

全面监控下厂站主辅业务信息流时效性研究

周正¹ 陈晨¹ 王松¹ 宋晓帆^{1,2}

1 国网河南省电力公司经济技术研究院 郑州 450000

2 重庆大学电气学院 重庆 400044

摘要 为解决全面监控下厂站主辅业务信息流时效性问题,构建厂站主辅业务信息流拓扑模型,将信源节点、网络节点和宿节点抽象为信息流的传输结构,并利用物理连接矩阵和虚拟连接矩阵表征各节点间的物理和逻辑连接状态。在断路器失灵、网络传输、一键顺控和主辅联动4种典型业务场景下,定量分析信息流传输路径和延迟特性,识别在多发情况下的路径瓶颈和优化需求。结果表明,不同业务流在交换机端口的竞争导致延迟显著增加,特别是高间隔数场景下,路径时延呈现递增趋势。因此,合理优化网络拓扑和配置优先级调度策略可显著改善主辅业务的信息流传输效率。

关键词: 全面监控;厂站主辅业务;信息流时效性;拓扑模型

中图分类号 TP39;TM63

Research on Timeliness of Information Flow of Main and Auxiliary Business of Plant and Station Under Comprehensive Monitoring

ZHOU Zheng¹, CHEN Chen¹, WANG Song¹ and SONG Xiaofan^{1,2}

1 State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450000, China

2 School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract In order to solve the problem of timeliness of the information flow of main and auxiliary services of plant and station under comprehensive monitoring, the topological model of the information flow of the main and auxiliary services of the plant and station is constructed, the source node, the network node and the host node are abstracted into the transmission structure of the information flow, and the physical connection matrix and the virtual connection matrix are used to represent the physical and logical connection states between the nodes. In four typical business scenarios: circuit breaker failure, network transmission, one-key sequential control, and active and auxiliary linkage, the information flow transmission path and delay characteristics are quantitatively analyzed, and the path bottleneck and optimization requirements in the case of multiple events are identified. The results show that the delay of different service flows increases significantly due to the competition of switch ports, especially in the scenario of high interval number, the path delay shows an increasing trend. Therefore, it is concluded that reasonable optimization of network topology and configuration of priority scheduling strategies can significantly improve the information flow transmission efficiency of primary and secondary services.

Keywords Comprehensive monitoring, Main and auxiliary services of factories and stations, Timeliness of information flow, Topological model

近年来,随着电网规模的不断扩大和智能化水平的提高,电力系统的复杂性日益增加,厂站主辅设备的信息流传输需求显著增长,且监控要求更加严苛。传统电力系统的信息监控模式主要依赖分散的设备管理和区域监控方法,因而在数据采集、信息传输以及系统响应时间上存在较大局限性。尤其在多业务场景下,各类数据在传输过程中会因带宽分配和传输路径优化不足而产生延迟累积,严重影响厂站监控的实时性和稳定性。当前,集控站模式^[1]、厂级监控信息系统^[2]、智能运维监控^[3]等模式的全面监控技术不断发展,支撑解决设备监控信息覆盖不全、远方监控信息不足、设备数据利用不够、辅助设备监控缺位等问题。随着设备全面监控新业务场

景的信息资源爆发式增长,业务流数据量与传输网络的资源匹配矛盾日益显著,对厂站设备的可靠性和安全性^[4-8]提出了新的挑战。因此,优化厂站信息流的传输路径、提升信息流的实时响应能力,已成为当前电力系统研究的关键课题之一。

国内外学者在网络信息优化和资源分配方面进行了大量研究。文献[9]提出一种时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)技术,该技术的应用在一定程度上改善了工业以太网中的流量控制和实时传输性能。文献[10]通过模糊综合评价法构建了电力监控系统的网络可靠性评估模型,提出了一种基于数据流传输路径优化的方案,解决了部分设备网络连接的可靠性问题。文献[11]研究了可分配灵活资源的虚

基金项目:国网公司基金项目(5200-202324488A-3-2-ZN)

This work was supported by the State Grid(5200-202324488A-3-2-ZN).

