

SPN在电力通信网中的应用探讨

Discussion on Application of SPN in Electric Power Communication Network

段晓,何宝影,李哲,朱瑞杰,孙海蓬(山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250100)

Duan Xiao, He Baoying, Li Zhe, Zhu Ruijie, Sun Haipeng (Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China)

摘要:

随着新型电力系统的高速建设,电力通信网提出了更高带宽、安全、可靠的通信需求。SPN是新一代承载网技术,也是未来承载网发展的主要趋势,能更好地适应电力系统业务需求。介绍了电力业务的通信需求与现有电力通信传输技术体制,分析了SPN技术的主要特点及与电力业务的适配性,并对SPN在电力通信网中的组网设计、业务承载以及保护方案进行了探讨。

关键词:

SPN技术;电力;通信

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2024.05.012

文章编号:1007-3043(2024)05-0068-07

中图分类号:TN913

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the high-speed construction of new electric power system, higher bandwidth, safety and reliability electric power communication network is required by electric power communication network. SPN is a new generation bearer network technology and also the main trend of future bearer network development, which can better adapt to the service requirements of power system. It introduces the communication demand of electric power service and the existing electric power communication transmission technology system, analyzes the main technical characteristics of SPN technology applied to power grid, and discusses the network design, service bearing and protection scheme of SPN in electric power communication network.

Keywords:

SPN; Electric power; Communication

引用格式:段晓,何宝影,李哲,等. SPN在电力通信网中的应用探讨[J]. 邮电设计技术,2024(5):68-74.

0 引言

随着电力系统的不断更迭发展,电力业务进一步向IP分组化和宽带化演进,对通信接口、通信软硬件资源弹性扩展以及安全承载能力提出了更高的要求,电力通信网在支撑电网生产控制业务、管理信息业务以及新兴互联网业务的基础性作用日益凸显^[1]。SPN

作为一种新的传输网络架构技术,具备业务灵活调度、高可靠性、低时延、高精度时钟、易运维、严格QoS保障等特性,能够很好地满足各种电力场景的业务传输需求。

本文着重对电力通信网中的SPN网络架构及应用进行了研究分析,介绍了电网业务需求及电力通信传输技术现状,分析了SPN适用于电力通信系统传输的关键技术体制,并在此基础上,深入探讨了电力应用场景下SPN的应用技术方案。

收稿日期:2024-03-20

1 电力业务通信需求

电网的业务系统原则上可划分为生产控制大区及管理信息大区(见图1),而电力通信系统负责为电力生产和管理等各种业务提供传输通道。按照电力二次系统安全防护总体原则^[2],生产控制大区可分为控制区(I区)和非控制区(II区),其中I区主要为实时监控业务,II区主要包括不具备控制功能的生产业务及批发交易业务。管理信息大区是指生产控制大区以外的电力企业管理业务系统的集合,可划分为生产管理区(III区)和管理信息区(IV区),其中III区主要为生产管理业务,IV区主要为管理信息及办公自动化业务。根据《电力系统防护总体方案》国能安全[2015]36号文件,电网对不同区之间有着严格的隔离和防护要求,一般来讲,生产控制大区的安全等级要高于管理信息大区,生产控制大区与管理信息大区之间要进行横向隔离,需设置电力专用的横向单向安全隔离装置,且隔离强度应接近或者达到物理隔离。I、II区或III、IV区之间也需采用具有访问控制的设备进行逻辑隔离。随着新型电力系统的大力建设,电网新定义了“互联网大区”,用于承载信息外网业务(网站、邮件、电力交易)和互联网新兴业务(车联网、光伏云网、网上国网),并划分了二级域和三级域,分别进行相应级别的防护。电力系统内网与外网的交互越来越多,对电力通信传输技术的隔离性能提出了更高的要求。

此外,随着新型电力系统的建设,电力业务展现出了向IP分组化和宽带化转变的趋势。目前,除继电保护、安稳控制业务外,电力系统的业务基本都已IP化,同时伴随着电网数字化和精细化建设,衍生出了更多业务。在生产控制大区,调控系统网络化发展促进了地县一体、千兆互联和人机交互等体系和应用;在管理信息大区,随着电网企业数字化转型和精益化

管理的不断深入,数据通信网VPN进一步下沉到变电站,机器人巡检等业务对通信带宽的需求进一步提升;在互联网大区,电力物联网的发展不断完善着电网云系统的建设和应用,新型互联网业务对通信网的带宽需求也将持续提升。

