

提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术

王海柱¹, 蔡泽祥¹, 张延旭¹, 邵向潮¹, 李一泉², 竹之涵³

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600;

3. 广州思唯奇计算机科技有限公司, 广东 广州 510665)

摘要:首先基于 OPNET 仿真平台, 从传输时延抖动、丢包以及传输路径等角度, 分析了通用交换技术应用于智能变电站信息交换时存在的不足。然后从满足智能变电站信息流的实时性和可靠性需求出发, 提出了定质交换实现技术。该技术基于多协议标签交换(MPLS)的多级子队列实现报文的分层调度, 基于区域划分实现动态缓存分配, 基于路径消耗为报文提供多种路径选择。最后结合实际智能变电站, 在 OPNET 平台上构建了共网传输场景下的定质交换模型, 仿真结果说明了所提定质交换技术能够合理地分配交换资源, 是可行和有效的。

关键词: 智能变电站; 定质交换; 信息流; 实时性; 可靠性; 通信

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.025

0 引言

智能变电站将数据信息的采集、传输和应用分离, 实现了网络化传输与信息共享, 构建了智能电网的统一数据信息平台。信息网络化传输使得网络信息流成为了继电保护、监控等应用系统实现的载体, 其实时性、可靠性^[1-2]直接决定了电力系统保护控制决策的有效性。由于对通信网络的可依赖性存在不确定因素, 目前智能变电站保护控制系统在很大程度上仍沿用传统的设计思路, 如继电保护仍采用“直采直跳”模式, 以保证电网第一道防线的安全可靠。因此, 通信网络信息流的实时性、可靠性已成为智能变电站提升保护控制系统性能的瓶颈。

交换机作为通信网络的核心是信息流处理与转发的枢纽, 是影响信息流实时性与可靠性的关键因素^[3]。目前, 智能变电站中采用的是从通信领域中引入的通用交换技术, 采用优先级排队机制、VLAN 以及最短路径消耗的生成树协议等分配传输路径, 其基本原理是各类业务信息流的“公平竞争”、交换过程的“尽力而为”^[4-6]。然而, 智能变电站各类业务的信息流具有其明显的特征, 其实时性、可靠性的要求也有很大差异, 在这种“尽力而为”的通用交换技术原理下, 对于继电保护等业务信息流的实时性和可靠性的较高要求是否能得到充分响应是个值得关注的问题。

本文结合智能变电站各类业务信息流的特点, 提出了面向其信息流实时性与可靠性特定要求的定

质交换(Custom Switching)^[7-9]概念。所谓定质交换, 是指通过多协议标签交换 MPLS(Multiple Protocol Label Switching)^[10]技术实现信息流的类型识别, 通过确定队列调度和动态缓存分配实现信息流的传输资源配置, 通过多路选择的传输路径实现信息流最优路径选择, 从而保证智能变电站各类业务信息流实时性、可靠性的差异化需求, 提升智能变电站保护控制系统的性能与可靠性。

本文分析了智能变电站不同类型信息流的实时性、可靠性要求, 揭示了当前通用交换技术存在的问题, 并从智能变电站信息流的实时性和可靠性出发, 从基于多级子队列的确定性队列调度、动态缓存分配以及多路报文传输路径^[11-13]3个方面给出了定质交换技术的实现方法, 并通过在 OPNET 中构建定质交换模型, 结合实际智能变电站算例, 定量分析了定质交换的可行性及其对提升智能变电站通信网络的实时性、可靠性的作用。

1 智能变电站信息流性能要求分析

在信息网络化传输环境下, 智能变电站各项业务功能的实现以信息流为载体, 电压、电流采样值(SV)体现为 SV 信息流, 开关位置信息、跳闸信号、闭锁信号等体现为 GOOSE 信息流, 继电保护定值召唤、修改等体现为 MMS 信息流等。因此, 信息流的实时性、可靠性直接影响着各业务功能的实现。根据信息流实现的功能不同、性能要求不同, 可以将其分为 7 类, 如表 1 所示。表中, P_1 指应用于配电线路间隔或其他要求较低间隔的信息流; P_2 指应用于输电线路间隔或用户未另外规定地方的信息流; P_3 指用

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2014-03-17

基金项目: 广东省科技计划项目(2010B010900028)

Project supported by the Science and Technology Plan of Guangdong Province(2010B010900028)

表 1 信息流分类
Tab.1 Classification of information flow

类型	性能要求
快速信息流	类型 A $P_1<10\text{ ms}, P_2\text{ 或 }P_3<3\text{ ms}$, 不丢包 类型 B $P_1\leq 100\text{ ms}, P_2\text{ 或 }P_3<20\text{ ms}$, 不丢包
中速信息流	$<100\text{ ms}$, 不丢包或丢包重传
低速信息流	$<500\text{ ms}$, 丢包重传
原始数据信息流	$P_1<10\text{ ms}, P_2\text{ 或 }P_3<3\text{ ms}$, 不丢包
文件传输功能信息流	可以等于或超过 $1\ 000\text{ ms}$, 丢包重传
访问控制命令信息流	$<500\text{ ms}$
时间同步信息流	最高对时精度要求为 $1\ \mu\text{s}$

