

基于 MPLS-TP 的电力专用通信网络组网方案与可靠性分析

杨 洋 常宛露 王松瑞

国网河南省电力公司郑州供电公司, 河南 郑州 450000

[摘要]智能电网发展起来后通信网络得满足更高的可靠性和实时性要求, MPLS-TP(多协议标签交换传输网)传输性能不错且可管可控, 因此慢慢成为电力专用通信网络的理想之选。文中根据电力通信需求特点拿出一种基于 MPLS-TP 的组网架构方案, 其中包含核心层、汇聚层、接入层的设计逻辑, 还结合关键技术进行系统分析, 在网络可靠性方面引入冗余机制、保护切换、故障恢复策略来深入探讨, 该方案提高了网络稳定性和带宽利用效率且增强了智能调度、远程控制的支撑能力, 能给未来电力通信网络提供技术支撑。

[关键词]MPLS-TP; 电力通信; 组网方案; 可靠性分析; 冗余保护

DOI: 10.33142/sca.v8i7.17131

中图分类号: TN915

文献标识码: A

Networking Scheme and Reliability Analysis of Power Dedicated Communication Network Based on MPLS-TP

YANG Yang, CHANG Wanlu, WANG Songrui

Zhengzhou Power Supply Company of State Grid He'nan Electric Power Company, Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: With the development of smart grids, communication networks need to meet higher reliability and real-time requirements. MPLS-TP (Multi Protocol Label Switching Transmission Network) has good transmission performance and is controllable, making it an ideal choice for power specific communication networks. Based on the characteristics of power communication requirements, a network architecture scheme based on MPLS-TP is proposed in the article, which includes the design logic of the core layer, aggregation layer, and access layer. Key technologies are also analyzed systematically, and redundancy mechanisms, protection switching, and fault recovery strategies are introduced to deeply explore network reliability. This scheme improves network stability and bandwidth utilization efficiency, and enhances the support capabilities of intelligent scheduling and remote control, providing technical support for future power communication networks.

Keywords: MPLS-TP; electric power communication; networking plan; reliability analysis; redundancy protection

引言

国家基础设施里电力系统是重要组成部分, 其调度、监控、保护以及信息传输需要保障, 通信网络在电力系统里起着关键作用, 由于日益增长的数据带宽和智能化需求, 传统 SDH 网络很难满足, 而传输技术 MPLS-TP 融合了 IP/MPLS 与 SDH 的优势, 具有可靠性高、灵活性强和运营级保护能力的特点, 从电力通信应用实际情况出发, 本文系统地研究 MPLS-TP 的组网模式与可靠性机制, 构建适用于不同电压等级与拓扑结构的电力通信网络, 并且提出可实施的优化策略, 助力电网通信系统朝着更高质量演进。

1 MPLS-TP 技术概述与适用性分析

1.1 MPLS-TP 的基本原理与技术特点

MPLS-TP(多协议标签交换传输网)由 MPLS(多协议标签交换)演进而来, 是一种面向连接的传输技术, 它把传统 SDH 网络的高可靠性和 MPLS 网络的灵活性融合到一起, 有传输效率高、管理可控性强、维护方便等特点, 很适合构建运营级、可视化管理的数据通信网络, 借助预先建立的 LSP(标签交换路径)进行端到端的数据转发, 在技术上有路径确定、标签转发、连接导向等优势, 能把

转发时延有效降低到亚毫秒级且吞吐率能保证超过 95%, 其内部设置了 OAM(运营、管理与维护)功能, 支持像 CC(连续检测)、BFD(双向转发检测)、LM(丢包检测)等机制, 链路状态可实时监控、故障能快速定位且保护切换 50ms 内就能完成, 调度通信和继电保护系统“零中断”的需求能够得到满足, 与 SDN 控制器对接没问题且可编程能力不错, 能和电力通信网调度平台融合, 在实际部署的时候, MPLS-TP 方案已经被多个国家级电网骨干传输网采用, 110kV 及变电站部署中网络可靠性达到了 99.999%, 整个系统的运维效率和通信保障能力明显提高了。

1.2 电力通信对网络的核心需求

整个电力系统安全、稳定与高效运行靠电力通信系统支撑, 它是核心基础设施, 其通信网络承载调度指令、实时监测数据、保护信号及自动控制命令等关键业务信息, 对网络稳定性、实时性和可靠性要求极高, 在调度自动化、继电保护、故障录波、配电自动化等应用中, 通信链路中断或者延时过高都可能使调度失灵或者系统故障, 从而造成严重电力安全隐患, 通信系统要有高可用性(可用性指标要达 99.999%)、链路冗余设计以及快速保护切换能力

