

基于新型电力数字化通信系统改造建设分析

王 剑¹ 孙 宇¹ 滕 飞¹ 张爱侠¹
WANG Jian SUN Yu TENG Fei ZHANG Aixia

摘 要

为推动电力系统数字化转型进程,提升电力通信网支撑能力,文章以安徽省级电力公司光传输网络改造工程为研究对象,提出 OTN-SDN 融合架构、四维光纤资源优化及 AI 智能运维三大技术创新方案,实现电力通信网络性能跨越式提升。通过性能测试与理论分析表明,改造后网络在带宽、时延、可靠性等关键指标均得到显著改善,年故障停机时间仅 5.26 min,系统可用性经模型计算达到 99.99%,理论结果与实测数据基本一致。工程实践验证了方案的有效性与先进性,可为新型电力数字化通信系统建设提供技术借鉴与实施范式。

关键词

数字化; AI 智能运维; 光传输; OTN 技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.02.027

0 引言

随着能源互联网建设、能源互联网示范区的推进及新一代配电网络的开展,电力系统正在进行一场深层次的数字化革命。新能源的大规模接入、负荷的多样化、负荷分散、用电量,电力市场化程度提高,给电网的通信网络提出了更高的要求^[1]。电力通信光传输网络作为传输电力系统生产、调度、营销等多类业务数据的基础设施,通信网络的性能和质量的保障直接决定电力系统安全稳定生产^[2-3]。现有电力通信光传输网络在带宽容量、时延、可靠性保障等方面已不能满足电力系统数字化发展的需要。据此本研究突破传统 SDH 架构,创新性提出 OTN+SDN+AI 三位一体的融合方案,通过动态资源调度、智能路径计算及光纤材料优化,实现电力通信网络性能质的飞跃,对推动电力行业数字化转型具有重要理论意义与实践价值^[4]。

1 案例分析

安徽省电力公司负责该省电力生产、输送和销售,承担全省数以 3 万计的基杆塔、总距离超过 34 000 km 的电力光传输网建设管理工作,网络覆盖 16 个地市、108 个县,连接各级变电站、发电厂、调度中心等 3 000 多个关键点。原有光传输网络于 2015 年左右建设,采用传统的 SDH(同步数字体系)技术,承载主干网络带宽 10 Gbit/s,接入网络带宽大多数为 2.5 Gbit/s,随着智能电网的建设,承载的电力调度自动化、电力市场交易平台、新能源监控等业务新增加了,数据传输量迅猛增长。该公司从 2020 年至 2024 年,

数据量由原来的 45 TB 增至 280 TB,增长幅度为 522%,此外,电力系统对通信网络的时延要求愈发高,调度自动化系统要求端到端时延不大于 5 ms,保护控制系统要求时延不大于 2 ms。原有网络架构承载容量、时延、可靠保障等难以适应业务发展需要,急需对网络实施升级改造^[5]。

2 升级改造技术方案

原电力通信系统网络为骨干-汇聚-接入三层架构,其中骨干网层面是连接各地市调度大楼和关键变电站的 STM-64(10 Gbit/s)的设备形成的环形网络;汇聚网层面连接各地市的县区节点,采用的是 STM-16(2.5 Gbit/s)的设备;接入层连接各类业务的节点,采用的是 STM-4(622 Mbit/s)、STM-1(155 Mbit/s)的设备,省、市、县三层网的拓扑结构。网络的整体情况是带宽容量过小、设备陈旧、网络管理各自为政。经过数据流量统计发现,现有主干链路平均占用率 78%,个别主干链路最大占用率超过了 95%,拥塞严重。另外因为目前网络设备大多数已运行了 8 年以上,故障率逐渐升高,2023 年出现故障中断业务事件多达 127 次,业务中断对电网运行安全产生了较大影响。经深入分析可知,需要升级改造的重点在于:(1)静态调度模式导致资源利用率低(链路利用率 78%);(2)传统保护机制倒换时间超过 50 ms,无法满足保护控制业务需求;(3)光纤非线性效应引发信号劣化,限制传输距离。经研究分析,在原有 OTN 上引入 SDN 技术理念,通过集中式的网络控制器实现全局资源集中管控和智能调度。通过 SDN 控制器可以根据业务需要和当前网络状况,自动规划网络路由和计算使用资源,以达到提升网络运行效率。最终提出创新引入大数据分析模型,对业务

