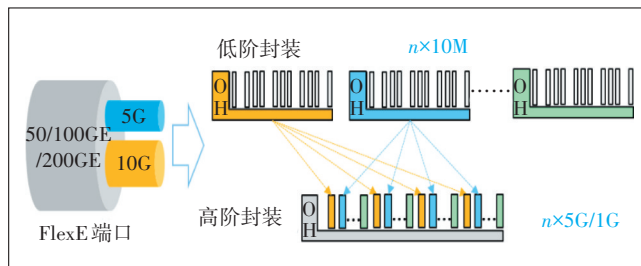


图4 小颗粒切片技术原理示意

#### 2.1.3 SPN小颗粒切片特性

SPN小颗粒切片具有以下4个特性。

a) 小颗粒业务统一通过MTN大交叉模块进行处理,整体采用层次化交叉架构。现网设备原生兼容小颗粒能力,插入小颗粒板卡即可完成部署,充分利旧并保护现有投资。

b) 使能现网 FlexE 单板, 只需要预留较少资源 (FlexE 切片颗粒度为 5G)。

c) 小颗粒与 FlexE 采用层次化映射机制<sup>[7-8]</sup>。每个 5G Client 划分为 480 个 10M 时隙, 平均分布在 20 个 fgBU 中 (每个 fgBU 内划分 24 个 10M 时隙), 每个 10M 时隙大小为 8 个 65 B 压缩码块, 可以实现带宽调整时延“0”抖动。

d) 采用华为小颗粒高精度时隙分配算法, 单跳时延降低 50%。

## 2.2 承载网切片方案整体架构

SPN 承载网切片部署方案如下 (下面描述仅针对 N3 接口, 其他接口如表 1 所示)。

a) 资源切片部署。MTN 小颗粒切片用户需要部

表 1 MTN 小颗粒切片接口明细

| MTN 小颗粒切片 | 资源切片              | 业务切片                                                            |
|-----------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| N2        | 默认 FlexE 分组切片     | ToB 用户与 ToC 用户共用 L3 VPN                                         |
| N3        | 多用户共享 MTN 小颗粒基础切片 | ToB 用户专用分层 L3 VPN, 每用户每 VPN; ToB 用户专用 MTN FG 通道, 每用户每通道         |
| N4        | 不涉及 SPN 承载网       | 不涉及 SPN 承载网                                                     |
| OM        | 不涉及 SPN 承载网       | 不涉及 SPN 承载网                                                     |
| N6        | 多用户共享 MTN 小颗粒基础切片 | ToB 用户专用端到端 L2 VPN/L3 VPN, 每用户每 VPN; ToB 用户专用 MTN FG 通道, 每用户每通道 |
| N9        | 不涉及 SPN 承载网       | 不涉及 SPN 承载网                                                     |

署 MTN 小颗粒基础切片, 与 ToC 业务的默认 FlexE 分组切片进行隔离 (见图 5), 部署的 MTN 小颗粒切片由 ToB 用户共享; 切片根据 MTN 小颗粒切片用户的接入点和 UPF 之间物理路径涉及到的网络节点按需部署, 但是需要保证包含完整的接入环或者汇聚环 (保证 MPLS-TP 主备隧道路径不同)。

b) 业务切片部署。MTN 小颗粒切片用户通过 VPN 和 MTN FG 通道进行隔离, 用户专用分层 L3 VPN 和 MTN FG 通道, 采用每用户每 VPN/FG 通道的部署原则。

c) 切片映射关系。SPN 承载网根据与无线对接的 UNI 端口的 VLAN 进行切片映射, ToB 业务映射至独享 FlexE 交叉切片内的 ToB 业务专用 L3 VPN, ToB 业务的 QoS 优先级根据 VLAN PRI/DSCP 进行映射。

## 2.3 ToB 行业 VPN 业务配置规划

ToB 行业 VPN 业务配置规划示意如图 6 所示, 具体如下。

a) N3 流量新增 ToB 用户专用分层 L3 VPN, 核心设备 NPE 增加到 ToB 共享高置 UPF 的路由, 并且在核心域内扩散, 采用每用户每 VPN 的部署策略。

