



专题：细颗粒光传送网

新型电力系统下fgOTN的应用研究

陈孙胜, 汪毅, 林洺其, 陆绍彬, 杨棋涵, 郑建
(国网浙江省电力有限公司温州供电公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 随着新型电力系统的发展, 各类新兴业务快速增长, 这对通信传输网络的业务颗粒度、带宽、时延和可靠性等提出了更高的要求。相较于传统的同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 与光传送网 (optical transport network, OTN) 技术, 细颗粒光传送网 (fine grain optical transport network, fgOTN) 技术更加契合当前新型电力系统的发展需求。基于此背景, 描述了fgOTN的标准演进过程, 阐述了fgOTN的技术原理, 介绍了fgOTN的应用优势, 最后对电力系统业务的适配性进行了探讨和实验测试, 并分析了测试结果。研究旨在为今后fgOTN在电力系统的推广应用提供数据参考和借鉴。

关键词: fgOTN; 电力系统; 适配性

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025018

Research on the application of fgOTN in the new electric power system

CHEN Sunsheng, WANG Yi, LIN Mingqi, LU Shaobin, YANG Qihan, ZHENG Jian
Wenzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou 325000, China

Abstract: With the development of new electric power systems, various emerging businesses are growing rapidly, which puts higher demands on the service granularity, bandwidth, latency, and reliability of communication transmission networks. Compared to traditional synchronous digital hierarchy (SDH) and optical transport network (OTN) technologies, fine grain optical transport network (fgOTN) technology is more suitable for the current development needs of new electric power systems. Based on this background, the standard evolution of fgOTN was described, the technical principles of fgOTN were elaborated, the application advantages of fgOTN were introduced. Finally, the adaptability of fgOTN to power system services was discussed and experimentally tested, and the test results were analyzed. The research aims to provide data references and insights for the future promotion and application of fgOTN in the electric power system.

Key words: fgOTN, electric power system, adaptability

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2024-12-30

通信作者: 陈孙胜, 1515881681@qq.com

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目 (No.5211WZ40005)

Foundation Item: Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No.5211WZ40005)

0 引言

目前, 电力通信网络中并存着两种电力通信光传输网络架构, 以满足不同层次的电网通信需求^[1]: 一种是以同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 技术为核心构建的电力生产网, 其广泛覆盖信息中心、各级调度中心及变电站, 承担着电力继电保护、安稳控制、调度自动化及调度电话等关键业务的传输任务; 另一种是基于光传送网 (optical transport network, OTN) 技术的电力干线综合承载网, 它主要服务于调度数据网、综合数据网等数据传输网络, 能够提供大带宽、长距离的传输专线服务。

随着新型电力系统的发展, 微电网、5G 物联、人工智能和智慧调度等新兴业务快速增长, 这对电力通信传输光网络架构提出了更高的要求, 需要更灵活的业务颗粒度、更高的带宽需求、更低的时延以及更严格的物理隔离等^[2-3]。展望至“十五五”规划末期, 电力系统对传输的带宽需求预计将达到 40 Gbit/s 的水平^[4]。然而, 当前广泛应用的 SDH 技术受限于其最大支持带宽仅为 10 Gbit/s, 且该技术标准自 2007 年起便已停滞, 不再进行演进^[5-6]。OTN 技术虽能提供高达 100 Gbit/s 的带宽, 但灵活性不足, 其最小传输单元为 1.25 Gbit/s^[7-8], 而在电力生产网络中, 超过 90% 的业务带宽配置需求仅为 2 Mbit/s。因此, 寻找一种更适合小粒度业务传输的解决方案已成为当前亟须解决的问题。

1 fgOTN 的技术介绍及应用优势

1.1 fgOTN 的标准演进

继 OTN 之后, 鉴于对小粒度业务需求的响应, 业界涌现了多种解决方案^[9-12], 如分组增强型光传送网 (packet-enhanced optical transport network, PeOTN)、光业务单元 (optical service

unit, OSU) 及切片分组网 (slice packet network, SPN) 等技术。其中 OSU 技术尤为引人注目, 国内众多企业相继提出了针对 OSU 技术的应用场景需求及其相应的解决策略^[13-15], 并通过现网测试充分验证了基于 OSU 技术在多域网络间及在异厂商设备间的业务承载和互通功能。然而, OSU 技术始终存在以下 4 个问题^[16-17]: (1) 在 OSU 帧结构中, 采用的支路端口号 (tributary port number, TPN) 并不符合时分复用 (time division multiplexing, TDM) 技术的标准; (2) 92 byte 的有效载荷单元引发了显著的时延问题; (3) 为同时支持 OTN 和移动通信网络 (mobile telecommunication network, MTN), 采用两个独立的 Sub-1G 时分复用复接与交换机制显得冗余; (4) 理想的带宽粒度设定不应为 2.6 Mbit/s。

考虑上述情况, 业界进行了广泛探讨与细致协商, 最终依据 G.osu 技术标准, 创造性地引入了细颗粒光传送网 (fine grain optical transport network, fgOTN) 技术。2023 年 11 月, 国际电信联盟电信标准分局 (International Telecommunications Union the Telecommunications Standardization Sector, ITU-T) 正式制定了 fgOTN 标准。