通信作者:周正(nysjyc@163.com)

拟网络实例,提出了优先级分配方法。文献[12]提出了电力信息物理系统的信息流模型和计算方法,定量分析网络分布优化方案。文献[13]针对变电站 GOOSE 网络的时序性和适用性进行了分析,并利用消息认证码算法缩短网络传输时间。以上研究虽给出了一些解决思路,然而,大部分主要聚焦于网络数据流的实时传输,未能充分考虑厂站主辅业务信息流在复杂业务场景中的综合性能,且现有研究缺乏对厂站信息流拓扑的系统性分析,未能有效解决多路径竞争带来的延迟累积问题。针对厂站监控的需求,迫切需要一种兼顾可靠性、时效性与资源高效分配的全新方法。

鉴于此,本文提出了厂站主辅业务信息流时效性分析方法,构建信息流的拓扑模型,进而计算不同业务流的时效性。通过对不同场景下主辅业务信息流的传输时延特性进行定量分析,探讨了设备层和网络层的交互机制及优化策略,为全面监控的智能化厂站提供了数据支撑和技术依据。

1 主辅业务信息流时效性

1.1 主辅业务拓扑模型

厂站主辅业务系统是 与电力生产、输送、变换和控制直接

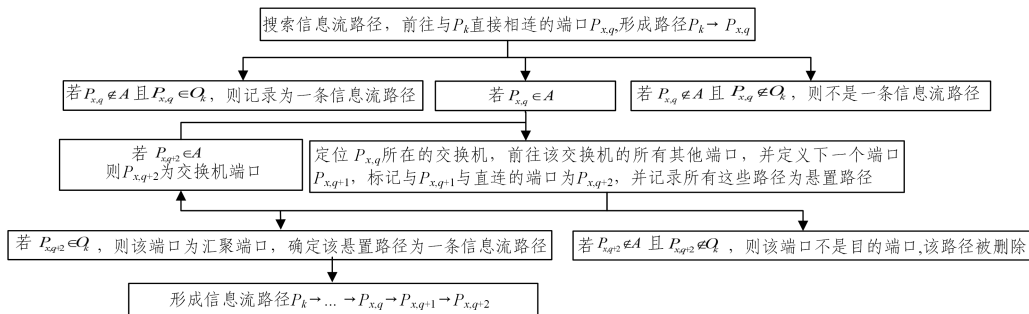


图 1 主辅业务信息流拓扑模型构建图

Fig. 1 Construction diagram of the topology model of information flow for main and auxiliary services

1.2 业务信息流路径

变电站主辅业务的信息流主要包括保护控制、状态监测、故障记录等关键任务,这些任务需要在变电站通信网络中高效传输。在变电站通信网络中,各主辅业务的信息流路径可以通过网络端口连接拓扑图来表示,通过主辅业务拓扑模型信息流的搜索路径计算方法可以得到设备端口连接关系图,图 2 为变电站主辅业务流中安全 II/IV 区设备端口的部分连接关系图。该图展示了不同设备之间的典型信息流路径,例如,对采集的一次设备在线监测信息如何上传到综合应用主机中进行分析,其路径为:一次设备检测终端(28)一辅助网络交换机接收端口(13)一辅助网络交换机输出端口(11)一 220kV 站控层 II 区 C 网中心交换机接收端口(6)一 220kV 站控层 II 区 C 网中心交换机输出端口(930)一综合应用主机(61)。

这些路径通过网络中的交换机和路由器连接,形成了完整的信息流传输路径。另外,通过“直采直跳”方式传送数据的信息流不经过网络,其路径可以直接根据信息交互关系得到。由此可以得到业务流路径如表 1 所列。

表 1 用于描述和记录在变电站通信网络中,各类主辅业务信息流的具体传输路径,并详细记录了从源节点到目的节点的传输路径,包括经过的节点和使用的端口,可转换为用于计算的路径矩阵。

相关的核心业务系统。其用于传输、诊断和监测电网的实时运行状态等,如对变压器、发电机、开关等核心设备运行工况,对继电保护、自动化装置等用于保障设备稳定和安全的二次设备,以及环境监控、视频监控等辅助设备实时监测及进行数据传输。

将主辅业务中二次系统的设备抽象为信源节点、网络节点和信宿节点,业务信息流的传输路径可以通过拓扑模型加以描述,路径由信源节点(传感器、监测设备)发出信息,经过网络节点(交换机和路由器等),最终到达信宿节点(控制设备、监测终端等)。