于输电线间隔,应具备满足同步和断路器分合时间差最好性能的信息流。

可见,不同类型的信息流在性能要求方面有着很大的区别,但是目前应用于智能变电站的通用交换技术并没有充分地将不同类型的信息流进行区分,可能因网络拥塞而造成关键信息流超时或丢失。

2 智能变电站通用交换技术存在的问题

信息流的实时性和可靠性体现为传输延时应保证在所要求的时间范围内,且不发生丢包或发生丢包时重传。目前,智能变电站普遍采用的通用交换技术对不同类型信息流提供的服务差异性不强,难以在网络拥塞、广播风暴等恶劣情况下保证关键信息流的实时性和可靠性,造成传输延时抖动和丢包等问题^[14-15],这也是继电保护等应用系统对数据信息网络化传输缺乏信赖的根本原因。

本文基于 OPNET 仿真平台,建立了智能变电站信息流网络传输全过程的仿真模型,包括信息流通信规约 IEC61850、交换设备及其调度策略、保护监控设备 IED 等,并以实际智能变电站为背景,分析了通用交换技术及其对智能变电站通信网络实时性、可靠性的影响。

2.1 队列资源竞争引发时延抖动

若报文 k 的传输路径由 m 个交换机和 n 条链路构成,则传输时延 t 为:

$$t = \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) + \sum_{j=1}^n \eta_j \tag{1}$$

其中, η_j 为光纤链路 j 的传输时延,信息流在光纤中的传输速度为光速的 $2/3$,因此光纤传输时延由光纤长度决定; γ_i 为交换机 i 的交换时延,即协议解析、地址表查找等消耗的时间,与交换芯片处理能力相关,一般不超过 $10\ \mu\text{s}$; β_i 为交换机 i 的报文转发时延,数值上等于帧长与交换机存储转发速率的比值; α_i 为交换机 i 的排队时延,指报文在交换机队列内排队等候处理的时间。对于 α_i ,有:

$$\alpha_i = l_k / v \tag{2}$$

其中, l_k 为队列中位于报文 k 前等候处理的报文长度; v 为报文转发速率。

可见,对于一个确定的网络,除了交换机排队时延受网络信息流实时流量影响之外,其他 3 类时延均相对固定。则报文 k 的传输时延抖动 Δt 为:

$$\Delta t = \sum_{i=1}^m (l''_{ki} - l'_i) / v \tag{3}$$

其中, l'_i 和 l''_i 分别为交换机 i 前、后 2 次传输报文 k 时在队列中优先于报文 k 等待处理的其他报文长度。

通用交换技术采用基于优先级的端口服务单队列调度策略,即通过识别报文优先级并为高优先级报文提供优先服务的方式,尽可能保证其服务质量。由式(3)可知,若某时刻某端口中优先级与关键报文 k 相同或更高的扰动报文 h 由于某种原因流量增加,占用了更多的队列资源,则关键报文 k 的时延也会相应增加,从而产生时延抖动。

下面根据扰动报文 h 流量增加的方式不同,设置了 3 种排队时延抖动仿真场景。基于 OPNET 的仿真拓扑如图 1 所示。图 1 中,设备 D_1 发送报文 k , D_2 发送报文 h , D_3 为报文接收装置,仿真结果如图 2 所示,图中只显示了排队时延抖动情况。

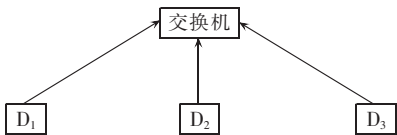


图 1 OPNET 仿真拓扑
Fig.1 Simulation topology of OPNET

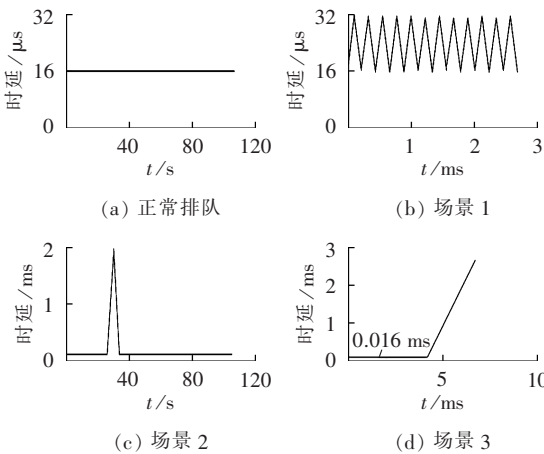


图 2 报文排队的时延抖动
Fig.2 Delay jitter of packet queuing

场景 1: 由于某种原因端口中增加了一路优先级与关键报文 k (长度为 200 Byte, 发送频率为 4 000 p/s, 即每秒 4 000 个数据包) 相同的扰动报文 h (长度为 200 Byte, 发送频率为 8 000 p/s), 呈周期性且幅度不大。由图 2(b) 可见, 报文 k 的排队时延从 $16\ \mu\text{s}$ 增加到最高为 $32\ \mu\text{s}$, 增加幅度较小, 对报文的实时性影响不大。