1.2 fgOTN 的技术原理

1.2.1 fgOTN 接口规范

ITU-T G.709 标准详细阐述了 OTN 接口的信息结构规范^[18], 基于 ITU-T G.709 标准的 OTN 接口结构如图 1 所示。其中, OTM-n.m 被界定为具备全面功能的光传送模块 (optical transport module, OTM) 接口, 而 OTM-0.m 与 OTM-nr.m 则被视为功能简化的 OTM 接口。这些接口均遵循 ITU-T G.709 标准的速率配置与帧结构格式, 因此都被视为标准的 OTN 接口。fgOTN 接口结构信息遵循 OTM-0.m 规格, 即采用了简化功能的 OTM 接口设计。fgOTN 业务支持承载在现网的 OTN 业务上, 这也得益于其遵循 OTN 的接口规



范这一固有优势。OTN 接口结构中的符号信息见表 1。

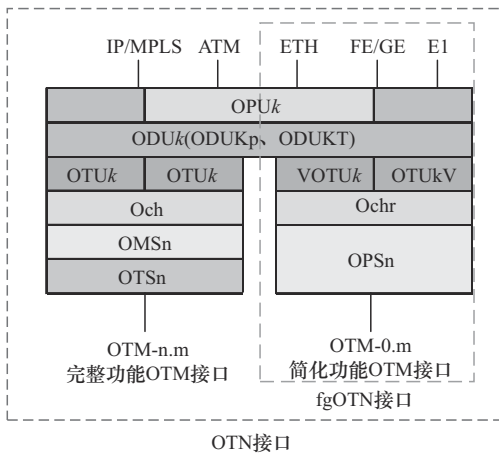


图1 基于ITU-T G.709标准的OTN接口结构

1.2.2 fgODUflex 帧结构

fgODUflex 帧结构如图 2 所示，主要包括 fgODUflex 开销区域和 fgOPUflex 区域，为 4 行×3 824 字节列结构。第 1~14 字节列和第 1 905~1 918 字节列的 fgODUflex 开销区域分别如图 3 和图 4 所示^[1]。开销区域中的符号信息见表 2。

表 1 OTN 接口结构中的符号信息

| 符号 | 代表信息 |
|---------|-------------|
| E1 | 2 Mbit/s 业务 |
| FE/GE | 百兆/千兆以太网 |
| ETH | 以太网业务 |
| ATM | 异步传输模式 |
| IP/MPLS | IP 多协议标签交换 |
| OPU | 光通路净荷单元 |
| ODU | 光通路数据单元 |
| OTU | 光通路传送单元 |
| Och | 光通路层 |
| OMS | 光复用段层 |
| OTS | 光传送段层 |
| OPS | 光物理段层 |

fgODUflex 帧结构具体定义如下。

(1) fgODUflex 开销区：具体包括第 1~14 字节列以及第 1 905~1 918 字节列，该区域由 FAS0~FAS7、MFAS、PM、TCM1 和 TCM2 以及 DA 等组件构成。其中在 1 915~1 917 字节列定义的数字适配接口 (digital adaptation interface, DAi) 开销，每个 DAi 由 3 byte (DAi.1、DAi.2 和 DAi.3)

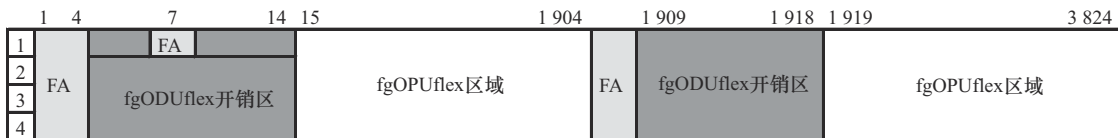


图2 fgODUflex 帧结构

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|------|---|---|----------|---------|----------|------|--------|-----|-----|------|------|-----|----|
| 1 | FAS0 | | | RES | | MFAS | RES | | | | STAT | RES | | |
| 2 | FAS2 | | | TCM2 DM | TCM1 DM | PM DM | RES | | | | STAT | RES | | |
| 3 | FAS4 | | | TCM2 | | RES | TCM1 | | RES | PM | | STAT | RES | |
| 4 | FAS6 | | | TCM2 APS | | TCM1 APS | | PM APS | | RES | STAT | | RES | |

图3 第1~14字节列的fgODUflex 开销区域

| | 1 905 | 1 906 | 1 907 | 1 908 | 1 909 | 1 910 | 1 911 | 1 912 | 1 913 | 1 914 | 1 915 | 1 916 | 1 917 | 1 918 |
|------|-------|-------|-------|--------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FAS1 | | | | PM TTI | TCM2 TTI | TCM1 TTI | DA1.1 | DA4.2 | DA3.3 | RES | | | | |
| FAS3 | | | | PM TTI | TCM2 TTI | TCM1 TTI | DA2.1 | DA1.2 | DA4.3 | RES | | | | |
| FAS5 | | | | PM TTI | TCM2 TTI | TCM1 TTI | DA3.1 | DA2.2 | DA1.3 | RES | | | | |
| FAS7 | | | | PM TTI | TCM2 TTI | TCM1 TTI | DA4.1 | DA3.2 | DA2.3 | RES | | | | |

图4 第1 905~1 918字节列的fgODUflex 开销区域

组成，主要负责时钟透传同步，而DAi.2和DAi.3作为前面DAi.1的复制值，用于错误保护。

表2 开销区域中的符号信息

| 符号 | 代表信息 |
|------|--------|
| FAS | 帧对齐信号 |
| PM | 通道监视 |
| DA | 相位偏差累计 |
| PT | 净荷类型 |
| MFAS | 复帧对齐信号 |
| TCM | 串联连接监视 |
| RES | 保留字节 |
| CSF | 客户信号失效 |
| DM | 数据映射 |
| STAT | 状态 |
| APS | 自动保护倒换 |