将业务通信网络中的所有源端设备和目的端设备的端口进行编号,统一为 P_1, P_2, \dots, P_n ; 将中间交换机的节点定义为 SW_1, SW_2, \dots, SW_n ; 将集合 A 定义为交换机所有端口的汇集函数。这样,所有主辅业务中从源端节点到汇集节点间的对应关系可以明确表达,即源端端口 P_k 的对应汇集节点在集合 O_k 中。当找到路径 $P_k - P_{x,q}$ 时,可以进一步搜索下一个节点 $P_{x,q+1}$, 依此类推,直到路径汇聚。那么,一条从源端端口 P_k 到达目的端口 $P_{x,q}$ 的搜索路径如图 1 所示。

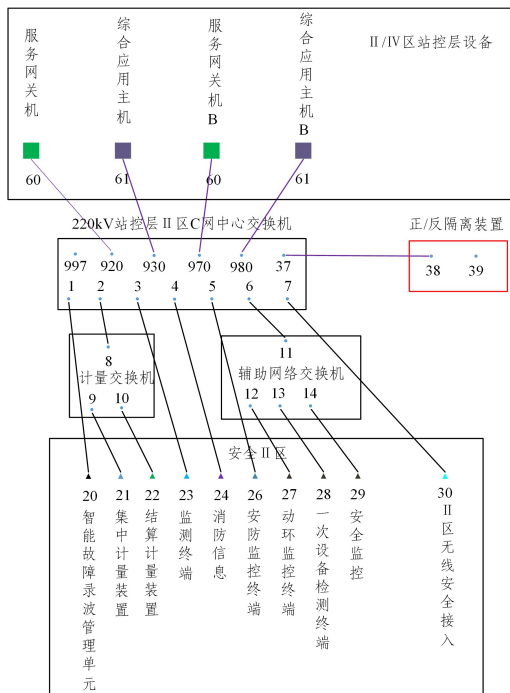


图 2 安全 II/IV 区设备端口部分连接关系图

Fig. 2 Connection diagram of the device port section in the security area II/IV

表1 安全 II/IV 信息流路径

Table 1 Security II/IV information flow path

信息交互关系	信息流路径	报文类型
一次设备在线监测→服务网关机 A	28→13→11→6→920→60	DLT860
一次设备在线监测→综合应用主机 A	28→13→11→6→930→61	DLT860
消防信息传输控制单元→服务网关机 A	24→4→920→60	DLT860
消防信息传输控制单元→综合应用主机 A	24→4→930→61	DLT860
安防监控终端→服务网关机 A	26→5→920→60	DLT860
安防监控终端→综合应用主机 A	26→5→930→61	DLT860
动环监控终端→服务网关机 A	27→12→11→6→920→60	DLT860
动环监控终端→综合应用主机 A	27→12→11→6→930→61	DLT860
无线安全接入→服务网关机 A	30→7→920→60	DLT860
无线安全接入→综合应用主机 A	30→7→930→61	DLT860
服务网关机 A→一次设备在线监测	60→920→6→11→13→28	DLT860
综合应用主机 A→一次设备在线监测	61→930→6→11→13→28	DLT860
服务网关机 A→消防信息传输控制单元	60→920→4→24	DLT860
综合应用主机 A→消防信息传输控制单元	61→930→4→24	DLT860
服务网关机 A→安防监控终端	60→920→5→26	DLT860
综合应用主机 A→安防监控终端	61→930→5→26	DLT860

1.3 信息流路径矩阵

通过业务信息流的具体节点和传输路径可以建立矩阵运算模型。在路径矩阵中,矩阵的行和列分别表示网络中的端口或节点,而矩阵元素的值表示路径的连接状态。

本文构建的路径矩阵分别为物理连接矩阵 \mathbf{P} 和虚拟连接矩阵 \mathbf{V} 。

其中 \mathbf{P} 表示网络中各端口之间的物理连接状态,如果端口 i 和端口 j 之间有直接的物理连接,则:

$$P_{ij}=1, \text{ 否则 } P_{ij}=0 \quad (1)$$

\mathbf{V} 表示网络中各节点之间的逻辑连接状态,例如,交换机内部的端口连接可以通过虚拟连接矩阵来表示。如果端口 i 和端口 j 之间存在逻辑连接,则:

$$V_{ij}=1, \text{ 否则 } V_{ij}=0 \quad (2)$$

那么,通过递推的方法可以从初始状态推导出完整的路径矩阵。路径矩阵 \mathbf{R} 的初始状态 $R(0)$ 由信息流的源节点注入网络时的状态决定。其信息流路径矩阵的递推为:

$$R(1)=-\mathbf{R}(0) \times \mathbf{P} \quad (3)$$

$$R(2k)=-\mathbf{R}(2k-1) \times \mathbf{V}, k=1, 2, \dots \quad (4)$$

$$R(2k+1)=-\mathbf{R}(2k) \times \mathbf{P}, k=1, 2, \dots \quad (5)$$

其中,矩阵元素的正负号分别表示信息流的输入和输出。

1.4 主辅业务等效信息流速

在得到路径矩阵后,可基于网络演算理论的等效流速计算对路径矩阵进行赋值,从而建立主辅业务信息流速计算矩阵模型。

在基于网络演算的模型中,等效流速的计算模型是通过综合考虑非抢占式优先级策略和先进先出(FIFO)策略对数据流的影响来确定的。具体而言,等效流速的计算反映了在不同优先级数据流的排队和服务过程中的带宽分配情况。

首先,对于非抢占式优先级策略,数据流根据其优先级被分类并按照优先级高低进行服务,因此在等效流速的计算中需要考虑优先级数据流对低优先级数据流的压制效应。另外,最大突发长度和到达速率共同决定了数据流在短时间内可能对系统资源产生的瞬时需求,等效流速的计算需综合考虑两者,以便准确估计流量对系统的压力。假设交换机端口 j 的额定带宽为 C_j ,在端口输出的所有数据流中,高于数据流 i 的子集最大突发长度和到达速率分别为 B_{hi} 和 R_{hi} 。同样地,与数据流 i 具有相同优先级的子集的最大突发长度和到达速

率之和分别为 B_{ci} 和 R_{ci} 。

在这种情况下,数据流 i 的等效流速 S_{eq} 可以通过式(6)计算:

$$S_{eq} = \frac{C_j - \sum_{k=1}^n R_{hk}}{1 + \frac{\sum_{k=1}^n B_{ck}}{C_j}} \quad (6)$$

其中, C_j 是交换机端口的额定带宽; $\sum_{k=1}^n R_{hk}$ 是端口 j 输出的所有优先级高于数据流 i 的子集中数据流的到达速率之和; $\sum_{k=1}^n B_{ck}$ 是端口 j 输出的所有优先级与数据流 i 相同的子集中数据流的最大突发长度之和。

这种计算方法考虑了不同优先级的数据流在相同端口上的竞争关系,以及相同优先级数据流的累计突发长度对端口带宽的占用情况。进一步地,数据流 i 的路径等效流速 S_{path} 可以通过将每条路径上的所有端口的等效流速相乘得到,即:

$$S_{path} = \min_{j \in path} (S_{eq}(j)) \quad (7)$$

其中, j 为路径上的每个端口,路径等效流速是该路径上所有端口等效流速中的最小值。

这个最小值反映了路径中最慢的端口对数据流的限制,从而决定了整个路径的传输能力。

1.5 业务流路径时延

路径时延是指数据流从源节点到达目的节点的总传输时间,该时延由多个因素决定,包括数据在各个交换机端口的排队时间、传输时延以及处理时延等。

假设将数据流 i 中数据包长度为 B_i 的数据量作为时延上界的考察对象,基于上述的等效流速计算,可以求解时延上界,得到交换机端口 j 对数据流 i 的时延上界计算式为:

$$D_{ij} = \frac{B_i}{S_{eq}}, 1 \leq i \leq l \quad (8)$$

同理,数据流 i 的路径时延上界计算式为:

$$D_{Li} = \frac{B_i}{S_{path}}, 1 \leq i \leq l \quad (9)$$

在变电站的主辅业务信息流中,时延计算对于保障系统的实时性和可靠性至关重要。变电站的通信网络承担了诸如保护控制、状态监测、故障记录等多种关键任务,因此准确计算这些信息流的时延对于保障系统稳定运行至关重要。

2 实例分析

本文的实例分析是基于变电站运行中典型场景下的时延性进行分析的,通过对断路器失灵、网络传输、一键顺控以及主辅联动 4 个场景进行分析,得出主辅业务信息流路径时延。

2.1 典型场景下业务流的时延上界

1) 断路器失灵场景

假设 220kV 线路 1 发生故障,此时 220kV 线路 1 保护装置 A 启动并采用“直采直跳”方式向 220kV 线路 1 采集执行单元 A 发送跳闸 GOOSE 报文,同时经过站控层网络向 220kV 母线保护装置 A 发送失灵启动开入 GOOSE 报文。