(切换时间控制在 50ms 以内) 以确保业务连续性, 在智能电网发展趋势下, 大量智能终端、分布式能源和物联网设备不断接入, 通信系统需要有强大多业务承载能力, 支持 SCADA 系统、语音调度、高清视频监控、大数据平台等多种业务同步运行且保证互不干扰, 为使业务更安全, 网络要有虚拟隔离、加密传输等安全机制, 在网络运维方面, 电力企业对系统智能管理能力要求不断提高, 要实现统一平台调度、多层级告警管理、链路性能评估、智能故障定位和自动化恢复以提高网络运行效率、降低维护成本。

1.3 MPLS-TP 与传统 SDH/IP 技术对比

传统 SDH (同步数字体系) 网络在电力系统里被长期广泛运用, 靠着稳定的时钟同步机制与成熟的保护倒换功能给电网调度、继电保护等关键业务可靠的通信保障, 但随着智能电网快速发展、数据业务量急剧增加, SDH 网络带宽利用率低、业务调度能力弱、扩展灵活性差等问题越来越明显, 无法满足多业务融合、高速传输和灵活部署的需求, 而纯 IP 网络拓扑结构灵活, 资源使用效率高, 不过其面向无连接的传输特性、动态路由的不确定性和较弱的保护机制使其在关键业务保障上存在不足, MPLS-TP (多协议标签交换传输网) 是 SDH 和纯 IP 网络的融合, 在技术架构上它继承 SDH 的连接导向、低抖动和快速倒换能力并引入 IP 网络的标签转发与灵活组网能力, 支持端到端的 LSP 通道配置从而保证通信路径固定可控, 其快速保护切换小于 50ms, QoS 策略精细化, 有 OAM 链路检测与业务隔离功能, 能有效保障调度数据、图像视频、管理信息等多类业务的传输质量。MPLS-TP 与网络管理系统 (NMS) 深度集成后能够实现链路资源可视化配置、性能动态监控与智能告警等功能, 这是现代电力通信网络转型升级的重要支撑技术。

2 电力通信网络架构设计方案

2.1 网络分层结构设计

MPLS-TP 的电力通信网络一般是三层结构, 即核心层、汇聚层和接入层, 全网的骨干传输功能由核心层承担且负责各区域调度中心和主数据中心的连接, 其特点为高带宽、强冗余、高可靠性, 通常采用环网或者双核心备份结构以保证网络运行不间断; 汇聚层位于核心层和接入层中间, 负责下级站点数据流量汇总、多业务集中转发和管理, 能连接变电站、配电自动化节点并与本地控制中心通信, 业务调度很灵活; 接入层是最末端的通信节点, 直接接入各类终端设备如保护装置、远动装置、智能电表等, 主要任务是数据采集和初步传输, 通常部署在变电站、开闭所和配电自动化终端; 三层架构有利于分布式部署、集中管理、业务隔离, 还能通过划分不同层级的服务级别 (SLA) 制定网络策略, 从而实现差异化资源调度和性能保障。

2.2 拓扑结构优化

实际组网时, 电力通信网络拓扑结构设计需兼顾可靠性、资源利用率和扩展性, 常用的拓扑结构有单环、双环、星型、网状, 双环拓扑因路径冗余、环网能自愈, 在核心

与汇聚层广泛应用, 有数据表明, 典型 110kV 及变电站部署 MPLS-TP 双环结构后, 链路可用率能提升到 99.999%, 环网切换时间控制在 50ms 以内, 可有效保障调度控制、继电保护等关键业务连续性, 星型拓扑多在小型变电站或者接入层站点使用, 其连接简单、运维成本低, 但可容灾能力不强, 要让全网业务负载均衡、故障快速恢复, 复合型拓扑结构可结合使用, 如“核心双环+汇聚星型+接入链型”模式, 靠着链路自动探测和负载感知机制, 动态选最优路径传输数据, 实际部署时, 核心节点一般配置两条或者更多冗余链路, 与相邻汇聚节点互联, 汇聚节点最少部署一主一备链路, 接入节点保持基本链路冗余, 科学规划物理路径和逻辑路径, 就能有效降低单点故障风险并优化传输性能。