(2) fgOPUflex 区域：包括第 15~1 904 字节列以及第 1 919~3 824 字节列，该区域由单个 fgOPUflex 帧所构成。该 fgOPUflex 帧可进一步细分为以下两大区域。

- fgOPUflex 开销区：主要用于客户信号的映射方式和带宽调整，包括第 15~16 字节列以及第 1 919~1 920 字节列，其中第 15~16 字节列包含客户 CSF 和 PT 组件。
- fgOPUflex 净荷区：用于传输实际的数据信息，包括第 17~1 904 字节列以及

第 1 921~3 824 字节列。

上述所有帧结构及开销的传输顺序均遵循从左至右的原则，且每个字节的传输均以其最高位（第 1 bit）为起始，依次至最低位（第 8 bit）结束。

1.2.3 fgOTN 复用层次结构

fgOTN 复用层次结构如图 5 所示^[1]。

业务首先被映射到 fgOPUflex 净荷部分，并在此过程中添加了必要的映射开销。随后，通过 fgODUflex 开销，系统提供了一级端到端 PM 能力和两级 TCM 能力。最终，fgODUflex 通过复用到服务层 ODU 的一个或多个 10 Mbit/s 时隙中，实现了业务的传送。

业界将 fgODUflex 开销类比为快递包裹上的分类标签，使 fgOTN 具备灵活承载多种业务的作用。当业务跨越多个子网时，一级 PM 具备实时检测业务状态以及故障的能力。两级 TCM 机制能够提供子路径监测、故障定位以及抗多次断纤保护能力，从而显著增强网络的稳定性和可靠性。

1.3 fgOTN 的应用优势

1.3.1 承载效率高

fgOTN 承载效率高有两个关键因素：一是支持带宽灵活调整，fgOTN 起始带宽低至 10 Mbit/s，且可按需调整，相比 SDH 中 STM-16 至少占用

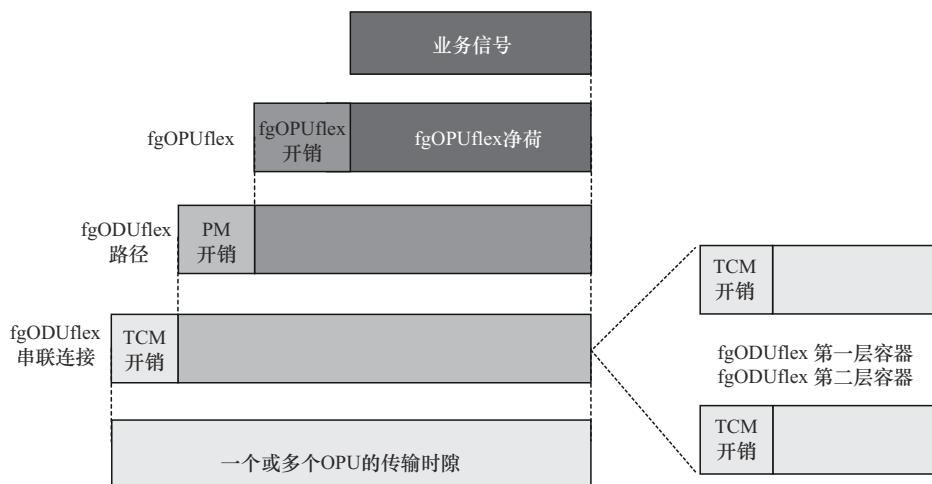


图5 fgOTN 复用层次结构^[1]



2.5 Gbit/s 的 ODU 固定方式，显著提高了带宽资源利用率；二是创新性地引入了 fgODUflex 灵活容器，使 fgOTN 具备多种业务的高效承载能力，从而增强了带宽利用的灵活性。

1.3.2 业务时延低

业务时延是传输设备的一个重要性能指标，它主要涉及信号从发送端到接收端所经历的总时延。电力系统中包括映射时延、去映射时延和传输时延等业务时延。

fgOTN 主要通过引入特定的路径层 fgODUflex 并结合固定的时隙分配策略来实现降低业务时延及抖动的功能。

一方面，fgOTN 标准引入特定的路径层 fgODUflex，该路径层简化了 fgODUflex 到 OPU 服务层的映射过程，同时减少了映射开销。相比 SDH，fgOTN 同样简化了其业务的映射层级，并且承载的颗粒业务越小，其理论上能简化的映射层级越大，Sub-1G 小颗粒承载业务映射对比如图 6 所示。这一简化缩短了 fgOTN 处理映射和去映射过程的计算时延。

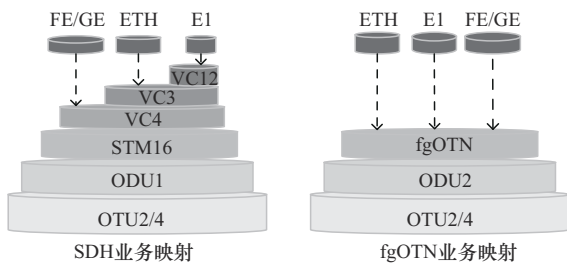


图6 Sub-1G 小颗粒承载业务映射对比

另一方面，fgOTN 采用固定 16 byte 的时隙分配方式，每路 fgODUflex 复用进 OPU_k 的时隙位置固定，业务传输时延相对稳定，提供了微秒级低时延及超低时延抖动能力。这些特性也为 E1 和 VC 等恒定比特率（constant bit rate, CBR）业务提供了更为高效、可靠的承载环境。