场景 2: 通信网络中出现间歇性扰动源 (如错误

报文、网络攻击的伪装报文等)突发与关键报文 k 优先级相同的报文 h , 长度为 2 000 Byte, 短时间内突发 100 帧。如图 2(c)所示, 关键报文 k 的排队时延由原来的 0.016 ms 剧增至 2.016 ms。若以时延小于 3 ms 作为实时性要求, 则仅排队时延就占用了时延裕度的 70% 左右, 对实时性的影响较大。

场景 3: 网络故障(如广播风暴等)引发大量无用报文在端口队列中不断积压。如图 2(d)所示, 报文 k 的时延线性增长, 约在 8 ms 时, 仅排队时延就已超过 3 ms 的实时性要求。

通过以上 3 个场景的仿真可知, 通用交换技术无法在报文 h 流量突然剧增的情况下仍能保证报文 k 的实时性, 原因主要有以下 3 点:

- a. 端口识别报文优先级, 却无法区分报文的类型(SV、GOOSE 或 MMS)和业务内涵(保护或测控);
 - b. 由于报文分类(SV/GOOSE/MMS)粒度过粗和缺乏对报文的识别能力, 只能根据优先级高低调度报文, 无法根据实时性能要求对各类报文精细调配传输资源, 对报文进行分层调度;
 - c. 对流经端口的报文欠缺解析能力, 无法识别、排除和控制错误报文、突发报文等扰动报文。
- 因此, 关键报文 k 的传输时延难以确保。

2.2 缓存不足引发丢包

设交换机的缓存大小为 L , 被端口队列报文占用的缓存大小为 L_{used} , 则可用的缓存大小为:

$$L_{left} = L - L_{used} \tag{4}$$

$$L_{used} = \sum_{g=1}^N l_g \tag{5}$$

其中, l_g 为端口 g 的队列缓存区中的报文长度; N 为端口数量。

采用通用交换技术情况下, 关键报文 k 进入端口队列和其他端口队列报文共享交换机缓存。在网络出现拥塞、故障或者扰动源时, 缓存区被其他报文占用, 报文 k 将因缓存不足而被丢弃。

智能变电站交换机缓存区被占用而发生丢包的典型场景如图 3 所示。IED 通过间隔交换机 switch1 的级联端口与本间隔 IED 交互信息, 经中心交换机 switch0 的汇聚端口与跨间隔 IED 互通。若

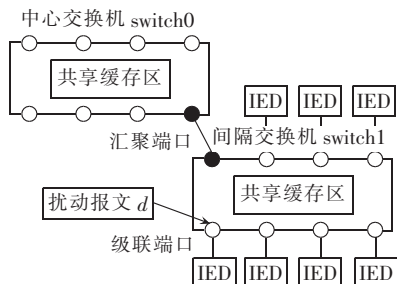


图 3 扰动报文占用缓存区示意图
Fig.3 Schematic diagram of buffer occupation by disturbing messages

switch1 某一级联端口出现扰动报文 d , 则报文 d 通过占用公共缓存区造成级联端口和汇聚端口报文的丢失。

利用 OPNET 仿真由于交换机缓存不足引发的丢包场景。设交换机处理速率为 10 Mbit/s, 内存大小为 2 Mbit; 报文 k 长度为 300 Byte, 发送频率为 4 000 p/s。如图 4 所示, 在 50 s 时刻, 所设扰动源开始发送长度为 1 000 Byte、发送频率为 330 p/s 的高优先级报文 h , 可见, 报文 k 丢包数为 100 p/s; 在 150 s 时刻, 报文 h 的发送频率增加为 1 500 p/s, 导致报文 k 全部丢失。

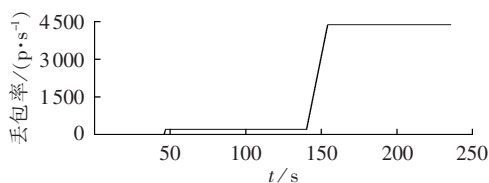


图 4 缓存不足引起的丢包
Fig.4 Packet loss caused by cache insufficiency

报文 k 丢失的原因如下:

- a. 共享缓存区的划分方式存在“一荣俱荣, 一损俱损”的弊端, 级联端口的扰动报文将影响范围扩大到汇聚端口;
- b. 由于缺乏报文识别能力, 端口无法控制和排除扰动报文, 扰动报文会造成缓存占用, 导致继电保护等重要应用的报文因为缓存被挤占而丢失。