1. 国网安徽省电力有限公司滁州供电公司 安徽滁州 239000

流量、故障模式进行聚类分析，打造以 OTN+SDN 深度融合为架构、四维光纤优化体系及 AI 驱动的智能运维平台。

2.1 OTN-SDN 融合架构设计

本次改造的中心即 OTN 技术的引入，引入遵从 ITU-TG.709 和 G.872 的技术标准，技术部门首先对全网进行了网络拓扑设计，采用三层 OTN 组网方案，在省级骨干网层面布放 OTU4（100 Gbit/s）接口设备，地市汇聚网层面布放 OTU3（40 Gbit/s）接口设备，县区接入网层面布放 OTU2（10 Gbit/s）接口设备。OTN 设备选型主要着眼于交叉连接容量、业务颗粒度支持情况以及保护倒换能力。省级骨干网的 OTN 设备交叉连接容量 19.2 Tbit/s，支持 ODU0/ODU1/ODU2/ODU3/ODU4 多种业务颗粒度，可支持从 2 Mbit/s~100 Gbit/s 全速率调度。设备上各 OTN 节点均配置双主控板、双交叉板，其中主控板采用主备热备冗余模式、交叉板采用负荷分担模式，单板故障不影响业务。光接口模块均为 CFP2 封装的相干光模块，支持 DP-QPSK 和 DP-16QAM 调制方式，传输距离可达 2 000 km。对于保护方式，骨干层采用“OCH 1+1”保护的结构。保护倒换时间小于 35 ms，并在网络层面采用 ODUk 层保护，保护倒换时间小于 50 ms，形成 1+1 双重保护。通过专门的技术人员对 OTN 设备时钟同步功能进行精细配置，利用 IEEE1588v2 精确时间协议实现全网的时钟同步功能，设备的时钟精度优于 ±50 ns，达到电力系统的时钟同步技术指标的要求^[5]。其架构与实现具体如下：

2.1.1 分层分域控制器架构

（1）业务骨干网。构建由省 - 市 - 县三层 OTN 网络为骨干架构，采用双环保护拓扑，单点故障不中断业务。

（2）SDN 控制层。SDN 技术应用则为新建网引入新型的网络控制架构，该架构为分布式的 SDN 控制器设计，在省级调度中心设主控制器，在地市调度中心设区域控制器，形成了分层分域的管控架构，部署分层分域控制器（主控 + 区域控），支持 OpenFlow 1.3 与 NETCONF 协议，实现网络资源全局调度；

（3）动态网络切片。首创电力业务五元组（带宽、时延、抖动、可靠性、优先级）动态映射算法，通过 PCE 引擎与 TE 算法，支持 VPN 秒级创建与业务隔离。

2.1.2 OTN+SDN 深度融合控制器实现

本项目创新采用 OTN+SDN 深度融合控制，实现分层分域架构。探索利用 SDN 技术应对云计算和移动性带来的挑战，实现按需分配带宽、IP 和光网络的多层优化。在电力通信中，SDN 可以实现网络资源的统一管理和动态分配，提高网络效率和可靠性。在省级、地市、县区各层调度中心部署区域控制器，形成“主控 - 区域控 - 边缘控”三级管控体系，如图 1 所示^[6]。

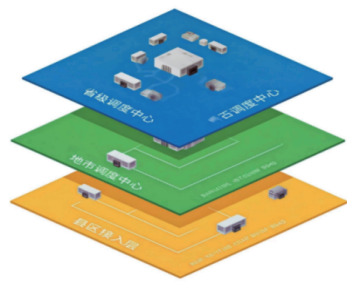


图 1 三层三级控制器架构拓扑

如图 1 所示采用三层三级控制器架构，在省级调度中心部署主控制器（基于 ONF TAPI 模型开发），在地市调度中心部署区域控制器，在县区接入层部署边缘控制器，从而形成“主控 - 区域控 - 边缘控”三级管控体系，使主控制器负责全网拓扑管理、路径计算及策略下发，区域控制器负责本地业务调度与故障处理。并通过 OpenFlow 1.3 协议实现与 OTN 设备的标准化通信，南向接口采用独立 IP 专网隔离控制平面与数据平面，确保控制指令的高可靠性传输。