1.3.3 无损带宽调整

fgOTN 提供了百毫秒级别的快速无损带宽

调整能力，带宽支持 Mbit/s 级到 Gbit/s 级灵活调整，无损带宽调整原理如图 7 所示^[1]，首先，边缘节点通过内置的业务动态感知机制实时监测业务带宽需求的变化，并在确认需求变化后，对所需资源进行逐段评估和预留，然后通过 fgODUflex 中携带的 BWR_IND 指示一步完成 fgODUflex 速率和服务层占用的时隙数量调整。

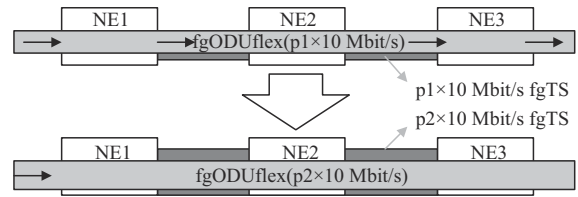


图7 无损带宽调整原理

简而言之，fgOTN 的一步带宽调整机制通过边缘节点触发、逐段资源预留和一步带宽调整（先逐级调整 fgODUflex 管道带宽，再调整客户侧接入业务带宽）等步骤，从而实现百毫秒级无损的带宽调整。

1.3.4 时钟透传同步

fgOTN 创新性地引入了时钟透传机制，该机制主要通过 fgODUflex 帧中第 1 915~1 917 字节列定义的 DA_i 开销来完成，其中每个 DA_i 由 3 byte (DA_{i.1}、DA_{i.2} 和 DA_{i.3}) 组成，DA_{i.2} 和 DA_{i.3} 作为前面 DA_{i.1} 的复制值，用于错误保护。

时钟透传机制如图 8 所示，图 8 以 CBR 业务传输为例，时钟透传机制采用了逐点时钟相位偏差累计技术，业务在传输过程中，中间段每个节点不再进行时钟同步处理，本地节点的 DA_i 开销都会将从上一节点接收到的时钟信号的相位偏差进行累加，接着在末端节点 NE_N 统一处理，从而恢复出初始节点 NE₀ 的时钟信息，最后完成业务的偏移抖动纠正。

fgOTN 的时钟透传机制不仅避免了 SDH 在全网范围内进行复杂时钟同步时带来的挑战，而且有效规避了传统 OTN 在采用逐跳时钟恢复方案

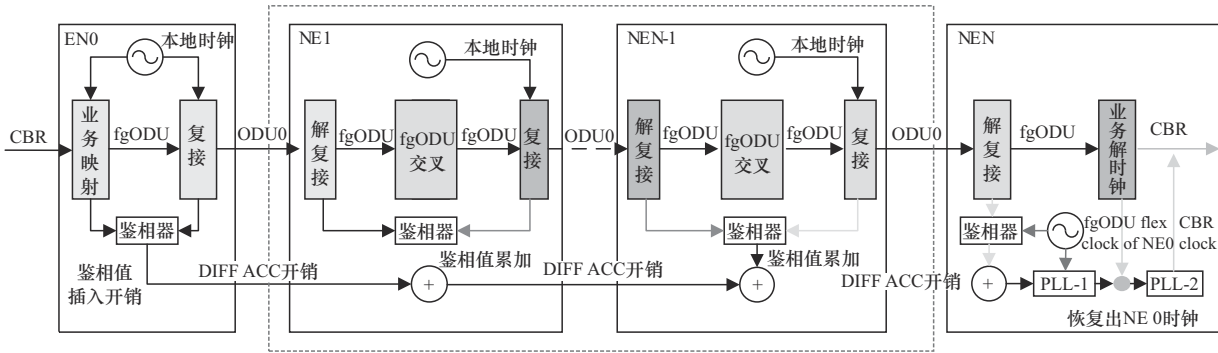


图8 时钟透传机制

时，面对大规模业务场景所产生的高昂处理成本和复杂性问题。

1.3.5 硬管道隔离

fgOTN采用了与SDH相同的固定时隙交叉连接机制，通过将固定的10 Mbit/s时隙细分为独立的时隙段，为不同业务分配专属时隙资源，从而在时隙层面上实现业务间的有效隔离^[19]。作为OTN技术的扩展延伸，fgOTN还充分利用了波分复用（wavelength division multiplexing, WDM）技术所具备的大带宽特性，能为多种业务信号分配不同的波长通道，进而实现波长间的业务隔离，fgOTN硬管道隔离如图9所示。此外，fgOTN还继承了OTN中高低阶复用机制，通过不同层次的复用，进一步增强了业务的隔离性。