2.3 单一路径引发的时延与丢包

在通用交换技术下, 智能变电站通信网络一般采用星形结构配合简单生成树协议(STP), 选择最短路径消耗的路径为唯一传输路径, 如图 5 所示。

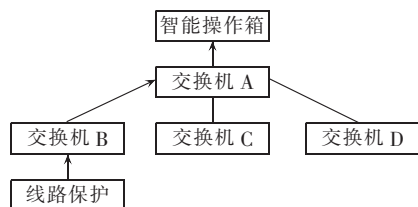


图 5 星形结构的单一传输路径
Fig.5 Mono transfer path of star topology

但是, 单一传输路径的可靠性存在不足: 若中心交换机 A 故障或者交换机 A 和 B 间链路断开, 线路保护发出的跳闸报文将无法顺利传输到操作箱, 造成断路器的拒动; 若交换机 A、B 间因流量突增出现扰动, 造成时延增加或丢包, 严重时也会使得断路器无法及时跳开, 进而造成故障范围扩大。

3 定质交换的实现方法与建模

定质交换技术能够从智能变电站信息流的实时性和可靠性需求出发, 为各类信息流合理分配有限的队列资源, 制定最佳的传输路径, 确保重要信

息流的及时性且不丢失,进而保证智能变电站各类业务功能的有效性。

3.1 基于 MPLS 标签的多级子队列分层调度

本文通过基于信息流分类标记以及多级子队列映射与资源分配来实现交换机对于报文的分层调度。

首先,根据信息流的类型不同引入 MPLS,在每条报文中增加 32 bit 的信息流标签对其进行标记以实现信息流的分类识别;然后,建立多级子队列的映射与资源分配。具体如下:

- a. 将交换机端口一级队列分裂成具有不等深度和发送速率等资源的子队列;
- b. 根据信息流类型将报文映射至不同子队列,1 个子队列存放 1 类或者以上的报文;
- c. 采用多核处理器的虚拟分配或者单核的时间片轮询等方法设置各个子队列发送单元的处理速率;
- d. 为每个子队列设置队列深度,设置方法详见 3.2 节。

基于 MPLS 标签的多级子队列分层调度模型如图 6 所示,其中,第 1 层调度区分队列,第 2 层调度区分报文类型,第 3 层调度区分业务类型,第 4 层调度区分报文源头。

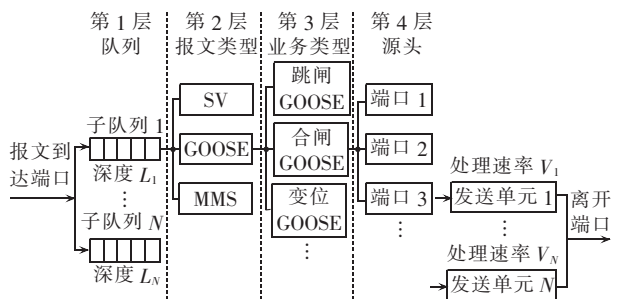


图 6 基于 MPLS 标签的多级子队列分层调度模型

Fig.6 Hierarchical dispatch model based on multi-layer subqueue with MPLS

以 2.2 节中网络传输时延抖动为例,验证模型的有效性。针对同级报文引起的排队时延情况,分别标记报文 h 和 k 标签值为 1 和 2,相应地,设置 2 个子队列,规定优先转发子队列 2 的报文,子队列 2 为空才转发子队列 1 的报文,优先确保报文 k 的实时性。采用确定性队列调度方案后,各场景的帧排队时延重新恢复为如图 2(a)所示的水平曲线。可见,通过检测报文标签值,分配子队列,能够达到消除时延抖动的效果。

3.2 基于区域划分的动态缓存分配

动态缓存分配能够在交换机缓存不足时,压缩次要报文的带宽和缓存,提升重要报文的带宽和缓存,同时检测和排除异常流量,确保重要报文不会

因缓存不足而引起丢包。
基于缓存区划分的动态资源分配模型如图 7 所示。

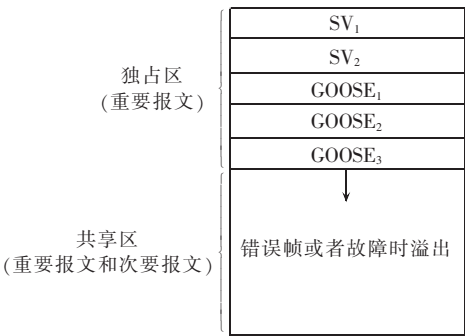


图 7 独占区和共享区模型

Fig.7 Exclusive buffer model and shared buffer model

- 缓存区的划分和资源分配规则如下。
- a. 缓存区分为独占区和共享区:独占区只允许通过端口的重要报文使用,而共享区允许重要报文和次要报文共同使用。
 - b. 独占区容量整定原则:根据通过端口的重要报文所需容量计算独占区容量,如式(6)所示。

$$C=\sum_{i=1}^nf_i$$

(6)

