

电力专网中 OTN 传输系统应用与优化

简家莲

国网中卫供电公司 宁夏 中卫 755000

【摘要】：电力专网承载调度自动化、继电保护、配电终端接入等关键业务，对传输系统的可靠性、实时性与安全隔离能力提出更高要求。OTN 传输系统凭借大容量、精细化交叉调度和多业务统一承载能力，逐步成为电力通信骨干网络的重要技术形态。围绕电力专网业务特征，分析 OTN 在组网结构、带宽调度与业务映射方面的应用方式，结合双平面保护、精细颗粒调度与智能运维机制，对系统结构与运行模式进行优化设计。通过构建高可靠组网架构与完善的保护机制，实现关键业务快速切换与稳定传输，提高网络资源利用率和运行可控性，推动电力专网向高稳定、高效率方向发展。

【关键词】：电力专网；OTN 传输系统；组网优化；业务承载；可靠性提升

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.065

1 电力专网传输承载需求分析

1.1 电力核心业务通信特征

电力专网承载调度自动化、继电保护、稳控系统、配网终端接入等关键业务，数据类型涵盖遥信、遥测、遥控与保护信号等多种实时信息。此类业务对传输时延、抖动和误码率具有严格约束，尤其是继电保护与差动保护信号，要求毫秒级传输时限和极高的链路稳定性。同时，调度数据与视频巡检等宽带业务并存，呈现出小颗粒高优先级业务与大带宽业务混合承载的特征。通信系统需具备明确的 QoS 分级能力和硬隔离机制，保障高等级业务优先转发与稳定运行。在多站点、多层级的电网结构中，通信节点数量庞大，业务流向复杂，传输系统必须支持灵活交叉调度与精细化带宽管理，确保关键控制信号在复杂网络环境下仍保持确定性传输。

1.2 专网结构对可靠性的要求

为满足电网运行连续性要求，通信网络需具备高可用性与快速倒换能力，链路及设备层面均应配置冗余机制。核心节点多采用双路由、双电源和双控制板设计，传输链路通过环网或网状结构实现路径备份，保证单点故障不影响整体运行。对于重要变电站和调度中心，通信通道需具备独立物理路由与多平面承载能力，确保业务在链路异常时实现毫秒级切换^[1]。网络结构还需满足分区隔离与权限控制要求，通过逻辑划分与业务分层，提升系统安全性与抗干扰能力，使专网在复杂运行环境下保持稳定与可控状态。

1.3 传统传输方式存在的不足

早期电力通信系统多采用 SDH 或 PDH 等传输技术，虽具备较强的语音与低速数据承载能力，但在大带宽与多业务融合场景下逐渐显现局限。固定颗粒带宽分配方式难以适应配网自动化和高清视频回传等高容量需求，资源利用率偏低。交叉调度能力受限，无法实现灵活的业务动态调整，影响网络扩展效率。面对 IP 化与数据化趋势，传统系统对分组业务的适配能力不足，跨层协同与精细化运维能力相对薄弱，故障定位依赖

人工分析，恢复效率较低。同时，保护机制多基于单一环网结构，面对复杂拓扑环境时抗风险能力有限，难以满足当前电力专网对高可靠与高效率传输体系的技术要求。

2 OTN 传输系统在电力专网中的部署模式

2.1 OTN 技术体系与功能构成

OTN 传输系统以光传送网架构为核心，构建在 DWDM 波分复用平台之上，通过电层与光层协同实现大容量与高精度调度能力。系统采用 ODUk、OSU 等标准化颗粒作为基本交叉单元，支持硬管道式带宽分配与精细化映射管理，可满足电力专网中差动保护、调度自动化及数据专线等不同速率业务的承载需求。电层交叉矩阵提供大容量无阻塞调度能力，实现跨站点业务灵活配置；光层则通过光通道监测与自动功率调节保障链路质量稳定。配合 OTN 帧结构中的 FEC 前向纠错机制，可有效降低误码率，提升长距离传输可靠性。系统还集成光功率监测、性能统计与告警管理功能，实现对误码、时延、光功率衰减等关键指标的实时采集与分析，为电力专网运行维护提供数据支撑。