经过 150ms 后 220kV 母线保护装置 A 的失灵保护动作,采用“直采直跳”方式向与 I 母线连接的 220kV 线路 2,220kV 主变 1 以及 220kV 母联间隔的采集执行单元 A 发送跳闸 GOOSE 报文。上述 GOOSE 报文均为变位 GOOSE 报文,其最小发送间隔为 2ms。故障发生后经过 15s,220kV 线路 1 保护装置 A 及 220kV 母线保护装置 A 同时向主辅一体化监控主机 A、实时网关机 A 和录波管理单元上送故障录波文件。故障录波文件服务以 2ms 的时间间隔发送请求报文 5 次,请求包大小为 100B,响应包大小为 3500B。

根据上述业务场景的信息流情况,得到业务流路径时延计算结果如表 2 所列。

表 2 线路断路器失灵保护业务流路径时延

Table 2 Circuit breaker failure protection service flow path delay

信息交互关系	路径等效流速/Bps	路径时延/s
220kV 线路 1 保护装置 A→220kV 线路 1 采集执行单元 A	12500000	0.000024
220kV 线路 1 保护装置 A→220kV 母线保护装置 A	1294219.15	0.0002318
220kV 母线保护装置 A→220kV 线路 2 采集执行单元 A	12500000	0.000024
220kV 母线保护装置 A→220kV 主变 1 采集执行单元 A	12500000	0.000024
220kV 母线保护装置 A→220kV 母联采集执行单元 A	12500000	0.000024
220kV 线路 1 保护装置 A→主辅一体化监控主机 A	1736972.7	0.002015
220kV 母线保护装置 A→主辅一体化监控主机 A	1736972.7	0.002015
主辅一体化监控主机 A→220kV 线路 1 保护装置 A	609756.098	0.000164
主辅一体化监控主机 A→220kV 母线保护装置 A	303030.303	0.000330
220kV 线路 1 保护装置 A→实时网关机 A	1555222.52	0.0022504
220kV 母线保护装置 A→实时网关机 A	1555222.52	0.0022504
实时网关机 A→220kV 线路 1 保护装置 A	611073.01	0.0001636
实时网关机 A→220kV 母线保护装置 A	303280.16	0.0003297
220kV 线路 1 保护装置 A→录波管理单元	910745.44	0.000843
220kV 母线保护装置 A→录波管理单元	910745.44	0.000843
录波管理单元→220kV 线路 1 保护装置 A	427264.61	0.0002340
录波管理单元→220kV 母线保护装置 A	249919.67	0.0004001

2) 网络传输场景

在本场景中,假设间隔层各保护装置、测控装置以 1s 的时间间隔向站控层设备主辅一体化监控主机发送保护遥测信息(DLT860),测控装置以 10ms 的时间间隔向站控层实时网关机发送同步相量实时数据(PMU);各保护装置、测控装置以 5s 的时间间隔发送 GOOSE 报文。其中遥测信息报文大小为满足平均分布[100,1500]B 的统计值,同步相量实时数据报文大小为 136B,GOOSE 报文大小为 300B。

选取进行信息交互的间隔数分别为 4,8,22,40,具体情况如下:

当间隔数为 4 时,包括 220kV 线路 1—4 间隔;

当间隔数为 8 时,包括 220kV 线路 1—4 间隔、220kV 主变 1—2 间隔、220kV 母线间隔、220kV 母联间隔;

当间隔数为 22 时,包括 220kV 线路 1—4 间隔、220kV 主变 1—2 间隔、220kV 母线间隔、220kV 母联间隔、110kV 线路 1—12 间隔、110kV 分段间隔、110kV 母线间隔;

当间隔数为 40 时,包括 220kV 线路 1—4 间隔、220kV 主变 1—2 间隔、220kV 母线间隔、220kV 母联间隔、110kV 线路 1—12 间隔、110kV 分段间隔、110kV 母线间隔以及另外扩展的 18 个间隔。