总之,电力业务通信需求已向广覆盖、大连接、低时延、高可靠、大带宽、高安全的方向发展,对电力通信网的业务承载能力提出了更高的要求。

目前,电力系统主要有3种通信技术体制。一为同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)。作为TDM技术^[3],通道完全硬隔离是SDH技术的基本特性,所以早已在电力通信网络中得到了广泛的应用,一般用于承载线路保护、精准切负荷等安全防御类业务以及调度数据网等实时控制类业务。但由于SDH的内核是基于2M颗粒的固定时隙交叉,承载IP业务时开销较大,传输有效带宽较低,远远不能适应电力IP业务的发展需求。二为光传送网^[4](Optical Transport Network, OTN)。该技术早先是为了缓解SDH光纤传输网络的业务压力,一般用于承载数据通信网等大颗粒业务,但在小颗粒业务上调度不灵活,缺乏有效的分组业务处理手段。三为分组传送网(Packet Transport Network, PTN)。PTN是以分组交换为核心,面向数据业务的传送网,主要用来承载IP业务,譬如地县一体化、接入网远程终端等实时控制类业务以及数据通信网、信息外网等经营管理类业务。目前共有3个省分在电力系统中建立了较完善的PTN数据承载网^[5]。然而,电力PTN网络的核心、汇聚层带宽一般为10GE,接入环带宽为GE,已不能满足新形势下IP业务的更大带宽的需求。此外,虽然PTN技术通过VPN和QoS机制实现了业务的逻辑隔离承载,但PTN不支持硬管道隔离,无法实现端到端的网络切片,与生产控制类业务的安全隔离要求产生偏差。因此,电力通信网需要引进新的具备硬隔离的分层技术,使

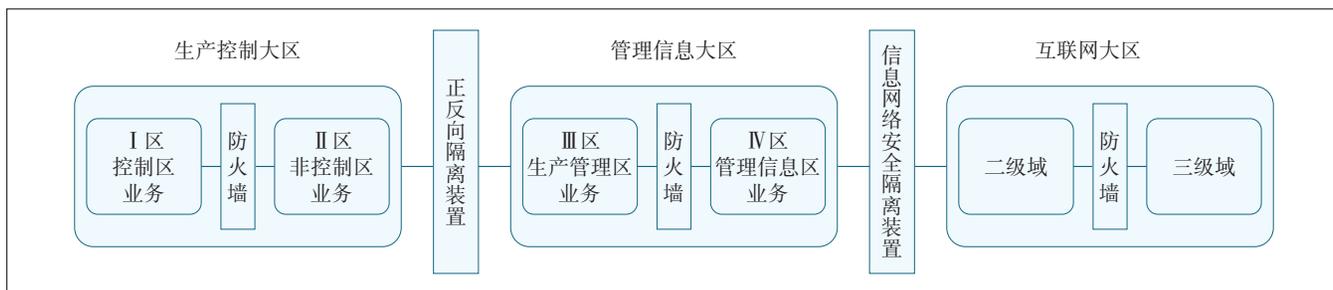


图1 电力业务安全大区分类

PTN网络进行平滑演进,实现高带宽、高可靠性的灵活组网。

2 切片分组网 SPN

2.1 SPN网络架构

SPN是ITU-T确立的新一代光传送网技术^[6],以以太网技术为基础,旨在面向多业务提供差异化确定性的承载能力。SPN网络融合了L0~L3层技术,包括切片分组层(Slicing Packet Layer, SPL)、切片通道层(Slicing Channel Layer, SCL)和切片传送层(Slicing Transport Layer, STL),超高精度时间频率同步技术功能模块和管控一体的管理、控制平面。SPN技术分层模型如图2所示。