- 其中, C 为独占区容量; f_i 为某一时间断面通过端口的重要报文流量。
- c. 缓存区调度原则:当发生错误帧、网络故障等异常情况时,若独占区缓存不足,则重要报文溢出独占区,与次要报文竞争共享区,这时共享区需要优先满足重要报文。动态缓存分配的仿真场景如表 2 所示,拓扑如图 1 所示,其中设备 D_1 、 D_2 和 D_3 分别发送关键 SV 报文、关键 GOOSE 报文和次要报文。

表 2 动态缓存分配的仿真场景
Tab.2 Simulation scenario of dynamic buffer allocation

时段	对象	参数
0~20 s	交换机	处理速率 10 Mbit/s,内存 5 Mbit
	关键 SV 报文	长度 300 Byte,发送频率 4 000 p/s
	关键 GOOSE 报文	长度 1 000 Byte,发送频率 1 p/s
	次要报文	无
>20 s	关键 SV 报文	长度 300 Byte,发送频率 4 000 p/s
	关键 GOOSE 报文	长度 1 000 Byte,发送频率 500 p/s
	次要报文	长度 125 Byte,发送频率 5 000 p/s

仿真结果如图 8 所示。当未采用动态缓存分配时,重要报文丢包率为 986 p/s,次要报文丢包率为 1 233 p/s;采用动态缓存分配后,设置独占区大小为 3 MByte,共享区大小为 2 MByte,则重要报文丢包率为 0,次要报文丢包率为 3 600 p/s,有效防止了重要报文的丢失。

3.3 基于路径消耗的多路选择

多路选择的报文传输路径的作用在于为报文

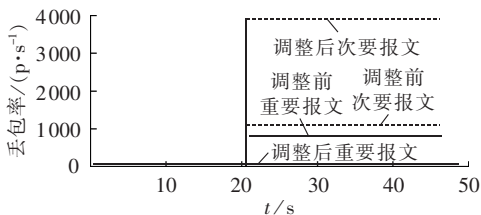


图 8 采用动态缓存分配前后的丢包对比
Fig.8 Comparison of packet loss between with and without dynamic cache allocation

提供多种路径选择,缓解异常流量对报文传输时延抖动的影响;在链路中断等网络故障发生时,为报文传输提供后备路径。

多传输路径通过生成树协议实现,步骤如下。

- a. 生成可能的路径集合。
- b. 为每条链路设定权值 p_j 。
- c. 根据信息流特征(如负载和信息流类型),设定每条链路的负载系数 d_j 、SV/GOOSE 信息流比例 λ_j 。
- d. 计算路径集合中每一条路径 W_j 的路径消耗 C_{W_j} (其中求和符号表示将每条报文的 $d_j p_j$ 相加):

$$C_{W_j} = \sum d_j p_j \quad (7)$$

- e. 为报文分配传输路径:若有指定路径,则分配该路径;若无指定路径,则选择最小路径消耗的路径为最优路径。

在 OPNET 上按照以上步骤编写交换机的报文传输路径协议,进行方案的有效性验证,仿真拓扑如图 9 所示。

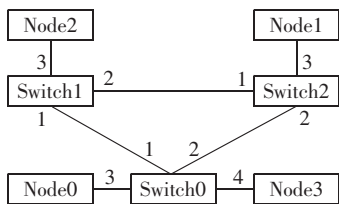


图 9 路径选择的仿真拓扑
Fig.9 Simulation topology of path selection

通过仿真验证模型有效性,仿真初始化场景如表 3 所示(交换机转发速率为 100 Mbit/s,Switch0/3 表示 Switch0 的 3 号端口,其他类似)。

表 3 仿真初始化场景
Tab.3 Initialization of simulation scenario

对象	参数	路径
报文 1	长度 300 Byte, 发送频率 4 000 p/s	Node0→Switch0/3→Switch0/2→ Switch2/2→Switch2/3→Node1
报文 2	长度 1 125 Byte, 发送频率 8 000 p/s	Node3→Switch0→Switch1→Node2

实现多路选择后,检测到 Switch0 的 2 号端口与 Switch2 的 2 号端口之间的负载过重,为保证 SV 报文发送过程保持不阻塞和不丢包,35 s 以后,交换机进行路径转换,报文 1 路径变为 Node0→

Switch0/3→Switch0/1→Switch1/1→Switch1/2→Switch2/1→Switch2/3→Node1,仿真结果如图 10 所示。由图 10 可见,通过选择路径可达到平衡负载、降低传输时延的目的。

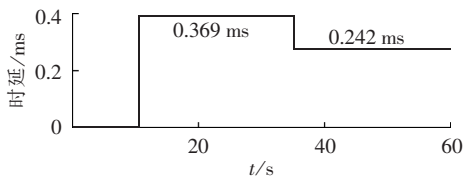


图 10 采用多路选择策略前后的时延对比
Fig.10 Comparison of delay between with and without multi-path selection