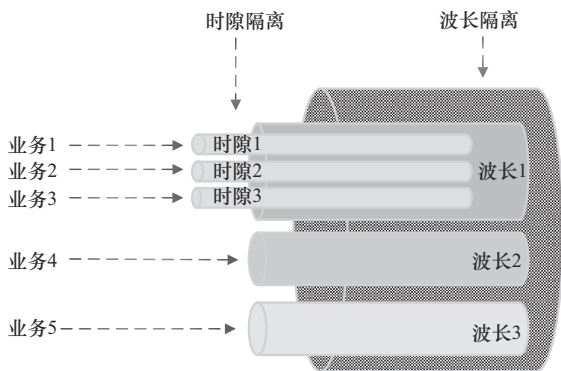


图9 fgOTN硬管道隔离

fgOTN的硬管道隔离机制融合了TDM与WDM技术，能够为多样化业务分配专属的时隙资源与独立的传输通道。该机制从根源上确保了

各业务间的互不干扰性，实现了业务层面的硬隔离，有效解决了传统数据专线中带宽共享引发的突发流量拥塞问题，显著提升了网络传输的稳定性和业务隔离度。

1.3.6 灵活适配性

fgOTN技术凭借其独特的无损带宽调整机制，实现了10 Mbit/s~1 Gbit/s范围内的灵活带宽支持。同时，作为OTN架构体系的重要延伸，fgOTN在业务层面上能够无缝对接并向上承载至OTN。这一特性使得fgOTN的业务侧能够支持2 Mbit/s~100 Gbit/s的灵活颗粒度业务接入，充分满足了电力设备二次接口多样化的带宽需求，支持包括单路E1、多路E1、TDM业务、FE/GE以及ETH等Sub-1G小颗粒业务和STM16/64、100GE等1G+大颗粒业务的承载。fgOTN多样化二次接口业务的承载如图10所示。

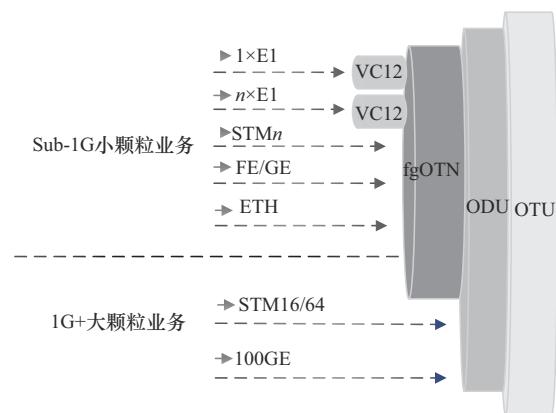


图10 fgOTN多样化二次接口业务的承载



2 fgOTN在电力系统的应用测试

2.1 fgOTN对电网业务影响分析

后续电网若规划将SDH光传输网（A网）及OTN光传输网（B网）逐步向fgOTN传输平面演进，以适应新型电力系统的发展要求，还需要综合考虑其业务承载的稳定性、时延和抖动性、硬隔离性和接口兼容性等各因素对电力业务的影响。

在稳定性方面，fgOTN设备需要具备在网络波动情况下保持业务连续性和稳定性的能力，以防止业务中断。同时，在极端环境下若发生业务中断，fgOTN设备需要确保保护机制切换时间小于50 ms，以满足电力行业的严格要求。

在时延和抖动性方面，必须严格评估fgOTN设备的时延和抖动性能，以确保其能够满足不同业务对时间敏感性的严格要求。例如，继电保护业务的时延低于12 ms。

OTN和fgOTN技术在线路侧的实现原理相同，因此在B网中OTN设备可实现直接与fgOTN设备接口对接，但在A网中SDH需要考虑与fgOTN混合组网演进来完成设备平替，因此，需要考虑fgOTN和SDH设备的兼容性。

基于上述背景，本文对fgOTN设备的承载能力、时延抖动性能、业务保护能力以及混合组网能力等内容进行了相关应用测试。

2.2 测试说明

目前fgOTN在电网领域仍处于试点测试阶段，尚未开始商用。本次业务测试选取成都某厂商的实验基地，模拟了3个站点并将其互联组成电力环网结构。每个站点的fgOTN设备采用E6616产品，版本号为R24C00。同时，采用Veex数据分析师（版本号为V300）对fgOTN设备进行性能与安全测试。

混合组网能力测试选择了地市地调，其中，fgOTN设备为E6616，版本号为R24C00，SDH设备为OSN7500，版本号为R10C03，2 Mbit/s误码仪为TFN t1000m。

2.3 测试过程及结果

2.3.1 业务接口指标测试

在实际通信网络中，鉴于设备老化、环境变化等多重因素的影响，接口频率偏移现象时有发生。为了验证fgOTN在面临此类频率偏移时能否维持业务的连续性和稳定性，对fgOTN系统进行了专门的接口指标测试，业务接口测试拓扑如图11所示，业务接口指标测试结果见表3。

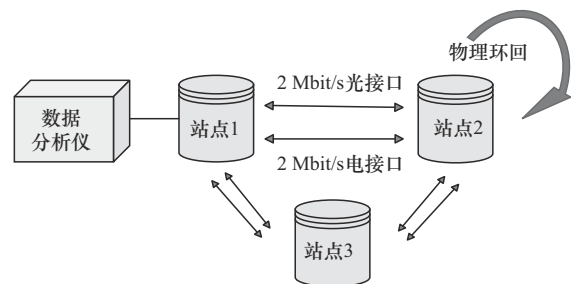


图11 业务接口测试拓扑

2.3.2 业务传输系统测试

业务传输系统测试拓扑如图12所示，通过搭建测试拓扑，模拟论证fgOTN的连通性以及硬隔离性，以及是否具备承载SDH业务的可行性。业务传输系统测试结果见表4。

2.3.3 业务时延性能测试

为站点1和站点2的接口各自连接一台数据分析师，并在两个站点间分别建立一条2 Mbit/s光接口业务和2 Mbit/s电接口业务，分别测试其业务时延及抖动指标，测试结果见表5。