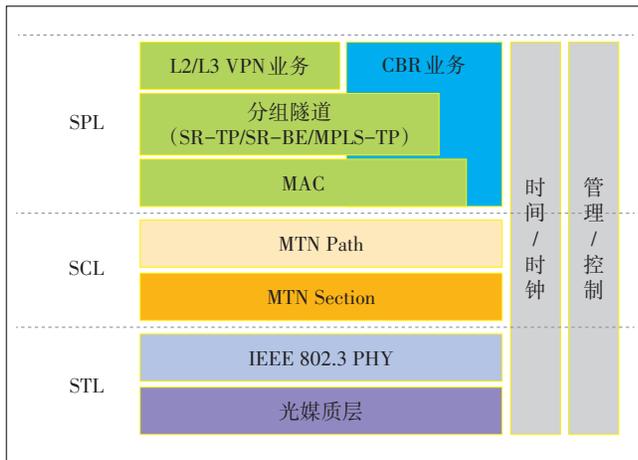


图2 SPN技术分层模型

切片分组层为L2/L3层的业务进行信号处理和封装处理,提供具备统计复用能力的传送功能以及业务传送过程中需要的OAM和保护功能。

切片通道层采用基于TMD时隙的城域传送网通路(MTN Path)和城域传送网段(MTN Section)技术,为多业务提供基于L1的低时延、硬管道业务隔离、硬管道连接传送功能以及硬管道交叉连接能力,同时还能通过硬管道构建传送网切片服务,满足生产控制类业务高安全、高可靠隔离传输需求,为具有不同需求的电力业务提供差异化的网络传输能力。

切片传送层负责为切片通道层或切片分组层提供物理媒质的光传输接口服务,支持25GE、50GE、100GE、200GE、400GE等速率的光接口链路连接,提供了低成本、大带宽的组网能力。

2.2 SPN关键技术及电力业务适配性分析

相较于PTN技术,SPN在继承PTN的基础上对

PTN的不足进行了改进。SPN的关键技术要点有超大带宽传输、低时延可靠承载、高效灵活切片、软件定义网络(Software Defined Network, SDN)集中管控等,这使得SPN在电力系统的应用中具有更强的竞争性。

2.2.1 FlexE的硬切片隔离与低时延可靠承载技术

灵活以太网(Flexible Ethernet, FlexE)技术在IEEE 802.3的协议栈的MAC层和物理层增加一个时隙调度Shim层^[7],即对物理层增加了时隙调度机制。通过时隙复用技术,1个物理端口可拆分成多个端口使用,形成切片。同时,多个切片通过时隙化调度,互不影响,达到了以太网硬隔离的目的,大大提高了安全性。

传统分组设备在实现业务报文转发时,需要在出口方向进行队列处理,导致分组的时延很高,达到几十微秒。在网络拥塞的情况下,网络时延更大,甚至可以达到毫秒级别,无法满足低时延业务的要求。SPN在进行业务转发时,只需将报文解析到Shim层即可完成交换,业务处理时延低至微秒级,同时基于时隙的业务调度又可保证业务转发过程零拥塞,这就保证了承载网的超低时延转发。

第1章中提到,不同大区之间的业务交互需要满足严格的硬隔离的要求,利用SPN的FlexE切片技术可实现不同大区间的业务硬管道隔离(见图3),大区内的业务统计复用可使资源得到高效利用,满足不同电力业务的带宽、时延等差异化承载需求。在应用过程中,只需建设一张SPN物理网络,远期电力系统业务扩展时仅需创建新的切片即可,运维简单且业务部署高效。

2.2.2 细粒度承载技术

SPN细粒度承载技术是一种面向综合业务承载的TDM传送网技术,可在一张物理网络上实现10 Mbit/s颗粒度的硬隔离切片,具备灵活的 $N \times 10$ Mbit/s带宽分配能力,从而为多种业务(2 Mbit/s~10 Gbit/s级别)提供差异化(如带宽、时延、抖动等)承载服务。SPN细粒度承载技术可以用来承载分组业务和恒定比特率

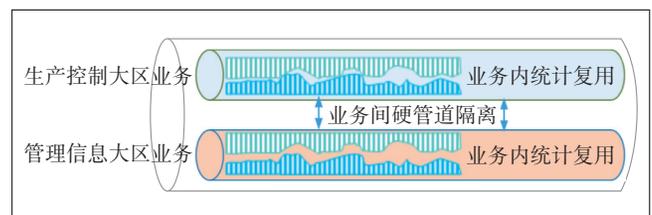


图3 基于FlexE技术的硬管道隔离

(Constants Bit Rate, CBR)业务,包括E1和STM-1。

细粒度承载技术通过层次化设计融入SPN的整体架构中。在原有的SPN技术分层模型的基础上,切片分组层增加了CBR业务,切片通道层增加了细粒度单元(Fine Granularity Unit, FGU)。IUT-T G.8310和IUT-T G.8312规定SPN通道层带宽隔离度为5 Gbit/s,而FGU可以对5 Gbit/s做进一步的时隙划分及复用,最终形成10 Mbit/s的小颗粒通道,实现小颗粒业务的承载。