3.4 定质交换技术的实现方案

通用交换机具备了实现定质交换技术的队列、缓存区、交换矩阵、地址解析、路径选择等硬件结构和技术原型。本文在此基础上,提出的定质交换实现方案如图 11 所示。

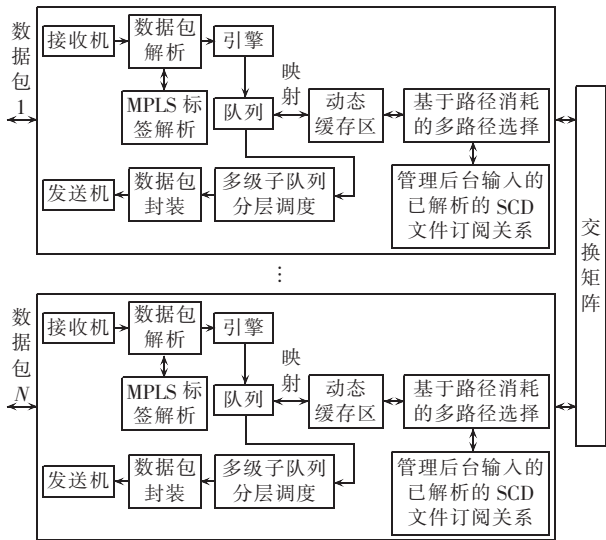


图 11 定质交换技术的实现方案
Fig.11 Implementation scheme of custom switching technology

- a. 增加 MPLS 标签解析模块。通过解析报文标签确定报文类型、内务内涵和所属端口,为分层调度和动态缓存奠定基础;

- b. 将通用交换机的单队列模块变为多级子队列分层调度模块,实现图 6 的层次化调度方案;

- c. 按照 3.2 节的基于区域划分的动态缓存分配设置动态缓存区,并完成缓存区与队列之间的映射;

- d. 导入交换机管理后台解析的变电站配置描述 SCD(Substation Configuration Description)文件订阅关系,结合 3.3 节的基于路径消耗的路径分配算法,选择传输路径。

本文基于 OPNET 仿真平台,采用自定义建模方法,实现了以上定质交换机仿真模型。

4 算例分析

本文算例以某实际 220 kV 智能变电站 220 kV 侧通信网络为背景。为突出 SV/GOOSE/MMS 信息流竞争资源最严重的场景,同时又体现智能变电站通信网络发展的趋势,本文算例采用共网传输方式。在 OPNET 平台上构建了共网传输场景下的定质交换模型,通过分析继电保护在采用定质交换技术前后的动作响应情况,研究定质交换对信息流的实时性、可靠性的提升,网络拓扑如图 12 所示。

南琴线路间隔、琴拱线路间隔、主变 1 间隔、主变 2 间隔的合并单元将电流采样值分别经中心交换机端口 2、3、4、5 传输到连接在中心交换机端口 1 上的母线保护,而母线保护沿同一路径发送控制命令到各间隔。本文以母线保护为例,分析定质交换对信息流性能的影响。

以中心交换机端口 1 为例,设置如下定质交换方案。

- a. 为各类信息流设置 1—8 的标签值,见表 4。
 - b. 设置子队列:根据表 4 所示的信息流类型将缓存区动态划分成 5 个子队列,队列调度采用加权轮循算法^[12]为子队列 1—5 配置权值。
 - c. 设置交换机的缓存区分,参数如表 5 所示。
- 仿真场景设置如下:南琴线路间隔合并单元出现扰动源,多发一路 SV 报文(报文长度为 300 Byte,频率为 4 000 p/s,标签值为 3),经中心交换机端口 1 到母线间隔保护装置;此时,母线故障,母差保护启动,向该母线上所有支路发送跳闸 GOOSE 报文;仿真时间为 5 s。

采用定质交换技术前后的信息流性能仿真如表 6 所示,表中“→”表示上升。

- a. 在使用通用交换技术的情况下,母线保护的跳闸 GOOSE 信息流在扰动源的作用下,传输时延由 1.602 ms 上升至 5.326 ms,不满足小于 3 ms 的

表 4 中心交换机端口 1 的应用业务
Tab.4 Application of central switch Port 1

业务类别	发送规律	实时性指标	子队列划分	子队列权值
1	心跳(2 ms~1 s)	<3 ms	1	0.40
2	心跳(2 ms~1 s)	<20 ms	3	0.15
3	80 点/周期	<3 ms	1	0.40
4	48 点/周期	<10 ms	2	0.25
6	Poisson(700)	无要求	5	0.08
7	1 点/周期	无要求	5	0.08
8	0.02 点/周期	<1 s	4	0.12