表3 业务接口指标测试结果

| 测试项目 | 测试过程 | 测试结果 |
|----------------------|--|--|
| 2 Mbit/s 接口 频偏容忍度 | 步骤1 使用网管在站点1和站点2之间配置一条2 Mbit/s光接口和电接口业务； 步骤2 站点1业务端口连接仪表，站点2业务端口物理环回； 步骤3 用仪表检查业务情况并进行 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 频偏拉偏测试，查看业务状态 | 2 Mbit/s光接口和电接口在 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 频偏拉偏下，业务无误码 |

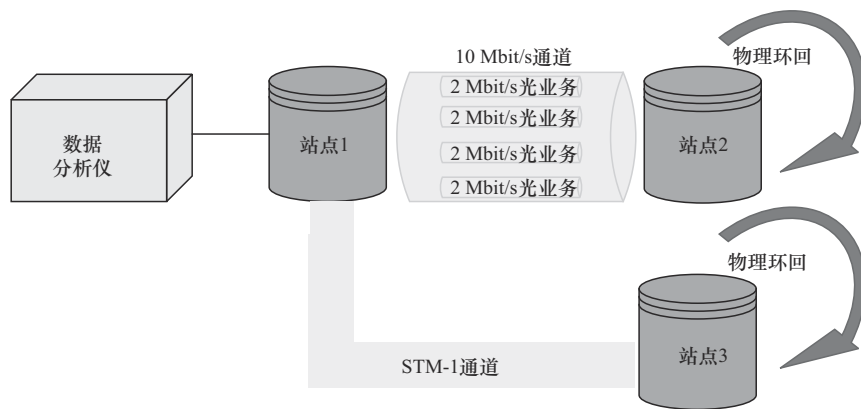


图 12 业务传输系统测试拓扑

表 4 业务传输系统测试结果

| 测试项目 | 测试过程 | 测试结果 |
|---------------------------------|---|---|
| 10 Mbit/s 小颗粒内的 2 Mbit/s 业务承载能力 | <p>步骤 1 使用网管在站点 1 和站点 2 之间配置 1×10 Mbit/s 小颗粒管道，并配置承载 1 条 2 Mbit/s 光接口业务；</p> <p>步骤 2 站点 1 业务端口连接仪表，站点 2 业务端口物理环回，使用仪表检查业务情况；</p> <p>步骤 3 删除步骤 1 配置的业务，使用网管在站点 1 和站点 2 之间配置 1×10 Mbit/s 小颗粒管道，并配置承载 4 条 2 Mbit/s 光接口业务；</p> <p>步骤 4 站点 1 业务端口连接仪表，站点 2 业务端口物理环回，使用仪表检查业务情况</p> | 同一个 1×10 Mbit/s 小颗粒管道承载 1~4 条 2 Mbit/s 业务时，业务正常 |
| STM-1 向 STM-1 接口业务承载能力 | <p>步骤 1 使用网管在站点 1 和站点 3 之间配置 STM-1 光接口业务并绑定 1×STM-1 对应带宽的一个颗粒；</p> <p>步骤 2 站点 1 业务端口连接仪表，站点 2 业务端口物理环回，使用仪表检查业务情况</p> | fgOTN 可以承载 STM-1 接口间的业务，业务正常无误码 |
| 2 Mbit/s 接口业务硬隔离性能 | <p>步骤 1 使用网管在站点 1 和站点 2 之间配置 1×10 Mbit/s 小颗粒管道，并配置承载 1 条 2 Mbit/s 业务；</p> <p>步骤 2 站点 1 业务端口连接仪表，站点 2 业务端口环回，用仪表查看业务连通性并测试时延及抖动；</p> <p>步骤 3 在步骤 1 创建的 10 Mbit/s 小颗粒管道内采用脚本方式批量重复增/删另外 3 条 2 Mbit/s 光接口业务配置，实时监控对步骤 2 的 2 Mbit/s 业务连通性及时延抖动影响，以验证同一个小颗粒内部的硬隔离情况；</p> <p>步骤 4 保持步骤 3 的配置，继续使用网管在站点 1 和站点 2 之间脚本方式批量重复增/删 N×10 Mbit/s 小颗粒管道，每个小颗粒管道承载 1 条 2 Mbit/s 光接口业务；其中 N×10 Mbit/s 小颗粒管道要求与步骤 2 配置的 1×10 Mbit/s 管道时隙相邻且为同一个服务层颗粒，以验证小颗粒之间的硬隔离情况；实时监控对步骤 2 的 2 Mbit/s 业务连通性及时延抖动影响</p> | 10 Mbit/s fgOTN 颗粒内和颗粒间的业务均为硬隔离，周边业务或时隙的频繁增删不对既有业务的连通性、时延产生影响 |

2.3.4 业务保护能力测试

业务保护能力测试拓扑如图 13 所示。按照图 13 搭建测试模型，通过命令/拔板等手段模拟业务通道发生故障，验证 fgOTN 设备支路保护倒换 (tributary protect switching, TPS)、子网连接保护 (subnetwork connection protection, SNCP)、主控交叉时钟板主/备保护、低阶交叉板主/备保护、电

源 1+1 保护的 业务性能。业务保护能力测试结果见表 6。

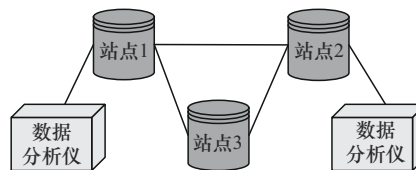


图 13 业务保护能力测试拓扑



表5 2 Mbit/s 业务传输时延及抖动测试结果

| 测试对象 | 单向时延/ μs | 双向时延/ μs | 低频抖动/UI | 高频抖动/UI |
|--------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|
| 2 Mbit/s 光接口 | 300 和 312 | 12 | 0.032~0.033 | 0.032~0.034 |
| 2 Mbit/s 电接口 | 315 和 320 | 5 | 0.063~0.069 | 0.060~0.067 |