目前电力系统的小颗粒(2 Mbit/s)业务,如线路保护、精准负荷控制等仍使用SDH技术承载,而SPN理论上也可在标准以太网上提供类SDH的TDM通道能力。随着带宽需求及业务时延要求的提升,SPN技术将更适合应用在电力系统中。

2.2.3 高效大带宽技术

FlexE技术不仅可实现端口拆分,也可实现端口的捆绑。通过FlexE捆绑技术,业务可以由多个物理端口(GE、10GE)捆绑,以支持更大速率的业务传送,捆绑后的端口拥有独立的MAC地址,例如绑定3路100GE端口即可实现300GE速率,增加带宽速率的同时降低了传输时延。这种按需灵活扩展带宽的技术为电力通信网络链路带宽容量扩容提供了便捷、高性价比的解决方案。

2.2.4 基于SDN的集中管控技术

SPN通过SDN技术实现网络的集中管控功能。SDN控制器对承载网能力进行抽象,屏蔽下层网络的实现技术,实现跨域跨厂商的协同组网。通过网络资源监控,实时闭环调度网络资源,最大化资源利用率。基于融合SDN管控的架构还提供了简化的网络协议和开放的网络等。

该功能可对智能运营系统的服务架构、业务模型、驱动策略、运营流程、可靠性、安全性保障等方面做出优化,能更好地满足电力业务对大带宽、低时延、灵活调度、高精度、高可靠的多种需求。

在电力系统中,生产控制大区主要包括分布式能源调控、配电自动化、配网差动保护等控制类业务;管理信息大区包括用电电能计量、分布式能源调控采集等采集类业务,变电站/输电线路机器人巡检等移动类业务以及现场作业管控、视频监控等信息管理类业务。如表1所示,控制类业务对安全性要求高且时延敏感,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

表1 典型电力业务通信需求

所属大区	业务大类	业务类型	带宽需求	时延需求	可靠性需求/%
生产控制大区业务	控制类	配电自动化“三遥”	≤19.2 kbit/s	秒级	99.999
		分布式能源调控控制类	≤19.2 kbit/s	秒级	
		精准负荷控制	≤256 kbit/s	<50 ms	
		智能分布式FA	2 Mbit/s	<20 ms	
		配电网差动保护	2 Mbit/s	<20 ms	
		配电网微型同步相量测量PMU	≤10 Mbit/s	<50 ms	
管理信息大区	采集类	用电信息采集	10 kbit/s	秒级	99.9
		分布式能源调控采集类	上行峰值800 kbit/s, 下行峰值400 kbit/s	秒级	
	移动类	变电站/输电线路巡检机器人	4~10 Mbit/s	<200 ms	
	管理类	移动现场施工作业管控	20~100 Mbit/s	<200 ms	
高清视频监控		4~10 Mbit/s	<200 ms		

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、广域性的特点,对传输带宽及接入数量有较大需求。SPN具有大带宽、支持分组业务海量接入的能力,切片通道则可以提供低延时、低抖动及硬隔离功能,能够满足控制类业务的安全隔离要求和管理类及移动类业务的传输时延、带宽以及采集类海量终端接入的要求。同时,SPN支持管控合一的集中式智能调度,可实现业务及性能的实时监控,与电力业务的通信需求有较强的契合性。

3 电网SPN应用探讨

3.1 SPN组网设计方案

作为PTN的替代演进技术,SPN的组网方式有2种:PTN与SPN混合组网和PTN与SPN分别独立组网^[6]。

3.1.1 PTN与SPN混合组网

采用混合组网方式时,可根据地区地理结构及电网结构特点,以地(市)地调、备调、500 kV变电站及部分220 kV变电站为骨干,优先利用SPN设备组建核心层、汇聚层,接入层则根据现有PTN设备的运行情况进行逐步更换。

核心环、汇聚环组网形式以环网或者网格状网络为标准,以保证业务汇聚能力和传送能力。同时通过双节点来连接各个环,避免因单节点故障导致的系统安全问题。网络带宽配置应合理考虑地区骨干通信