表 5 中心交换机基本参数
Tab.5 Fundamental parameters of central switch

参数名称	数值
速率	500 000 p/s
缓冲(独占区)	4 MByte
缓冲(共享区)	1 MByte
生成树协议	基于路径消耗的多路选择

表 6 采用定质交换前后的时延和丢包仿真结果
Tab.6 Simulative results of delay and packet loss before and after application of custom switching

信息流(标签)	通用交换时延/ms	定质交换时延/ms
跳闸 GOOSE(1)	1.602→5.326	1.537→1.549
开关量 GOOSE	1.738→25.246	1.835→9.356
保护采样 SV(5)	1.593→6.100	1.540→1.543
人机交互 MMS	1.895→203.545	2.038→300.112(丢包)
设备状态 MMS	1.937→202.421	2.123→300.241(丢包)
对时报文(8)	1.746→57.136	1.926→100.52

时延要求;而采用定质交换技术优化后,跳闸 GOOSE 信息流的传输时延在扰动情况下仍然能够维持在 1.537 ms,保证了保护的可靠动作。

- b. 在使用通用交换技术情况下,保护 SV 信息流和开关量 GOOSE 信息流的实时性均不满足要求,而定质交换技术保证了 2 类信息流的实时性。

- c. 在采用定质交换技术的情况下,MMS 报文的实时性有所降低,但仍能性能满足要求,这是因为保证 GOOSE 和 SV 信息流的实时性是靠牺牲 MMS 报文带宽来实现的。

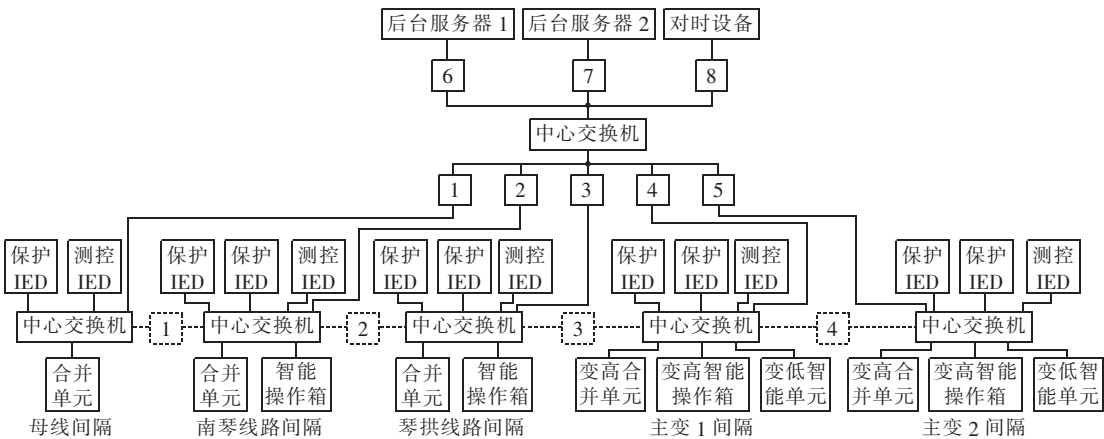


图 12 220 kV 侧拓扑结构
Fig.12 Topology at 220 kV side

可见,定质交换技术能够根据各类信息流的性能要求合理分配交换资源,从而可保证各类信息流性能均满足其实时性、可靠性的要求。

5 结论

a. “尽力而为”的通用交换技术以信息流“公平竞争”为准则,存在传输时延抖动、缓存不足引起的丢包、单一传输路径不可靠的问题,无法满足信息流差异性需求,对智能变电站信息流实时性、可靠性造成冲击;

b. 提出了定质交换技术的实现思路,包括基于多级子队列的确定性调度、基于区域划分的动态缓存分配以及基于路径消耗的多路选择,并分别在 OPNET 中进行了建模,模型的仿真结果表明定质交换机技术能够有效克服通用交换技术的不足,提升信息流的实时性与可靠性;

c. 给出实际智能变电站的定质交换技术的应用方案,通过与通用交换技术方案的对比仿真,验证了方案的有效性,并进一步凸显了定质交换的优势。

参考文献:

- [1] SIDHU T S, YIN Yujie. Modeling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1482-1489.
- [2] 朱来强, 陈新之, 高志勇. 数字化变电站中广播风暴的防治[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 98-101.
ZHU Laiqiang, CHEN Xinzh, GAO Zhiyong. Prevention of digital substation broadcast storm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 98-101.
- [3] 蒋宏图, 袁越, 杨昕霖. 智能变电站一体化信息平台的设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 131-134.
JIANG Hongtu, YUAN Yue, YANG Xinlin. Design of integrated information platform of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 131-134.
- [4] 毕艳冰, 蒋林, 张大海, 等. 基于实时数据分发服务的智能变电站 IEC61850 的实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 149-155.
BI Yanbing, JIANG Lin, ZHANG Dahai, et al. Mapping of IEC-61850 to data distribute service for smart substation communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 149-155.
- [5] 胡春潮, 蔡泽祥, 竹之涵. 提高数字化变电站关键报文传输可靠性方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 91-96.
HU Chunhao, CAI Zexiang, ZHU Zhihan. Frame based transmission reliability analysis of the digital substation key messages[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 91-96.
- [6] 王宾, 董新洲, 许飞, 等. 智能配电变电站集成保护控制信息共享分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 1-6.
WANG Bin, DONG Xinzhou, XU fei, et al. Analysis of data sharing for protection and control system in smart distribution substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(Supplement 1): 1-6.
- [7] 陈原子, 徐习东. 基于并行冗余网络的数字化变电站通信网络构

架[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 105-108.