表6 业务保护能力测试结果

| 测试项目 | 倒换时间/ms |
|---------------------|---------|
| 2 Mbit/s 光单板 TPS 保护 | 8 |
| 2 Mbit/s 电单板 TPS 保护 | 6~7 |
| 2 Mbit/s 接口板 SNCP | 32 |
| 主控交叉时钟板主/备保护 | — |
| 低阶交叉板（哑板）主/备保护 | 22~33 |
| 电源 1+1 保护 | — |

2.3.5 混合组网能力测试

混合组网测试拓扑如图 14 所示，通过搭建测试拓扑，测试验证 fgOTN 设备与 SDH 设备混合组网时的设备兼容性以及业务导通能力。混合组网能力测试结果见表 7。

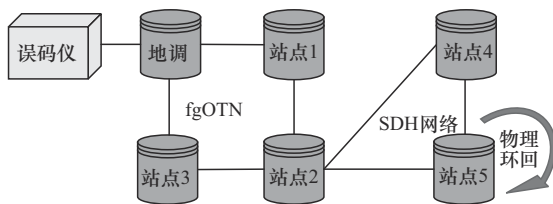


图 14 混合组网测试拓扑

3 fgOTN 电力测试结果及应用前景分析

3.1 测试结果分析

本文对 fgOTN 设备分别进行了业务接口指标测试、业务传输系统测试、业务时延性能测试、

业务保护能力测试和混合组网能力测试。

业务指标测试结果显示，2 Mbit/s 业务在 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 频偏拉偏下，业务流量正常，无误码及丢包。这表明在网络环境发生变化时，fgOTN 能够确保业务的连续性和稳定性，降低网络波动导致的业务中断风险。

业务传输系统测试结果显示，当单个 1×10 Mbit/s 小颗粒管道承载 1~4 条 2 Mbit/s 业务时，所有业务均能正常运行。此外，fgOTN 系统能够成功承载 STM-1 接口间的业务传输，且未观测到丢包或误码现象。这表明 fgOTN 具备将现有 SDH 业务升级为 fgOTN 的切实可行性。测试还显示，在 10 Mbit/s fgOTN 颗粒内部以及不同颗粒之间，频繁地增加或删除业务或时隙，不会对现有业务的连通性及传输时延造成任何影响，从而证实了 fgOTN 系统的硬隔离特性。

时延性能测试结果显示，2 Mbit/s 光接口单向时延为 300 μs 和 312 μs ，2 Mbit/s 电接口时延为 315 μs 与 320 μs ，双向时延分别为 12 μs 和 5 μs ，低频抖动幅度范围分别为 0.032~0.033 UI 和 0.063~0.069 UI，高频抖动幅度范围分别为 0.032~0.034 UI 和 0.060~0.067 UI。2 Mbit/s 业务时延具备低时延抖动的特性，且满足电力行业中继电保护业务时延低于 12 ms 的要求。

业务保护能力测试结果显示，fgOTN 设备支持主控交叉时钟板主/备保护和电源 1+1 保护，倒换时设备正常工作，业务无影响。关于 fgOTN 设备的 TPS、SNCP、低阶交叉板主/备保护的倒换时间，实验测试结果分别为 8 ms、6~7 ms、32 ms 和 22~33 ms，均满足电力行业中倒换时间小于 50 ms 的要求。

表 7 混合组网能力测试结果

| 测试项目 | 测试过程 | 测试结果 |
|------------------------|---|-----------------------|
| fgOTN 设备和 SDH 设备混合组网测试 | <p>步骤 1 使用网管地调以及站点 5 之间配置 1 条 2 Mbit/s 的 E1 业务；</p> <p>步骤 2 业务路径为地调—站点 3—站点 2—站点 5，保护路径为地调—站点 1—站点 2—站点 4—站点 5；</p> <p>步骤 3 站点 1 业务端口连接各类仪表，站点 5 业务端口物理环回</p> | 测试期间线路正常，无误码、丢包、时延等情况 |

混合组网能力测试结果显示, 2 Mbit/s 的 E1 业务在不同设备传输时线路正常, 未出现误码, 也无丢包、时延等情况。这说明 fgOTN 与 SDH 设备能够兼容, 具备混合组网能力, 满足了后续电力 A 网和 B 网设备平滑演进的前提条件。

3.2 fgOTN 在电力的应用前景

fgOTN 的高效承载能力、低时延以及强干扰能力等优势满足了新型电力系统对数据传输和关键业务保障的需求, 有效解决了传统 SDH 和 OTN 技术在承载效率、海量连接和快速带宽调整等方面的不足。fgOTN 未来将在电力系统中发挥多重作用: 一是强化电力骨干网的传输效能, 满足“四遥”业务的低时延、高精度传输需求; 二是为继电保护等核心业务提供稳定连接, 确保电网安全; 三是支持电力系统的灵活扩展与智能化升级, 满足未来电网发展的多元化需求。

4 结束语

本文首先探讨了目前电力系统的技术特点, 介绍了新一代通信传输技术 fgOTN, 接着阐述了 fgOTN 的技术原理, 包括其封装协议、帧结构及复用层次结构, 并介绍了 fgOTN 在电力系统中的诸多应用优势, 如高承载效率、低时延、无损带宽调整、时钟透传同步以及硬管道隔离和灵活适配性等特性。这些技术优势使得 fgOTN 在小颗粒业务承载方面展现出广阔的应用前景。最后本文对 fgOTN 的业务接口指标、业务传输性能、业务时延性能、业务保护能力以及混合组网能力进行了实验测试。实验结果验证了 fgOTN 在电力系统运行的可靠性以及可行性, 为今后 fgOTN 在电力系统的推广应用以及设备的平滑演进提供了数据参考和借鉴。

参考文献:

[1] 华为技术有限公司. fgOTN(细颗粒光传送网)技术白皮书[R]. 2024.