根据上述业务场景的信息流情况,计算不同间隔数下业务流路径的最大时延,其结果如表 3 所列。

3) 一键顺控场景

在变电站一键顺控场景中,信息交互由变电站的主辅一体化监控主机发起,包含了模拟预演阶段操作票全过程防误

校验和操作执行阶段单步防误校验。在模拟预演时,主辅一体化监控主机给智能防误主机发送关于全部操作项目的预演指令。在本场景中,以 220kV 线路 1 的测控单元作为操作对象,主辅一体化监控主机先给智能防误主机发送单步防误校验请求,当防误校验成功后,智能防误主机将校验结果返回给主辅一体化监控主机。然后由主辅一体化监控主机发送执行指令到 220kV 线路 1 测控单元,220kV 线路 1 测控单元下达操作指令完成设备操作后,返回设备操作后状态变位信息至主辅一体化监控主机。

根据上述业务场景的信息流情况,得到业务流路径时延计算结果如表 4 所列。

4) 主辅联动场景

在配置文件阶段,安全 I 区的主辅一体化监控主机向安全 II 区的综合应用主机发送设备资源信息配置文件,文件大小设置为 300Bytes,发送 10 次。在配置文件转发阶段,综合应用主机经过正向隔离装置向安全 IV 区的在线智能巡视主机转发设备资源信息配置文件,文件大小为 300Bytes,发送 10 次。触发联动信号阶段,主辅一体化监控主机向综合应用主机发送联动请求包,请求包的大小为满足平均分布[200,1500]Bytes 的统计值。在视频联动信号阶段,综合应用主机向在线智能巡视主机发送视频联动信号。在辅助设备动作阶段,综合应用主机向辅助设备照明开关、安全闸门等发送操作指令,包的大小为满足平均分布[200,1500]Bytes 的统计值;辅助设备经过 0.5s 的请求处理时间后向综合应用主机返回动作结果响应包,包的大小为满足平均分布[200,1500]Bytes

的统计值。联动结果反馈阶段,其启动时间设置为辅助设备动作阶段完成后,综合应用主机向主辅一体化监控主机发送联动结果信息文件,文件大小为满足平均分布[200,1500] Bytes的统计值。在视频联动结果返回阶段,在线巡视主机向反向隔离装置发送结果文件,综合应用主机向反向隔离装置发送询问文件,反向隔离装置返回视频联动结果文件,综合应用主机向监控主机发送视频联动文件,包的大小均为满足平均分布[200,1500]的统计值。

根据上述业务场景的信息流情况,得到业务流路径时延计算结果如表5所列。

表3 测量数据上传场景业务流路径时延

Table 3 Delay in the service flow path during data upload scenario (ms)

信息交互	关系间隔数			
	4	8	22	40
保护装置→主辅一体化监控主机	2.04	3.96	7.32	15.96
测控装置→主辅一体化监控主机	1.60	3.09	6.45	12.93
测控装置→实时网关机	0.72	1.43	1.62	4.56
线路间隔保护装置→母线间隔保护装置	0.24	0.34	0.48	0.77
线路间隔测控装置→母线间隔测控装置	0.24	0.34	0.48	0.77

表4 220 kV线路测控单元一键顺控场景业务流路径时延

Table 4 220 kV line measurement and control unit one-click sequential control scenario service flow path delay

信息交互关系	路径时延 (ms)
主辅一体化监控主机A→智能防误主机(预演)	0.36
智能防误主机→主辅一体化监控主机A(预演)	5.64
主辅一体化监控主机A→智能防误主机(操作)	0.36
智能防误主机→主辅一体化监控主机A(操作)	5.64
主辅一体化监控主机A→220 kV线路1测控单元	0.48
220 kV线路1测控单元→主辅一体化监控主机A	6.81

表5 主辅联动场景业务流路径时延

Table 5 Service flow path delay in the main and auxiliary linkage scenarios

信息交互关系	路径时延 (ms)
主辅一体化监控主机A→综合应用主机A(配置文件)	1.08
综合应用主机A→在线智能巡视主机(配置文件转发)	0.96
主辅一体化监控主机A→综合应用主机A(触发联动信号)	1.08
综合应用主机A→在线智能巡视主机(视频联动信号)	0.96
综合应用主机A→辅助设备	0.24
辅助设备→综合应用主机A	0.6
综合应用主机A→主辅一体化监控主机A(联动结果信息)	0.84
在线智能巡视主机→反向隔离装置	0.24
综合应用主机A→反向隔离装置	0.48
反向隔离装置→综合应用主机A	0.6
综合应用主机A→主辅一体化监控主机A(视频联动文件)	0.84