2.3 网络设备选型与接口规划

MPLS-TP 网络设备选型需按照不同层级节点的功能要求和业务承载能力进行匹配, 核心层设备要支持大容量交换转发、冗余主控、丰富 QoS 策略以及完整 OAM 维护功能, 推荐 100Gbps 端口、支持多业务接入且兼容 SDN 的高性能交换机, 汇聚层设备要有强大业务处理能力和多链路聚合能力, 端口带宽 10Gbps 为宜且要支持 GE/10GE/40GE 灵活组合, 接入层设备接口类型需多样, GE、电口、光口、串口以适应各类终端设备接入需求且不能缺少基本的 QoS 和保护切换能力。在接口规划方面, 关键业务如调度数据、保护信号要独立承载, 可通过逻辑隔离 VLAN/MPLS 隧道划分业务通道以避免互相干扰, 根据业务冗余需求应配置双归属、双链路接入机制以提高整体可用性。为方便集中运维和统一管控, 所有设备都要有远程管理、故障定位、软件升级和参数下发功能且要留出接口资源满足未来扩展需求。

3 MPLS-TP 可靠性技术分析

3.1 保护机制与恢复策略

MPLS-TP 在电力通信网络中的高可靠性主要靠其完善的保护机制与故障恢复策略, 为保障业务不中断, 它支持 1+1 保护、1:1 保护和共享路径保护等多种方式, 其中 1+1 保护在核心与汇聚层最常用, 数据主备路径传输, 接收端实时挑选优路径, 以此实现“零丢包”切换, 而 1:1 保护主路径故障时备路径自动启用, 可节约带宽资源, MPLS-TP 还支持双向 LSP 保护, 保证双向通信链路对等性, 提高对称性和保护效率, 它嵌入 APS (自动保护切换) 协议, 再结合 MPLSOAM 技术, 得以实现链路状态实时检测和快速切换, 在网络链路断裂或者节点故障时, 能在 50ms 内完成业务重路由, 确保调度、保护等关键业务稳定运行, 在恢复策略方面, MPLS-TP 有自动路径重计算和业务重建能力, 结合拓扑感知机制, 可动态选取主备路径之外的新路径, 实现柔性恢复和多级保护, 有效提高整个网络的韧性和可靠性。

3.2 故障诊断与告警机制

MPLS-TP 支持多种实时故障检测手段以构建完备的告警反馈与诊断体系, 其基于 OAM 框架引入 CC、LM、DM、AIS 等工具实现全栈监控从物理链路到业务层, CC

功能很特别,能在 10ms 粒度内持续检测 LSP 通断状态,链路异常时马上上报故障并启动保护切换,与 BFD 协议配合可将故障识别与定位到毫秒级,MPLS-TP 网络设备支持本地和远程告警功能,告警分为严重、主要、次要、提示等级并向 NMS 发送标准化 Trap 或者 Syslog 信息从而实现智能分析和自动化处置,系统还能预设阈值告警策略对链路时延突然增加、丢包率上升等情况提前预警以有效减少隐性故障引发业务中断的情况,运维人员通过可视化界面可进行拓扑追踪、路径识别、性能趋势分析、历史告警查询,进而大幅提高故障处理效率和精准度。

3.3 网络性能评估指标体系

全面评估 MPLS-TP 网络运行质量需建立科学、量化的性能指标体系,实时性衡量的重要参数有时延(Delay)和抖动(Jitter)且电力调度、保护业务的端到端时延需控制在 10ms 以内、抖动需小于 3ms,数据完整性受丢包率(PacketLoss)直接影响且关键业务丢包率要小于 0.001%,链路切换时间是可靠性的核心衡量指标且配置正确保护机制的 MPLS-TP 能实现小于 50ms 的恢复时间以满足电力系统保护级通信要求,网络可用性也需评估且常用指标是 MTBF(平均无故障时间)和 MTTR(平均修复时间)并且主干链路 MTBF 通常要求大于 5000 小时、MTTR 小于 2 小时,业务承载能力评估涵盖链路利用率、端口带宽匹配率与并发业务数等且要保证网络资源分配合理、各业务互不干扰,网络评估结果可由 NMS 以周报/月报形式归档从而为后续优化调整提供依据以推动通信系统朝着高质量、高效率、低故障方向不断发展。