2.2 骨干与接入层的组网结构设计

在电力专网部署中，OTN 系统通常构建骨干层与接入层分级承载结构。骨干层面向省级或地市级调度中心之间的大容量互联，采用网状或环形拓扑结构，结合 ROADM 技术实现波长级灵活调度与光通道动态配置，增强网络扩展能力与链路冗余能力。关键节点配置双控制平面与双电源系统，形成高可靠核心承载平台。接入层面向变电站、配电站及终端设备接入场景，通过小型化 OTN 设备或盒式节点实现业务集中汇聚，将低速保护信号、自动化数据与视频流量统一接入上层网络^[2]。骨干与接入之间通过电层交叉调度实现颗粒级带宽分配，避免资源浪费。针对重要站点，可设计双上行链路结构，构建主备或负载分担通道，保障业务连续性。

2.3 多业务统一承载实现路径

电力专网呈现控制类小带宽业务与数据类大带宽业务并

行运行的格局, OTN 系统通过多层映射机制实现不同业务类型的统一承载。基于 GFP、VCAT 及 LCAS 等技术, 可将以太网、串行数据及专线业务映射至 ODUK 或 OSU 容器, 实现标准化封装与透明传输。针对高优先级保护信号, 采用固定带宽分配与硬隔离方式构建独立通道, 保障时延确定性与零丢包特性; 对于视频监控与信息数据流, 则通过弹性带宽调度实现容量动态分配, 提高链路利用率。系统支持 QoS 分级与流量整形机制, 通过差异化调度策略保障关键业务优先级。配合集中网管平台, 可对业务开通、带宽调整与路径配置进行统一管理, 实现跨区域资源调配与快速部署。通过电层精细调度与光层大容量传输相结合, 形成兼顾稳定性与灵活性的统一承载体系, 满足电力专网多类型业务长期稳定运行需求。

3 面向关键业务的结构优化策略

3.1 双平面与环网保护机制设计

在电力专网中, 继电保护、调度自动化及稳控系统对通信连续性具有极高依赖度, 一旦链路中断将直接影响电网运行安全。针对这一特性, OTN 传输系统在结构设计中引入双平面承载架构, 将关键业务分别部署于相互独立的 A、B 两个传输平面, 物理路由、设备单元及供电系统相互分离, 避免单点故障引发业务同时失效。双平面结构通过独立光路和分离节点实现全路径冗余, 关键站点之间建立双路由光纤通道, 并在电层配置 1+1 保护或光通道级别的线性保护机制, 确保主用链路异常时备用通道立即接管业务。在区域层级内部, 可构建多节点光纤环网结构, 利用 OTN 设备支持的环网保护协议, 实现 50 毫秒级倒换能力。环网内部通过智能交叉调度, 保障业务在断纤或节点异常情况下自动重构路径, 避免人工干预延长恢复时间。对于重要变电站与调度中心, 可在双平面基础上叠加跨环互联结构, 形成网状保护体系, 提高整体拓扑抗风险能力。保护策略不仅覆盖光层链路, 也延伸至电层交叉矩阵与控制平面, 实现多维度冗余设计, 使关键控制信号在复杂网络环境中保持持续稳定传输。

3.2 精细颗粒带宽调度优化

电力专网业务呈现明显的差异化特征, 既包含低速高优先级的保护信息, 也包含高带宽的视频监控与信息数据流。传统固定带宽分配方式易造成资源闲置或拥塞风险。基于 OTN 的精细颗粒调度能力, 可利用 ODUK、OSU 等交叉单元实现亚速率级带宽划分, 通过电层交叉矩阵完成按需分配与动态调整。关键业务采用硬管道分配方式, 固定带宽独立承载, 避免与其他流量共享资源而产生抖动。