b) 建议传输统一规划 N3 接口 IP 地址, 确保不冲突。

c) 基站需要规划 ToB 用户业务的 VLAN (IP 可相同或不同, 建议 IP 相同)。

d) FlexE 分组硬切片用户的 VPN 部署在 ToB 用户

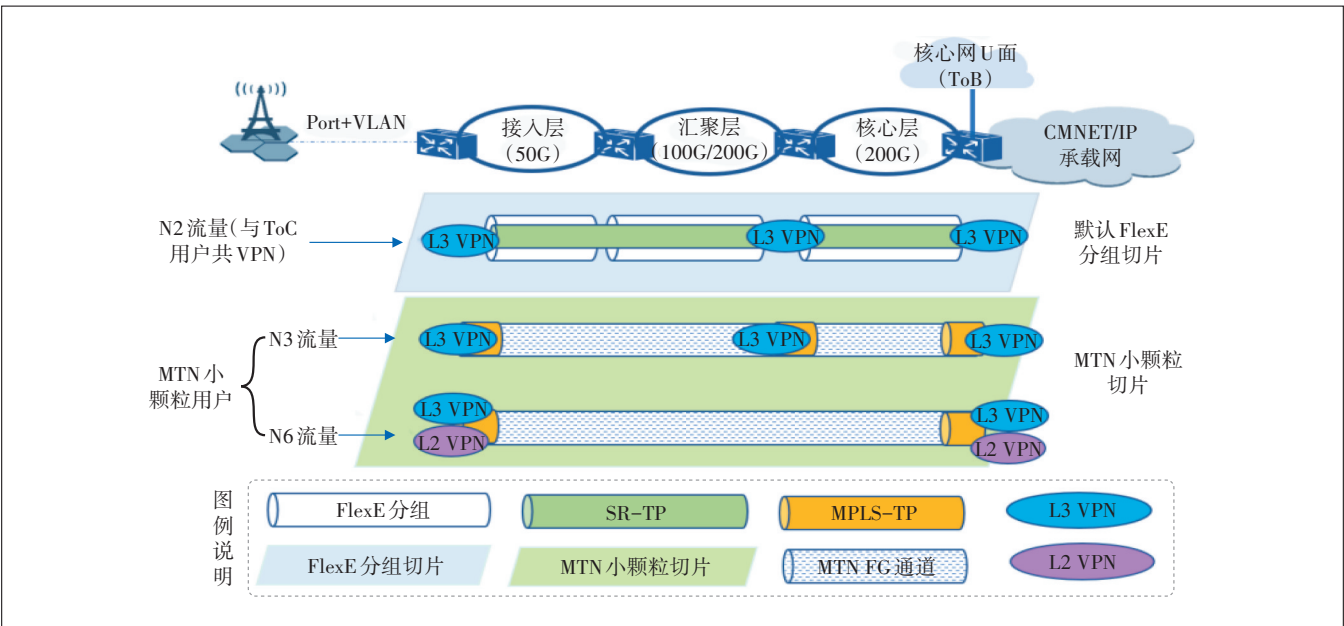


图 5 SPN 承载网切片部署方案示意

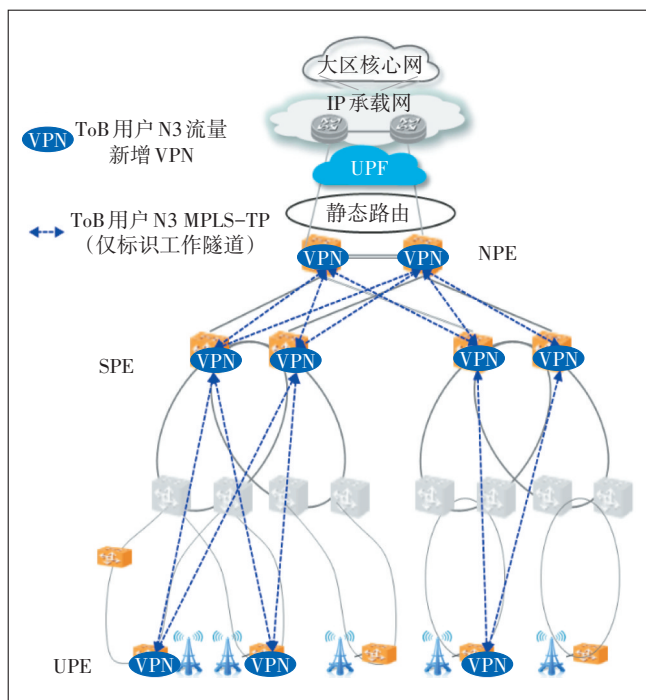


图6 ToB行业VPN业务配置规划示意

共享/独享FlexE分组切片内。

## 2.4 某地冀北电力小颗粒业务部署实施步骤

a) 网络切片实施前的准备。提前核实确认切片组网所涉及的链路除默认切片外还存在带宽余量,否则对默认切片进行缩容。本次硬切片需求为5G,现网带宽余量大于或等于15G,满足切片条件。同时,需确保切片组网涉及的传输设备具备小颗粒板卡。