2.2 典型场景下业务的时效性分析

根据表2—表5中的在典型业务场景下的业务流时延上界,对设备全面监控下各业务场景的时效性进行分析。

1) 断路器失灵场景

从表2可以看出:220 kV线路1保护装置→220 kV线路1采集单元的业务流采用的是“直采直跳”传输模式,不存在与其他业务流相互竞争的情况,因此当业务流中的报文大小不变时,其路径时延为恒定的 $24\mu\text{s}$,对比之下为本场景中业务流路径的最小值,说明该业务流路径的时效性最好。主辅一体化监控主机、实时网关机、录波管理单元→220 kV线

路1、母线保护装置的信息路径时延在 $[163.6, 400.1]\mu\text{s}$ 内,因为这些业务流都经过220 kV站控层C网中心交换机和220 kV站控层A网交换机,在交换机端口上存在多条报文排队竞争,使得该业务流路径时延增大,时效性一般。同样地,220 kV线路1、母线保护装置→主辅一体化监控主机、实时网关机、录波管理单元的业务流也经过220 kV站控层C网中心交换机和220 kV站控层A网交换机,但其路径时延最大,为2~3 ms,其原因一方面是相较于100 B的请求报文,3500 B的响应报文大得多,导致处理时延较大;另一方面是220 kV站控层C网中心交换机和220 kV站控层A网交换机的上行输出端口的业务流竞争情况比下行输出端口更加严峻,导致排队时延较大,因此这些业务流的时效性最差。总的来说,当线路发生故障时,线路所在的保护装置向外发送GOOSE报文的业务流传输过程最多需要0.23 ms;当失灵保护动作之后,母线间隔向与该母线连接的其他间隔的采集执行单元发送GOOSE报文的业务流传输过程最多需要 $24\mu\text{s}$;最后完成故障录波文件上送的业务流传输过程最多需要4.24 ms。

2) 网络传输场景

从表3可以看出:当将220 kV线路1—4间隔这4个间隔投入测量数据上送的场景中,线路1—4间隔保护装置→母线间隔保护装置和线路1—4间隔测控装置→母线间隔测控装置的业务流路径时延均为0.24 ms,原因在于该业务流路径较短,只经过一台交换机,并且业务流在汇入母线间隔保护装置和母线间隔测控装置的交换机端口互相竞争,产生排队时延,时效性较好。测控装置→实时网关机的PMU报文路径时延为0.72 ms,该传输路径经过两台交换机,在靠近测控装置的交换机输出端口上不仅存在与从不同间隔发出的PMU报文的竞争关系,还存在与从不同间隔发出的DLT860报文的竞争关系,因此时效性一般。保护装置→主辅一体化监控主机和测控装置→主辅一体化监控主机的业务流路径时延分别为2.04 ms,1.60 ms,其中前者的业务流路径最长,经过3台交换机,在前两台交换机的输出端口中只存在与从不同间隔发出的同种报文的竞争关系,在靠近主辅一体化监控主机的交换机输出端口中还存在与从不同间隔发出的PMU报文的竞争关系;相比于前者,后者经过的交换机数量较少,但在交换机输出端口的报文竞争情况更为严峻,因此两者的路径时延接近,时效性较差。同理,当投入到场景中的间隔数量为8,22,40时,也可以按照上述分析得到相同的结论。结果显示,随着间隔数的增加,业务流在交换机端口上的竞争变得激烈,建议针对高间隔数的场景,采用优先级调度算法和分流技术,提升信息流传输效率。

3) 一键顺控场景

从表4可以看出:以22个间隔投入测量数据上传场景作为背景,基于最恶劣的报文排队情况来计算,无论是在一键顺控的模拟预演阶段还是操作阶段,主辅一体化监控主机→智能防误主机的业务流路径时延均为0.36 ms,主辅一体化监控主机→220 kV线路1测控单元的业务流路径时延为0.48 ms,这3条业务流路径所经过的交换机输出端口不存在与其他报文互相竞争的情况,因此路径时延较小,时效性较好。在模拟预演阶段和操作阶段的智能防误主机→主辅一体化监控主机的业务流路径时延均为5.64 ms,220 kV线路1测控单元→主辅一体化监控主机的业务流路径时延为6.81

ms。与上面 3 条时延较好的业务流路径一样,这 3 条业务流路径经过相同数量的交换机和输出端口,但不同在于,它们所经过的交换机端口存在与测量数据上送场景的业务流相互竞争的情况,竞争最严重的输出端口上有 44 条测量数据上送业务流经过,这样一来导致计算的路径时延较大,从而时效性较差。总的来说,完成模拟预演阶段的业务流传输过程最多需要 6 ms,完成操作阶段中防误校验过程的业务流传输时间也最多为 6 ms,完成下发操作指令并返回设备操作后的状态定位信息的业务流传输过程最多需要 7.29 ms。