在大带宽业务场景下, 可通过虚级联与链路容量调整技术实现带宽弹性扩展, 结合流量统计数据进行容量规划与实时优化^[3]。调度策略依据业务优先级与实时性要求进行差异化配置, 高等级业务分配独立时隙和专属通道, 低优先级业务则采用共

享带宽模式, 通过队列管理与流量整形维持网络稳定。结合网管系统对链路利用率、误码率与时延指标的持续监测, 形成基于数据分析的带宽优化机制, 确保资源配置与实际业务负载匹配。精细化调度不仅提高链路利用效率, 也降低关键业务受干扰的概率, 为电力专网构建可控、可调的传输环境。

3.3 跨层协同的快速倒换机制

电力专网对故障恢复时限具有严格标准, 单一层面的保护措施难以覆盖复杂故障场景。通过构建光层与电层协同的倒换机制, 可缩短业务中断时间并提升恢复成功率。光层依托光通道自动保护与波长级重构能力, 在检测到光功率异常或链路断纤时迅速触发保护动作; 电层则基于交叉矩阵与业务映射关系, 实现业务路径快速重配置。两层之间通过统一控制平面与告警联动机制实现信息共享, 使故障定位与路径切换同步完成。在重要业务通道中, 可配置双归属结构, 业务同时建立主备映射关系, 当光层倒换未能完全恢复时, 电层可立即启动备用通道, 实现无缝切换。结合时钟同步与网络管理系统, 保障切换过程中不产生明显时延漂移与数据丢失。为避免误动作引发频繁倒换, 可设置多级门限与判决逻辑, 对信号质量进行连续监测与趋势分析, 提高保护决策准确度。

4 运行性能提升与运维优化措施

4.1 实时监测与故障定位机制

电力专网承载大量实时控制与保护信息, 运行状态必须处于可视、可控范围。依托 OTN 系统内置的性能监测模块, 可对光功率、电流、电压、误码率、光信噪比及链路时延等关键指标进行连续采集, 通过 OTUk 层与 ODUK 层开销字节实现端到端性能统计。系统在网管平台中建立多维度监测模型, 对链路质量波动进行趋势分析, 提前识别潜在隐患。针对突发故障, 利用告警关联分析技术, 将光层告警与电层业务异常进行交叉比对, 快速定位故障节点与影响范围。在重要业务通道上部署在线光监测与 OTDR 检测模块, 实现对光纤断点和衰减位置的精确测量, 缩短现场排查时间。通过分级告警机制, 将紧急告警与一般告警进行分类管理, 提高运维响应效率。对关键站点实施双向链路质量监控与周期性性能评估, 确保保护信号与调度数据的传输稳定。实时监测体系与集中网管系统联动, 形成从链路层到业务层的全流程可视化管理环境, 使电力专网在高负载运行状态下仍保持稳定性能。

4.2 资源调度与容量规划优化

电力通信网络结构复杂, 业务增长与电网扩容密切相关, 传输资源需具备合理规划与动态调整能力。依托 OTN 电层大容量交叉矩阵, 可对现有带宽资源进行统一管理, 结合业务流量统计数据, 构建基于历史趋势的容量预测模型。通过分析各区域链路利用率与峰值流量分布, 识别高负载链路和闲置资源, 实现跨区域带宽再分配。在骨干链路上采用波长级扩展策

略,根据业务增长需求逐步开通新增波道,避免一次性大规模投资造成资源浪费^[4]。接入层面依据站点业务密度进行端口规划,合理配置交叉板卡容量,提高设备利用率。对高优先级业务设置固定带宽保障,对可弹性业务实施动态带宽调节,通过精细化策略减少拥塞风险。结合网络拓扑优化与路由调整,缩短业务路径长度,降低时延与资源占用。容量规划与调度机制的协同运行,使传输系统保持稳定负载结构,为电力专网持续扩展提供有序的资源支撑。