b) 网络切片部署。根据冀北电力的传输组网,使用NCE网管先后进行如下操作:新建网络切片、添加网络中涉及的所有链路、部署切片。

c) 创建小颗粒通道。在所有基站接入设备与对接UPF设备间创建小颗粒MTN FG通道,通道带宽由客户侧业务需求决定,切片选择上一步部署的冀北电力小颗粒切片;在所有基站接入设备与对接UPF设备间创建静态1:1 tunnel,切片选择新部署的冀北电力小颗粒切片,路径选择新建的MTN FG通道。

d) 新建冀北电力L3 VPN业务。在NCE网络L3 VPN业务管理中新建冀北电力L3 VPN业务,与大网5G L3 VPN业务区别开,在新建的冀北电力L3 VPN业务中加入对接基站和对接UPF的传输网元,网元角色均为NPE,对接基站和对接UPF的2种NPE间绑定新建的使用小颗粒通道的tunnel;对接UPF侧与核心网专业协调沟通完成配置,传输侧上行发布UPF业务路

由;对接基站侧与无线专线协调沟通完成相关配置。

## 3 技术对比与推广应用

### 3.1 国内外同类技术对比<sup>[9]</sup>

当前国内外同类技术的主要参数对比如表2所示。

### 3.2 推广应用情况

某移动公司与龙头客户国网冀北电力深度合作,首次在现网部署并应用中国移动主导的G.MTN小颗粒切片技术。目前,已开通600个5G馈线自动化点位进阶版SPN小颗粒切片专线业务,同时带动了6000个5G+分布式光伏项目点位的拓展。

SPN小颗粒切片技术优势显著,可为智慧电网搭建统一传输平台,从逻辑上将5G网络切分出独立子网与端口,为不同业务打造专用网络,确保数据安全高效传输。该技术可实现端到端硬隔离与低时延,达成电力安全I区(控制类业务)和IV区(管理类业务)的时隙级硬隔离<sup>[10]</sup>,满足国能安全36号文的要求,契合智慧电网对网络可靠性和实时性的需求。该技术在同一网络中承载5G公网、馈线自动化、分布式光伏等多种业务,提升了设备利用率与投资收益率(经实际运营测算,设备利用率从传统模式的40%~60%提升至85%以上;投资收益率较独立建网方案提高15%~25%,回收周期缩短40%),凭借“时隙级硬隔离切片&稳定时延”的差异化能力,成功打造全国标杆示范项目,实现一网多用、降本增效,形成可复制的建设模式。

据行业统计,2025年我国智慧电网整体市场规模已达到1.2万亿元,其中通信网络建设板块占比约为10%,对应约为1200亿元。SPN切片技术作为新兴的5G承载网络技术,有望在智慧电网通信网络建设领域占据一席之地,推动智慧电网发展与创新。

## 4 结束语

本文通过SPN小颗粒切片技术在5G+配电网自动化场景中的应用与研究,验证了其可显著提升电力通信网络的确定性传输能力(微秒级时延保障)、业务安全隔离性及资源利用效率。基于此,提出未来配电网智能化建设的四维路径。