4) 主辅联动场景

从表 5 的计算路径时延可以看出:完成配置文件和配置文件转发过程最多需要 2.04 ms,同样地,完成触发视频联动信号的业务流传输过程也最多需要 2.04 ms。这是因为这两个过程的业务流路径相同,均为先从主辅一体化监控主机→综合应用主机,再从综合应用主机→在线智能巡视主机,并且这两条路径所经过的交换机端口较多,端口上的竞争情况较为严峻,导致该路径时延为本场景中所有路径时延的最大值,因此时效性较差。完成辅助设备动作阶段的业务流传输过程最多需要 0.84 ms,并且该阶段所包括的业务流路径仅经过一个交换机,使得业务流路径时延较小,时效性较好。视频联动结果反馈阶段包括 5 个业务流传输步骤,完成所需要的时间最多为 3 ms,平均每个业务流的路径时延为 0.6 ms,时效性一般。

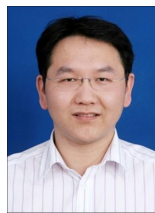
结束语 本文通过构建主辅业务信息流的拓扑模型,提出了一种基于网络演算的时效性分析方法,并对典型场景下的主辅业务信息流进行了时效性分析,研究结果表明,在不同的关键场景下,业务流的时延存在显著差异,特别当信息流经过交换机端口时,由于业务流的竞争,部分路径的时延显著增加。同时,随着间隔数的增加,业务流的传输时延呈现递增趋势,在主辅一体化监控和实时网关机的路径上,时延影响较为明显。在全面监控的背景下,为确保系统的可靠性和实时性,需进一步优化网络拓扑结构及信息流路由,并通过合理配置交换机和路由器的优先级策略,以显著改善时延表现。

参考文献

- [1] YAO Z Q, CHANG N C, DOU R, et al. Optimization of Data Stream Between Substation and Dispatching Adapting to Centralized Control[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4113-4121.
- [2] ZHANG X, XIAO P, GUO L J, et al. The Design and Application of the High Available Network of Supervisor Information System[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(10): 35-41, 70.
- [3] SONG B, PENG W J, CHEN S. Design and Implementation of

Intelligent Maintenance Management and Monitoring System Based on BIM[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(4): 28-33.

- [4] LI X S, CHANG G H, SU S, et al. Review and prospect on cyber threat indicators of substation monitoring system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 1-10.
- [5] FENG C J, ZHU J, ZHU Y, et al. Unified Management Architecture and Practice of Power Monitoring Network Security Equipment[J]. Journal of Information Security Research, 2024, 10(5): 481-488.
- [6] DU Q W, XU H Q, ZHENG X, et al. Defense Strategy Design for Electric Power Monitoring System Under Malicious Network Attacks[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(1): 185-192.
- [7] CAO X M, ZHANG H B, YE S S, et al. Security Access Protocol of Power Monitoring Network Based on ECC Algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(1): 60-65.
- [8] WANG B, HAN J F, LI Y, et al. Research on Power Grid Security Early Warning Technology Based on Intelligent Monitoring Platform[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 33-38.
- [9] SEOL Y, HYEON D, MIN J H, et al. Timely survey of time sensitive networking: past and future directions[J] IEEE Access, 2021, 9: 142506-142527.
- [10] BING Y A, WANG W T, SUN S Z, et al. Network Reliability Analysis of Power Monitoring System Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Computer Science, 2023, 50(S1): 784-790.
- [11] WANG Z N, ZHANG J, HUANG T. Determining delay bounds for a chain of virtual network functions using network calculus [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2550-2553.
- [12] HER W, LONG L, ZHANG B R, et al. Cyber System Physicalizing Modeling and Analysis Method in Cyber-physical Power Systems[C]//Proceedings of the CSEE. 2024: 72-85.
- [13] HUSSAIN S M S, FAROOQ S M, USTUN T S. A method for achieving confidentiality and integrity in IEC 61850 GOOSE messages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2565-2567.



ZHOU Zheng, born in 1983, postgraduate. His main research interest is power systems and automation.