4.3 智能化管理平台建设

构建统一的智能化管理平台,将 OTN 设备、光纤链路及业务资源纳入集中管控体系,实现拓扑展示、性能分析与故障处理一体化管理。平台通过北向接口与调度自动化系统对接,实现业务开通、路径分配与策略调整的自动化流程,减少人工配置误差。在数据处理层面,引入大数据分析算法模型,对长期运行数据进行聚类与异常识别,提升故障预测能力。通过可视化界面呈现链路状态、资源分布及业务优先级信息,增强运维人员对网络整体状态的掌握能力。平台支持多级权限管理与操作日志追踪,保障运维过程安全可审计。结合远程维护与在线升级功能,可在不中断关键业务的情况下完成系统优化与软件更新。智能化管理体系的建设,使 OTN 传输系统在电力专网中实现集中管控、精准运维与高效协同运行。

5 综合优化成效与体系完善路径

5.1 可靠性与实时性提升效果分析

通过双平面架构、环网保护及跨层协同机制的实施,电力专网在链路连续性与业务稳定性方面得到显著增强。关键控制通道在单点故障场景下可实现毫秒级自动倒换,业务中断时间明显缩短,满足继电保护与调度控制对确定性传输的严格要求。基于 OTN 帧结构的性能监测与误码校正机制,使长距离传输过程中的误码率保持在较低水平,光信号质量稳定度提升。电层硬管道隔离策略减少了高优先级业务受干扰的概率,保障差动保护及自动化数据在高负载状态下仍维持低时延与

低抖动特性。运行数据表明,链路可用率与业务成功率均保持在较高区间,传输系统对复杂拓扑环境的适应能力明显增强,形成稳定可靠的通信支撑结构。

5.2 网络资源利用率改进情况

精细颗粒调度与动态带宽分配机制投入运行后,网络资源配置方式更加灵活。ODUk 与 OSU 级别交叉能力使带宽划分更加精准,减少固定配置造成的闲置现象。通过对链路利用率与流量峰值进行持续统计,部分高负载通道得到优化重构,传输路径更加合理,骨干链路负载趋于均衡^[5]。波长资源按需开通与关闭的策略降低了冗余波道占用比例,提高光层资源使用效率。接入节点端口配置依据业务密度进行调整,避免设备容量浪费。动态调度机制使可变业务在低峰时段释放带宽供其他通道使用,整体链路利用率稳步提升,资源配置与实际业务需求之间形成较高匹配度。

5.3 电力专网承载体系整体完善

在应用部署与结构优化协同推进下,OTN 传输系统逐步构建起分层清晰、保护完善、调度灵活的承载体系。骨干层与接入层之间形成高效联动机制,关键站点建立独立物理路径与多重冗余保障,通信通道结构更加规范。统一网管平台对光层与电层资源进行集中管理,实现业务开通、故障处理与容量调整的流程化运作,运维体系趋于标准化。带宽分级管理与优先级控制策略明确了不同业务的传输边界,保障控制类信号与数据类业务稳定共存。系统架构在保持高可靠性的同时具备良好扩展能力,为电网规模扩大与业务类型增加提供持续承载基础,电力专网通信体系结构更加完整有序。

6 结语

电力专网承载结构在 OTN 体系支撑下实现架构优化与性能提升,双平面保护、精细调度及跨层协同机制强化了关键业务的稳定传输能力。运行监测与智能管理手段提升了资源配置效率与故障处置水平,网络结构更加清晰有序,通信保障能力持续增强,为电网安全运行提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 李潇.电力通信网管系统专网网络安全防护研究[J].通信电源技术,2025,42(10):219-221.
- [2] 段锦文,李妍.FGOTN 技术在电力专网领域中解决光缆资源问题的应用研究[J].中国设备工程,2025(22):83-85.
- [3] 郭顺荣.电力传输网管系统中带宽利用率优化的理论与实践[J].电气技术与经济,2025(12):390-392.
- [4] 王劲,陈梓涛.5G 毫米波电力专网建设与应用探究[J].通信世界,2025(19):42-45.
- [5] 左剑.OTN 技术在电力通信传输中的应用策略[J].通信电源技术,2025,42(1):89-91.