a) 架构升级。构建“确定性传输+灵活切片”融合架构,通过硬切片物理隔离保障继电保护、新能源调控等核心业务,结合AI动态带宽分配技术适配海量终

表2 国内外同类技术的主要参数对比

| 分类   | 具体参数要求                                                                                                                                               | SPN小颗粒技术                                                                                   | 国内外同类技术对比                         |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 设备能力 | 整机Slicing Ethernet交叉容量,接入≥100G,汇聚≥400G                                                                                                               | 对设备的转发性能要求(时延、抖动、丢包)更为苛刻的业务,采用低阶的时隙交叉转发,可以有效降低设备内部的转发时延,降低抖动                               | 国内友商不支持交叉转发形式                     |
|      | 高精度时钟同步<5 ns/跳(《中国移动SPN设备高精度时间同步测试报告》)                                                                                                               | 全网有高精度的时钟同步,能满足更精准的时延测量,满足未来演进诉求                                                           | 国内友商接入层的高精度时钟同步为15 ns/跳           |
| 切片能力 | 承载网设备应支持FlexE接口,提供通道隔离与多端口绑定功能,并具备端到端时隙交叉硬切片能力,保障业务的安全隔离与稳定低时延。在网络拥塞或流量突发场景下,需持续保障业务SLA(带宽、时延、抖动)的确定性指标。同时,需提供接入/汇聚/核心端到端设备支持证明、测试报告,以及相关技术原理与标准说明材料 | 在端到端硬隔离方面,从接入设备到核心设备全程满足硬切片能力。针对转发时延要求苛刻的电力业务,SPN设备支持低阶时隙交叉转发,可有效降低内部转发时延,满足电力业务对时延指标的严苛要求 | 国内友商接入设备普遍不具备硬切片能力,且无法支持FlexE交叉功能 |
|      | 承载网设备应具备10M级硬切片隔离能力,保障网络资源的有效利用;提供设备支持的证明材料以及相关技术原理标准说明等信息                                                                                           | 业务数据量较小,采用小颗粒硬切片,更经济,按需投资,满足要求                                                             | 国内友商不支持10M级硬切片                    |
| 智能运维 | 随流检测支持逐包测量时延(《IFIT(随流检测)技术标准》)                                                                                                                       | 针对电力控制信号,可以有效地检测与保障                                                                        | 国内友商暂不支持                          |
|      | 提供对业务进行实时SLA可视,包括连通性、丢包率、时延、抖动等业务质量指标,自研SPN时敏网络实现“网业协同”,业务流与SLA监控流同通道调度                                                                              | 满足针对业务的快速定位、监控的诉求                                                                          | 国内友商采用叠加式探针,存在监控滞后的问题             |
| 高可靠性 | 硬切片通道应支持1+1 APS保护倒换技术,要求业务在50 ms内自动切换到保护通道                                                                                                           | 满足电力对业务的高可靠、高安全要求,减少业务中断时间                                                                 | 不支持硬切片的保护倒换                       |
|      | 支持隧道快速优化重路由,单条隧道优化重路由时间<1 s(《中国移动SPN小颗粒技术白皮书》)                                                                                                       | 支持单条隧道优化重路由时间<1 s                                                                          | 国内友商因分布式架构,时延暂达不到<1 s             |
| 自主可控 | 承载网设备应采用中国自主技术标准、设备国产化,保障业务安全可靠                                                                                                                      | 承载网全部采用国产化设备,满足对业务安全可靠的要求                                                                  | SPN传输网络采用自主国产标准(G.MTN),设备为国产化     |

端接入与高并发控制需求。

b) 资源优化。建立弹性可扩展的切片资源管理体系,研发智能调度平台实现切片资源按需分配,优先为储能调控、故障定位等场景配置高可靠切片。

c) 标准统一。制定通信-电力协议协同标准,建立业务切片映射规则,降低跨域系统集成复杂度。

d) 机制创新。探索“通信切片—能源调度—边缘算力”联动机制,通过5G切片与AI算力切片协同,实现拓扑识别、线损分析等业务的毫秒级闭环控制。

本技术路径已通过某冀北电力示范项目的验证,成功实现传输网扩容升级与国有资产效能提升,可为5G+分布式光伏、智能馈线自动化等场景提供可复用的部署范式。后续研究可聚焦以下三大深化方向:推进SPN与TSN、数字孪生技术的融合创新,拓展极端场景下的电网韧性;依托G.MTN国际标准优势,构建能源互联网自主生态;强化通信网络与新型电力系统的深度耦合,助力“双碳”目标下的安全、高效、绿色配电体系建设。

参考文献:

[1] 胡悦,王亚男,高凯强,等. 电力通信骨干网细粒度业务传送技术应用分析[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(12): 16-25.

[2] 李勤,韩柳燕,李晗,等. 切片分组网安全技术研究[J]. 信息通信技术与政策, 2024, 50(8): 17-23.

[3] 邢进,周广丽,杨怡,等. 基于FlexE的电力数据通信网小颗粒切片调度方法[J]. 中国宽带, 2024, 20(3): 88-90.

[4] 李文辉,穆海燕,赵宝平. SPN网络小颗粒切片技术研究与应用[J]. 山东通信技术, 2023, 43(3): 35-37.

[5] 华伟韬,殷俊杰,宋江,等. 基于FlexE技术的电力数据通信网小颗粒切片调度机制研究[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(6): 59-65.

[6] 韩啸. 5G传送网设备中SPN小颗粒技术研究[D]. 武汉:武汉邮电科学研究院, 2023.

[7] 贺政,李勇,王迎春,等. SPN小颗粒切片技术探讨[J]. 电信科学, 2020, 36(增刊2): 70-74.

[8] 瞿少凯,王前隆,贺政,等. SPN切片专线部署及应用研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2023, 36(6): 33-40.

[9] 李鑫,贺政,王迎春,等. SPN与STN的技术方案对比[J]. 电信工程技术与标准化, 2023, 36(11): 69-74.

[10] 穆传军. 电力配电网的故障检测与隔离技术[J]. 大众标准化, 2025(3): 179-181.

作者简介:

曹志强,高级工程师,主要从事传送网规划研究工作;韩少飞,高级工程师,主要从事通信网规划研究工作;刘晓春,高级工程师,主要从事传送网规划研究工作;刘薇,高级工程师,主要从事传送网规划研究工作。