4 典型应用场景与实施建议

4.1 调度自动化系统支撑

电力系统安全稳定运行的核心是调度自动化系统,其通信支撑系统需要有极高的实时性与可靠性,MPLS-TP 网络靠预置的双向 LSP 通道以及快速保护切换机制能保证调度指令和状态数据低时延、无中断传输且其标签转发机制可减少报文处理延迟从而保障调度命令秒级响应,每条调度链路能被 OAM 监控功能实时检测以便及时发现异常并及时切换路径提升系统运行稳定性,在实际应用里调度主站跟变电站、发电厂、集中器之间配置专属 LSP 通道就能形成高优先级调度业务域并通过 QoS 策略保障调度数据优先转发且抗拥塞能力也强,远程调度、故障隔离、潮流重构这些复杂操作中 MPLS-TP 网络能提供可视化链路管理和业务状态感知从而增强调度人员对通信状态的掌控能力,为提高调度冗余安全性主备调度系统之间建立物理隔离、逻辑冗余的双平面通信路径可通过主用链路和备用链路独立承载实现从而有效防止单点失效导致系统瘫痪。

4.2 电力调度数据中心互联

电力系统数字化转型下,调度数据中心肩负数据采集、实时分析、指令下发等关键任务,这对中心间通信带宽、稳定性与安全性有了更高要求,而 MPLS-TP 网络有高速链路聚合、路径可控和分层隔离的优势,它是数据中心互联理想

的基础架构,部署时,用 100G 主干链路能让调度主备数据中心实现高带宽传输且构建多路径保护机制可保障通信稳定,与 VPLS 等虚拟专网技术相结合能给各类业务流量构建独立逻辑隧道,使业务安全隔离互不干扰,多地调度协同、跨区运行监控场景里,MPLS-TP 有多链路汇聚和差异化调度能力,可有效处理大流量数据转发、高并发访问以及突发业务响应,设备部署上,把 SDN 控制器和 NMS 系统相结合构建统一管理平台就能实现网络资源动态调配、链路可视化监管与故障快速排查,为了更好保障互联安全性,最好结合 VPN、MACSec 等加密技术以防范链路劫持和数据泄露风险。

4.3 冗余部署与业务容灾演练

高可用电力通信网络的构建核心在于冗余设计与容灾能力,MPLS-TP 能支持链路、节点、控制面灵活地进行冗余部署,双主控、双电源、双链路这种配置可在关键通信节点达成 1+1 或者 N+1 冗余,设备或者链路出现故障时系统能自动切换到备用资源从而保障业务持续性。电力企业构建网络时可按照网络分区构建区域性冗余结构,“核心环+跨区备份链路”这种模型不错,能提高跨区域业务互通的抗故障能力,而且容灾演练要定期进行链路中断、节点失效、路由漂移这些场景的演练,检验网络切换时间和稳定性,通过仿真系统模拟实际业务路径、故障转移逻辑来验证保护策略是否有效并且优化调度规则。要提升自动化水平可配置业务流量策略模板和快速路径重建脚本以实现容灾切换的可编程、可控化管理,要将演练数据写成完整报告纳入运维体系,这样日常优化和改进就有指导依据,突发事件的应对也有技术支撑和保障依据了。

5 结束语

MPLS-TP 的电力专用通信网络在架构设计、可靠性保障以及应用实施上性能优越,既能满足电力系统对高可靠性、低时延和多业务承载的要求,也能夯实调度自动化、数据中心互联和容灾演练等关键场景的通信基础,部署分层组网、拓扑优化、设备冗余和故障恢复机制可全面提升电力通信网络智能化和韧性水平,往后结合 SDN、网络切片等新兴技术就能实现电力通信网络智能演进和自主调度能力。

【参考文献】

- [1]工业和信息化部信息通信管理局.营造健康干净安全的信息通信消费环境[N].中国电子报,2025-07-08(03).
- [2]王雅冰.地铁专用无线网络干扰信号源识别方法[J].自动化应用,2025,66(12):216-218.
- [3]刘璐晨,史新洁,李斐,等.浅谈现代卫星通信技术在海上油气勘探开发中的应用[J].海洋石油,2025,45(2):100-104.
- [4]鲁双贵,杨宗铭,苏蓉,等.电力系统网络设备专用串口卡扣式封堵方法[J].云南电力技术,2025,53(3):68-72.
- [5]周星.基于卫星移动通信的应急救援系统探析[J].中国煤炭工业,2025(6):69-71.

作者简介:杨洋(1994.10—),女,河南省商丘人,汉族,研究生学历,工程师,就职于国网郑州供电公司,从事电力通信网运维工作。