2.1.3 动态网络切片实现

随着电力通信网络数据的不断提升，电力业务需求的增长，实现网络切片动态和准确的资源分配是当下网络必须解决的问题。通过设立动态网络切片，使电力通信网络运营和供电企业可以实现对网络资源高效地分配与管理，提供灵活、高效和可靠的网络服务，为不同场景和业务需求提供定制化的网络解决方案。本案提出基于五元组（带宽、时延、抖动、可靠性、优先级）的动态切片算法，算法流程如图 2 所示。

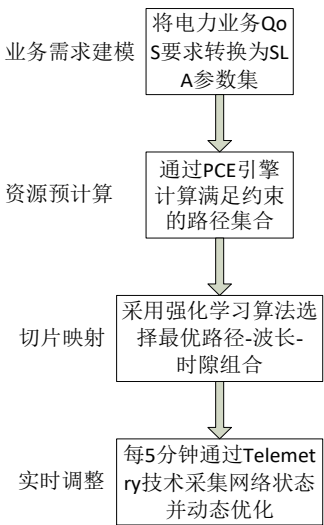


图 2 动态切片算法流程图

该方法实现了对动态变化的网络切片资源的合理分配，使得网络可以为不同业务提供的服务更加灵活，从而提升了电力通信网络服务质量，增加了用户体验并且提高了资源的利用率^[7]。

2.2 四维光纤优化体系

2.2.1 光纤选型测试数据

在安徽电网实际测试中,对比 G.652D、G.655、G.654.E 三种光纤性能,因材施教,最终选用 G.655 光纤,其非线性阈值较 G.652 提升 40%,在 100 Gbit/s 系统中可支持最长 800 km 无中继传输。其模场直径 80 μm ,衰减系数 0.19 dB/km (1 550 nm),非线性系数 $\leq 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$;该种光纤的有效模场面积比 G.652 普通单模光纤有效模场面积增大了 60%,光功率密度减小了 60%,能有效降低自相位调制、交叉相位调制、受激布里渊散射、受激拉曼散射等非线性效应,且光纤的非线性系数在 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 以下,系统的单波光功率可以提高,减少信号失真度;色散为零波长在 1 530~1 565 nm 之间,避免工作在 1 550 nm 波段主波长,从而防止四波混频效应对传输质量产生的影响;色散斜率参数为 0.07 ps/(nm²·km),在 C 波段和 L 波段范围内的色散值是平坦的,满足密集波分复用系统对于色散均匀度的要求^[7]。实现通信网络的光纤网络升级改造,优化和扩充光纤网络能力,工程新建、改造光缆线路共计 8 500 km,全面使用 G.655 光纤,信号和传输距离大幅提升。网络管理采用统一系统,实现对所有网络设备集中监控,集中管理。缩短故障处理时间,定位时间由原来的 30 min 下降到 5 min 以内。

2.2.2 色散管理实施方案

采用三段式色散补偿方案,即:发送端预补偿,使用 DCF 光纤补偿 70% 链路色散;中继节点补偿,每 80 km 部署色散补偿模块(DCM);接收端后补偿,通过电子色散补偿(EDC)芯片调整剩余色散。在合肥—芜湖段实际测试中,100 Gbit/s 信号经过 240 km 传输后, Q 值达到 12.3 dB,满足了 FEC 纠错门限要求。

2.2.3 光单元优化设计

通过 OPGW 复合方案使光的传输能力和架空地线防雷功能协调地融合为一体,使光缆的传输能力和机械强度有机地统一。光单元设计采用中心束管式结构,288 芯光纤为 12 个束管,24 芯光纤/束管,用填充防水化合物和聚乙烯护套起双重保护。机械强韧设计方面,所使用的铝包钢绞线提供 120 kN 拉力,符合 500 kV 级超高压线路的机械承载要求,并根据优化设计导线截面达到 240 mm²,以控制接地电阻值在定值范围内。热稳定设计考虑 -40~70 $^{\circ}\text{C}$ 工作温度,极端温度下光纤的附加衰减为 0.05 dB/km 以内。而且,光缆的护套结构为聚乙烯外护套+铝带纵包,提供良好的防潮和机械保护作用,护套厚度控制为 2.0 mm,满足 20a 的设计使用年限内的可靠性。