- Huawei Technologies Co., Ltd. fgOTN (fine particle optical transport network) technical white paper[R]. 2024.
- [2] 刘康先. 基于数字化转型的新型电力系统构建[J]. 应用能源技术, 2022(2): 7-11.
- LIU K X. Construction of new power system based on digital transformation[J]. Applied Energy Technology, 2022(2): 7-11.
- [3] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327-8341.
- SHU Y B, ZHANG Z L, TANG Y, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327-8341.
- [4] 王志轩. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架[J]. 阅江学刊, 2021, 13(3): 35-43.
- WANG Z X. Construction of a new power system framework with new energy as the main body[J]. Yuejiang Academic Journal, 2021, 13(3): 35-43.
- [5] LIANG D, BAI Y W, ZHANG P, et al. Research method for redundant optical transmission network mapping based on SDH/OTN[C]//Proceedings of the 2024 6th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI). Piscataway: IEEE Press, 2024: 407-410.
- [6] PRAVDA M, LAFATA P, VODRAZKA J. Precise time protocol in Ethernet over SDH network[C]//Proceedings of the 2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Piscataway: IEEE Press, 2011: 170-174.
- [7] 唐雄燕, 王海军, 杨宏博. 面向专线业务的光传送网(OTN)关键技术及应用[J]. 电信科学, 2020, 36(7): 18-25.
- TANG X Y, WANG H J, YANG H B. Key technologies and application of optical transport network for leased line services[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(7): 18-25.
- [8] SMITH B P, FARHOOD A, HUNT A, et al. Staircase codes: FEC for 100 Gb/s OTN[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(1): 110-117.
- [9] YU S Y, SUN Q, ZOU Y, et al. Application of OSU technology in power communication system[C]//Proceedings of the 2024 3rd International Joint Conference on Information and Communication Engineering (JCICE). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [10] ZHAO X, XU Y B, TANG R, et al. Pe-OTN/OSU based multi-service bearing scheme and evolution strategy for electric power backbone transmission network[C]//Proceedings of the 2023 6th International Conference on Communication Engineering and Technology (ICCET). Piscataway: IEEE Press, 2023: 49-54.
- [11] WEI R C, LAN H J. Research SPN technology of 5G transmis-



sion network[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1059-1062.

- [12] TING L, BIN L. Analysis of 5G Internet of vehicles application based on SPN[C]//Proceedings of the 2022 12th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). Piscataway: IEEE Press, 2022: 543-549.
- [13] 晁夫君,荆瑞泉. 基于OSU技术的政企OTN网络架构与业务模型研究[J]. 光通信研究, 2024: 1-10.
CHAO F J, JING R Q. Research on the architecture and business model of government enterprise OTN network based on OSU technology[J]. Study on Optical Communications, 2024: 1-10.
- [14] 荆瑞泉,霍晓莉,李俊杰,等. 以OSU为核心的M-OTN技术创新与验证[J]. 电信科学, 2021, 37(4): 116-124.
JING R Q, HUO X L, LI J J, et al. OSU based M-OTN technology innovation and verification[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(4): 116-124.
- [15] YU T K, YANG H, YAO Q Y, et al. Intelligent service-oriented graph representation-assisted high-efficiency fine grain grooming for OSU-based OTN[C]//Proceedings of the 2024 22nd International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [16] 黄德明. OSU关键技术及标准进展[J]. 长江信息通信, 2021, 34(11): 36-38.
HUANG D M. OSU key technologies and standards progress[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(11): 36-38.
- [17] 胡筱莎,廖彬涵. OSU技术浅析[J]. 通信与信息技术, 2023(2): 39-41.
HU X S, LIAO B H. Brief analysis of OSU technology[J]. Communication & Information Technology, 2023(2): 39-41.
- [18] COLLE D, DE MAESSCHALCK S, DEVELDER C, et al. Data-centric optical networks and their survivability[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 6-20.
- [19] ZHAO Y, LIN Y, LI Y B, et al. Intelligent service-oriented optical network based on fine-grain OTN and edge-cloud coordination[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.

[作者简介]



陈孙胜 (1994-), 男, 国网浙江省电力有限公司温州供电公司助理工程师, 主要研究方向为电力系统通信。



汪毅 (1982-), 男, 国网浙江省电力有限公司温州供电公司工程师, 主要研究方向为电力系统通信传输以及电源。



林洺其 (1999-), 男, 国网浙江省电力有限公司温州供电公司助理工程师, 主要研究方向为电力系统通信。



陆绍彬 (1989-), 男, 国网浙江省电力有限公司温州供电公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信。



杨棋涵 (1991-), 男, 国网浙江省电力有限公司温州供电公司工程师, 主要研究方向为电力系统通信传输。



郑建 (1996-), 男, 国网浙江省电力有限公司温州供电公司工程师, 主要研究方向为智能电网调度。