网网络容量及网络结构,当核心环带宽测算超过50GE时,优先考虑多环50GE的核心结构,无法多环分担时,核心环采用100GE带宽。核心环节节点数量根据地区变电站的规模和数量来确定。

当核心、汇聚环建设完成后,接入层站点按需逐步进行更换。由于PTN设备的南向接口无统一的规范标准,同品牌的SPN和PTN设备无法实现标签、信令、地址的互联互通。因此,当接入层逐步进行更换时,可能会出现2种情况:同品牌SPN设备与PTN设备对接以及异品牌SPN设备与PTN设备对接。同品牌SPN与PTN设备对接时只需SPN设备先配置与对接PTN速率相同的端口,形成端到端组网。异品牌SPN与PTN设备对接时则采用PTN OVERlay SPN的方式,即令县域的接入层站点暂时运行PTN网络,核心层、汇聚层的SPN设备仅作为接入层PTN设备的信息传输通道,核心层、汇聚层的业务落地站点(如地调、备调、县公司等)同时运行SPN设备和PTN设备,PTN设备通过线路侧GE光路接入本站SPN设备的用户侧接口,以此实现接入层PTN网络的透传,最终使接入层PTN业务在地调、备调的PTN设备落地。图4给出了异品牌SPN与PTN混合组网方案示意。

3.1.2 PTN与SPN独立组网

在独立组网方式下,SPN与PTN分别组网建立核心、汇聚、接入环网络,2张网络可采用不同的网络拓

扑结构,以适应不同的业务流向。组网设计原则与混合组网方式类似,值得注意的是,PTN与SPN的网络规模应根据实际的业务传输需要确定。当SPN的运行网络被认为更实用、更适合业务传输时,应最大程度地减少PTN的网络规模,网络节点仅保留地调、备调、县级公司及调度数据网汇聚点(如有该汇聚点)的PTN设备。

3.2 业务承载方案

结合通信网业务承载现状及关键业务安全隔离承载需求,针对电力业务的安全分区要求,当整张SPN网络不存在异品牌对接问题时,SPN可开启3个切片,切片1承载I、II区业务,由TMD交叉切片承载;切片2承载III、IV区业务,通过MTN分组切片实现与I、II区的端到端物理隔离;切片3承载信息外网业务,切片间基于FlexE时隙隔离。当存在异品牌对接问题时,SPN网络开启4个切片,切片1承载I、II区业务,切片2承载III、IV区业务,切片3承载信息外网业务,切片4承载PTN业务。2种情况下的SPN网络切片划分如图5和图6所示。

按照业务分类,SPN网络应主要承载分组数据业务,如调度数据网、集控站监控系统等实时控制类业务以及数据通信网、信息外网等经营类业务,SDH仍旧承载线路保护、精准负荷控制等安全防御类业务,具体业务承载方式及业务流向如表2所示。组网时可