2.2.4 信号质量保障优化

光功率预算技术通过合理计算系统功率余量实现大跨距

的高质量传输,把发射光功率预算到 +5 dBm,接收灵敏度预算到 -28 dBm,系统功率预算 33 dB,系统能够轻松达到 2 000 km 跨距传输。链路损耗预算由光纤衰耗损耗、熔接损耗、连接器损耗、系统余量等四部分组成,其中光纤衰耗损耗按照光纤衰耗损耗 0.19 dB/km、熔接损耗按照 0.01 dB/个、连接器损耗按照 0.3 dB/个进行计算,系统余量按照大于 3 dB 以上考虑。光信噪比优化技术通过对 OSNR 控制在 28 dB 以上,实现误码率达到 10⁻¹² 以下的电信级要求。此外,相位噪声控制技术通过对激光器的线宽优化和相位锁定环路的控制,实现激光器线宽 $\leq 100 \text{ kHz}$ 和使用基波混频方案,本振信号的相位噪声功率谱密度低于 -120 dBc/Hz@10 kHz 偏移量。时钟恢复技术则通过对锁相环及时钟数据恢复电路的设计,实现时钟精度达到 $\pm 20 \times 10^{-6}$ 和抖动控制在 0.1 UI 以内,满足高速数据传输的精度要求。

2.3 AI 智能运维平台搭建

本文提出了一种融合长短期记忆网络(LSTM)与支持向量机(SVM)的混合时序预测框架,通过整合两种算法的互补特性提升设备故障预警精度,该模型工作流程如图 3 所示。



图 3 LSTM-SVM 混合预测模型工作流程

其创新性地结合 LSTM 在序列建模中的时序依赖捕捉能力与 SVM 在小样本非线性映射中的优势,形成端到端的预测系统。在面对复杂、高维、非线性数据时往往难以取得理想效果。近年来,深度学习技术在故障诊断领域取得了显著进展,尤其是融合长短期记忆网络(LSTM)与支持向量机(SVM)等模型在处理时序数据方面展现出优势,为构建更精准、高效的故障诊断系统,通过构建深度特征融合模型,实现 AI 智能运维大平台。AI 智能运维平台集成 LSTM 神经网络,对光功率、误码率等 12 项指标实时监测,提前 72 h 预警;基于强化学习的路径重路由算法可以实现在线自愈优化,自动巡检并发现故障后 5 s 内计算备选路径,10 s 内完成业务切换^[8]。

3 性能测试与效益评估

3.1 性能测试

实施改造后,技术团队对网络开展了详细的测试检验工作,测试指标主要涉及网络带宽、网络时延、误码率、保护倒换等项目,其中网络带宽测试显示,在安徽电网实际应用性能测试数据前后对比分析,如表 1 所示。省干网实际可达带宽为 95 Gbit/s,地市汇聚网络实际可达带宽为 38 Gbit/s,县区接入网络实际可达带宽为 9.5 Gbit/s,均能够实现设计带

宽值的 95% 以上；时延测试使用的是高精度时延测试工具，显示省干网的端到端时延为 1.8 ms，地市汇聚网的端到端时延为 2.3 ms，县区接入网的端到端时延为 2.5 ms，均达到电力业务时延标准；误码率测试采用了 72 h 不间断测试流程，全程各链路的误码率均优于 10^{-12} ，达到电信级网络的质量可靠性的要求；保护倒换功能测试主要采用模拟故障的手段，显示线路保护倒换时延 35 ms，子网保护倒换时延 48 ms，均满足电力业务不间断传递的要求。

表 1 改造前后网络性能对比数据

性能指标	改造前	改造后	提升幅度 /%
主干网带宽	10 Gbit/s	100 Gbit/s	900
汇聚网带宽	2.5 Gbit/s	40 Gbit/s	1 500
端到端时延	8.5 ms	2.3 ms	72.9
网络可用性	99.95%	99.99%	0.049
故障恢复时间	15 min	50 ms	99.97
链路利用率	78%	35%	55.1

网络可靠性方面，从历史故障数据统计结果来看，改造后网络平均故障间隔时间（MTBF）从 2 200 h 提升到 8 760 h，平均故障恢复时间（MTTR）从 4.5 h 下降到 0.5 h，全年故障停机时间从 4.38 h 减少到 5.26 min，根据电力通信网络可靠性计算模型，网络系统可用性 A 可用公式表示为：

$$A = (\text{MTBF})/(\text{MTBF}+\text{MTTR})\times 100\% \tag{1}$$

式中：MTBF 为平均故障间隔时间；MTTR 为平均故障修复时间。

改造前： $A_1 = 2200/(2200 + 4.5) \times 100\% = 99.796\%$ ，

改造后： $A_2 = 8760/(8760 + 0.5) \times 100\% = 99.994\%$ ，

可用性提升 $\Delta A = A_2 - A_1 = 0.198\%$ ，

上述计算结果与实际测试数据基本吻合，验证了改造工程在网络可靠性提升方面的技术效果。

3.2 效益评估

投入运行以来其经济效益表现良好，据统计投资约 2.8 亿元。其中设备费用约为 1.9 亿元，光缆费用约 0.6 亿元，工程费用约 0.3 亿元；运营及损耗每年可减少约 3 200 万元，故障每年可减少约 1 800 万元；还同时支撑了各类电力业务的良好发展，每年可间接收益约 8 000 万元，投资回收期在 5~6 年，满足电力企业投资回收的预期。对网改项目经济效益来说，主要有三方面的效果。一是 OTN 的设备高度集成减少了设备数量，节约了机房的空间和用电量；二是对网络进行优化，采用 SDN 技术实现网络自动化集中管控，运维人员能够高效完成网络的操作；三是光纤网络优化后，故障率大幅下降，运维的费用明显减少。对网络运营、维护带来的效益方面主要是网络性能的提升带动的间接经济效益，例如

电网调度的提高、提高电能的管理水平、提高对清洁能源消纳等方面。

4 结语

电力通信网作为电力数字化的核心，面对电力数字化的需求进行现代化升级改造是必然趋势。本案改造后通过 OTN-SDN 融合架构、四维光纤优化及 AI 智能运维三大创新，实现电力通信网络性能跨越式提升。通信系统整体带宽、时延、可靠性等性能上均取得了大幅提升，其中年故障停机仅 5.26 min，且计算模型推导其可用性达 99.99%，而且改造的项目运营后整体经济效益高，符合投资回收的预期。展望未来，可在此基础上深化动态网络切片技术与光纤四维优化模型，为电力通信网数字化转型提供了可复制的创新范式，对构建新型电力系统具有重要参考价值。

参考文献：

- [1] 李明洋, 张利军. 电力光传输网可靠性评估方法研究 [J]. 中国新通信, 2015, 17(23): 1-2.
- [2] 周莉明. 电力通信 SDH 光传输网网络优化 [J]. 云南电力技术, 2020(5): 56-58.
- [3] 马宏伟, 李忠财, 董志. 电力企业无纸化智能实操考评系统构建策略 [J]. 上海企业, 2023(12): 46-48.
- [4] 童霞. 电力企业智能财务转型探究 [J]. 中国电力企业管理, 2024(24): 68-69.
- [5] 庄莉. 电力企业数字化转型技术研究及应用 [J]. 中国新通信, 2021, 23(1): 127-128.
- [6] 吴流丽, 廖建华, 汪文晓, 等. 光传输网安全风险分析及防御技术研究 [J]. 信息安全与通信保密, 2023(10): 60-66.
- [7] 吴越, 常倩, 张庚, 等. 电力通信 SDH 光传输网仿真及规划应用 [J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(9): 187-192.
- [8] 李莉, 王文韬, 彭柏, 等. 基于汇聚业务模型的电力通信网节点带宽估算方法 [J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(3): 73-77.

【作者简介】

王剑（1982—），男，安徽滁州人，本科，高级工程师，研究方向：电力通信网规划建设、运维管理以及新型电力系统建设等。

（收稿日期：2025-07-30 修回日期：2026-02-12）