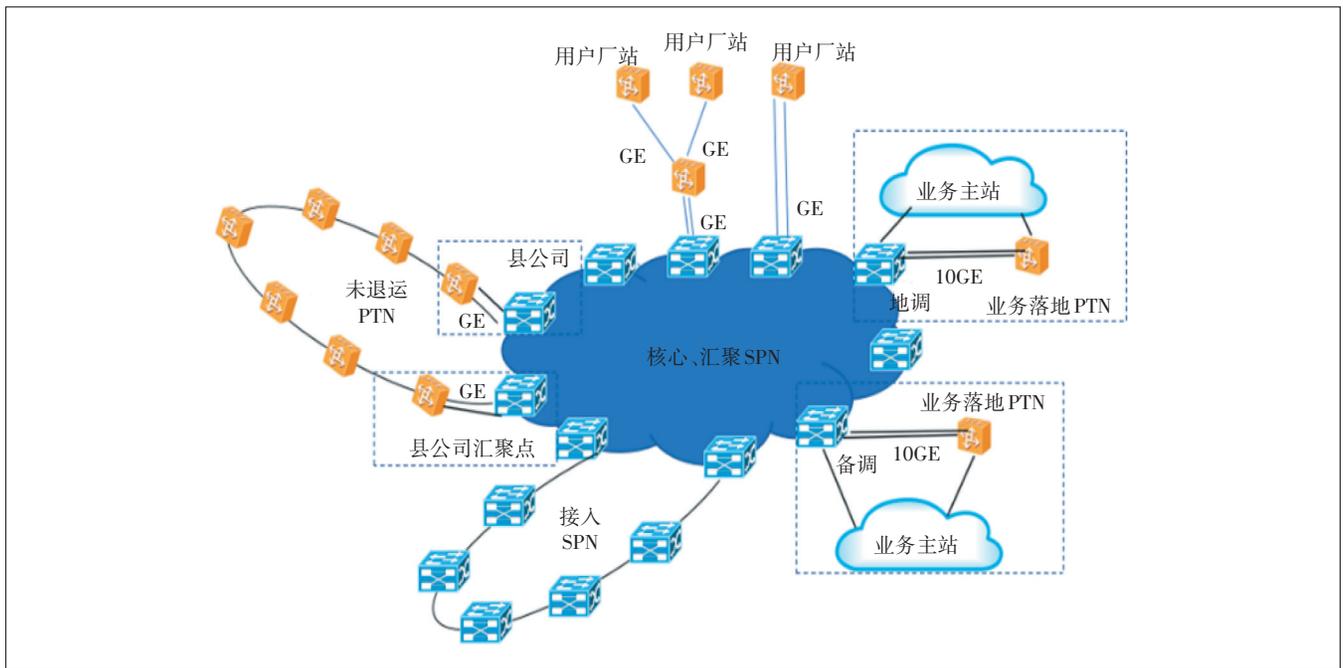


图4 异品牌SPN与PTN混合组网方案示意

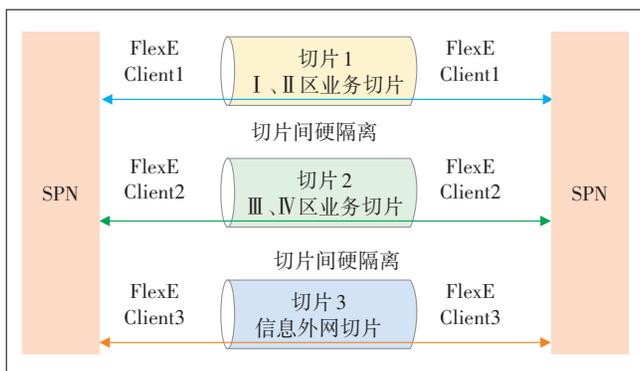


图5 同品牌情况下SPN切片组成示意

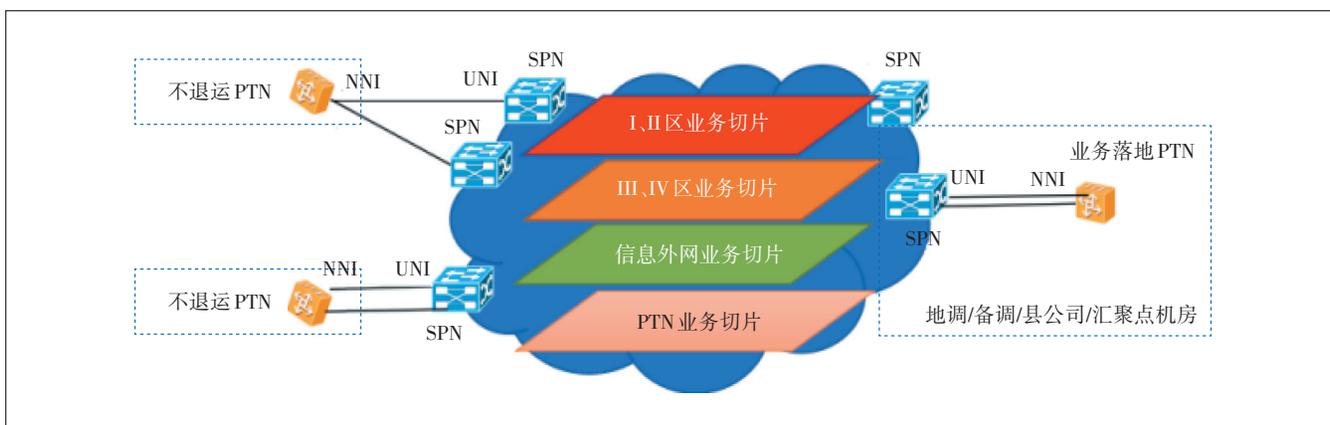


图6 异品牌情况下SPN切片组成示意

切片通道层的线性保护、切片分组层的网络传送子层保护和客户业务子层保护。

为提高网络带宽利用率和保证保护倒换性能,针对SPN承载的每种业务类型仅配置一层网络保护机制。从表2可以看出,SPN承载的电力I、II区业务由基于Flex-E交叉的端到端硬切片通道承载,可在SPN切片通道层上启用切片通道层APS线性保护(见图7);电力III、IV区业务切片及互联网大区业务由共享切片通道承载,可在SPN切片分组层的网络传送子层上启用线性保护或环网保护,MPLS Tunnel APS 1:1线性保护、PW APS 1:1线性保护和环网保护示意分别如图8、图9和图10所示。

4 结语

SPN技术基于以太网层、IP层、光层集成了以太网切片技术、SR隧道技术等多项创新技术,形成了新一代的分组传输网体制。根据电力业务对通信带宽、安全隔离性的要求,SPN高带宽、硬隔离、易运维的优势

根据业务类型及不同类型业务的带宽需求,为核心层、汇聚层、接入层的3个切片分配带宽。

3.3 网络保护方案

SPN传输网络保护方案包括设备级保护和网络级的保护方案。

3.3.1 设备级保护

设备级保护是对重要板卡的保护,各个站点部署的SPN设备交叉板、主控板、时钟板、电源板等可采用1+1热备份方式进行配置。

3.3.2 网络级保护

SPN采用分层保护架构,包括切片传送层的保护、

更能适应电力通信网的演进发展。本文从电力通信网的需求出发,分析了SPN的网络结构及关键技术对电力业务的适应性,并探讨了SPN在电力通信网中的组网设计、业务承载方案及保护方案,对SPN在电力通信网中的应用具有较强的指导性。

参考文献:

- [1] 刘林,祁兵,李彬,等.面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J].电网技术,2020,44(8):3114-3128.
- [2] 周劭英,张晓,邵立高,等.新型电力系统网络安全防护挑战与展望[J].电力系统自动化,2023,47(8):15-24.
- [3] 郭小溪,陈彦宇,贾平,等.电力通信中SDH技术应用与网络优化思考[J].数字通信世界,2022(10):161-163.
- [4] 刘雁斌,陈烈强.本地OTN承载业务探讨与应用浅析[J].邮电设计技术,2014(3):76-79.
- [5] 刘国军,武晓宇,李建岐,等.分组传送网承载电力多业务的隔离性与关联性分析[J].电力系统自动化,2016,40(20):140-146.
- [6] 中国通信标准化协会.切片分组网络(SPN)总体技术要求:YD/T 3826-2021[S].北京:人民邮电出版社,2021.
- [7] 周飞飞,何迎利,卢岸,等.FlexE技术在能源互联网中的研究和应

表2 业务承载方式

传输网平面	承载业务	业务流向	
SDH	线路保护	220 kV 变电站—220 kV/500 kV 变电站	
	精准负荷控制	精切站点—控制子站/主站	
	安稳系统	安稳站点—控制子站/主站	
	调度数据网第二接入网	变电站—地调/备调/核心站点、变电站—县公司/汇聚站点、汇聚站点—核心站点、变电站—集控站	
SPN	切片1: I、II 区业务切片	调度数据网第一接入网	变电站—地调/备调、变电站—县公司/汇聚站点、县公司/汇聚站点—地调/备调
		地县一体化	县公司—地调/备调
		接入网远程通道	10 kV 出线变电站—地调/县公司
		MMI(人机界面)	地调—备调
		集控站监控系统	集控站—地调/备调
		通信网管网	网关网元站点—地调/备调
	切片2: III、IV 区业务切片	调度电话	变电站—地调/备调
		视频监控	变电站—地调
		动环监控	变电站—地调/备调
		数据通信网	变电站/办公场所—市公司/县公司、县公司—市公司
	切片3: 信息外网切片	视频会议	办公场所—市公司/县公司、县公司—市公司
		信息外网	办公场所—市公司/县公司、县公司—市公司

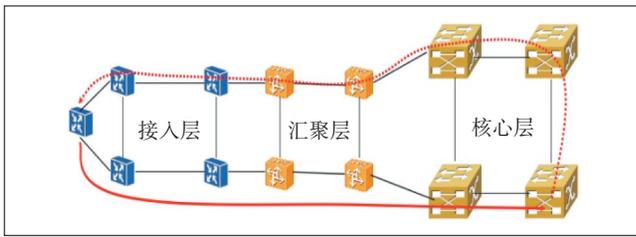


图7 切片通道层APS线性保护示意

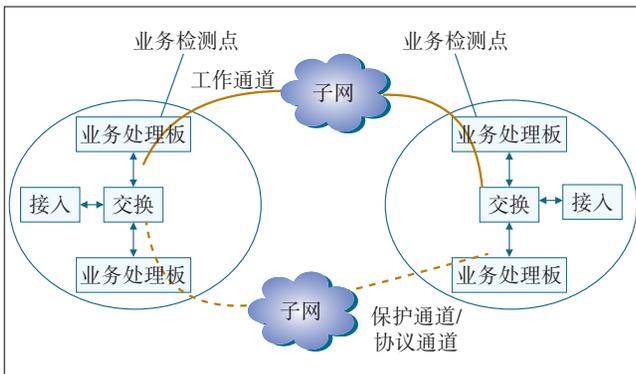


图8 切片分组层MPLS Tunnel APS 1:1线性保护示意

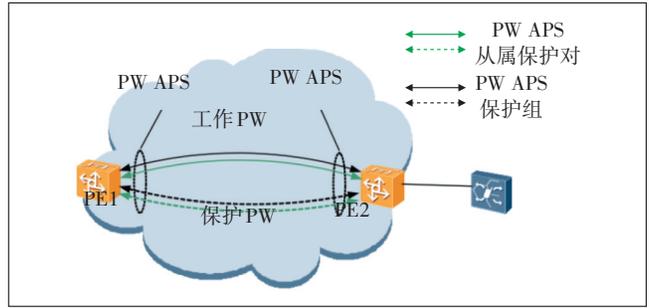


图9 切片分组层PW APS 1:1线性保护示意

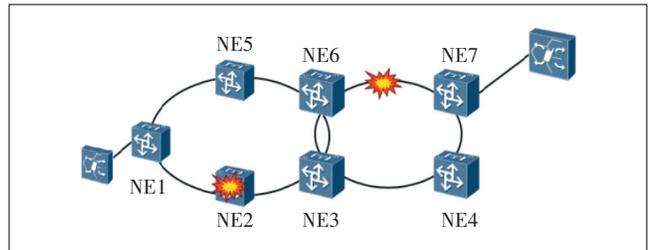


图10 切片分组层环网保护示意

用[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(10): 70-78.

- [8] 贺政, 李勇, 王迎春, 等. 基于SPN的专线业务承载方案[J]. 移动通信, 2020, 44(5): 68-71.
- [9] 吴琼, 任驰. 网络切片的演进及应用研究[J]. 邮电设计技术, 2021(9): 61-65.
- [10] 段宏, 郭昌华, 刘文钊. FlexE技术及其在5G承载网中的应用探析[J]. 邮电设计技术, 2020(3): 80-85.
- [11] 方琰崴, 陈亚权, 李立平, 等. 5G网络切片解决方案和关键技术[J]. 邮电设计技术, 2020(3): 70-74.
- [12] 陈骋, 南蜀崇. 基于SPN的5G+车联网的切片技术的应用与研究[J]. 邮电设计技术, 2021(5): 87-92.
- [13] 张智渊. 电力通信技术在智能电网中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(3): 392-393.
- [14] IEEE. 802.3cd-2018 - IEEE Standard for Ethernet - amendment 3: media access control parameters for 50 Gbit/s and physical layers and management parameters for 50 Gbit/s, 100 Gbit/s, and 200 Gbit/s operation; IEEE Std 802.3-2018[S]. New York: IEEE, 2019.
- [15] 刘立刚, 张建忠, 吕文琳, 等. 智能城域网多业务承载硬切片技术实践[J]. 邮电设计技术, 2022(4): 30-34.

作者简介:

段晓, 毕业于华北电力大学, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统通信领域的研究工作; 何宝影, 毕业于东北电力大学, 高级工程师, 学士, 主要从事电力系统通信领域的研究工作; 李哲, 毕业于兰州大学, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统通信领域的研究工作; 朱瑞杰, 毕业于东北电力大学, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统通信领域的研究工作; 孙海蓬, 毕业于山东大学, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统通信领域的研究工作。