CHEN Yuanzi, XU Xidong. Communication network structure of digital substation based on parallel redundancy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 105-108.

- [8] 韩明峰, 张捷, 郑永志. IEC61850 GOOSE 实时通信的实现方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 143-146.
HAN Mingfeng, ZHANG Jie, ZHENG Yongzhi. Realization of IEC61850 GOOSE real-time communication[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 143-146.
- [9] 葛遗莉, 葛慧, 鲁大勇. 数字化变电站设计运行中面临的问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 113-116.
GE Yili, GE Hui, LU Dayong. Problems in design and operation of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 113-116.
- [10] 柴宇梁, 尹传平, 林孝康. 多协议标记交换[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 66-69.
CHAI Yuliang, YIN Chuanping, LIN Xiaokang. Multiple Protocol Label Switching(MPLS)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 66-69.
- [11] 周鄢飞, 徐石明. 智能变电站数据中心初探[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 57-61.
ZHOU Yefei, XU Shiming. A preliminary investigation on data center in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 57-61.
- [12] 王文龙, 杨贵, 刘明慧. 智能变电站过程层用交换机的研制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 72-76.
WANG Wenlong, YANG Gui, LIU Minghui. Development of the switch used in process level of smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 72-76.
- [13] 樊陈, 倪益民, 窦仁辉, 等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [14] 李强, 窦晓波, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络规划与实时特性改进[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 73-76.
LI Qiang, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Communication network of digital substation and improvement of real-time performance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 73-76.
- [15] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 新一代变电站自动化网络通信系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 16-19.
SUN Junping, SHENG Wanxing, WANG Sunan. Study on the new substation automation network communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 16-19.

作者简介:



王海柱

王海柱(1985-),男,广东茂名,博士研究生,通讯作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 20801244@qq.com);

蔡泽祥(1960-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统继电保护教学与科研工作;

张延旭(1988-),男,吉林吉林人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

(下转第 168 页 continued on page 168)

(二):应用实例[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):19-23.

GUO Qi,HAN Weiqiang. Security and stability control technology test and research platform based on real-time simulation part two application examples[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(21):19-23.

[16] 田芳,董春晖,李亚楼. 电力系统运行及安全监控仿真系统的研究与开发[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):80-86.

TIAN Fang,DONG Chunhui,LI Yalou. Power system operation and security monitoring simulation system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(28):80-86.

作者简介:



李兴建

李兴建(1977-),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,通讯作者,主要研究方向为继电保护测试(E-mail:lixj@nari-relays.com);

夏彦辉(1982-),男,河南尉氏人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:xiayh@nari-relays.com);

陈松林(1969-),男,江苏南京人,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:chensl@nari-relays.com)。

Development and application of distributed simulation & test system for stability control system

LI Xingjian,XIA Yanhui,CHEN Songlin,REN Zuyi,SHEN Quanrong,WANG Yanguo
(NARI-Relays Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China)

Abstract: A distributed simulation & test system for regional stability control system is developed to simplify its site test,which is composed of simulation background,stability control simulation & test devices and external GPS. The faults of power system are simulated by the simulation software of simulation background and the simulative results are outputted by the simulation & test devices. Because the simulation & test devices are strictly synchronized by external GPS,the simulation data are thus inputted synchronously to the distributed stability control devices to verify their logic strategies and actions during system faults. The validity of the developed system is verified by the site application and its superiorities and deficiencies are summarized.

Key words: electric power systems; regional stability control; dynamic full-set test; system simulation test; distributed system; closed loop test; computer simulation

(上接第162页 continued from page 162)

Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation

WANG Haizhu¹,CAI Zexiang¹,ZHANG Yanxu¹,SHAO Xiangchao¹,LI Yiquan²,ZHU Zhihan³

(1. College of Electrical Engineering,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China;

2. Guangdong Power Dispatch Centre,Guangzhou 510600,China;

3. Guangzhou PtSwitch Co.,Ltd.,Guangzhou 510665,China)

Abstract: Based on OPNET simulation platform,the deficiency of general switching technology applied in the switching of smart substation information is analyzed from different aspects:transmission delay jitter,packet loss,transmission path,etc. An implementation technology of custom switching is proposed to improve the reliability and real-time performance of smart substation information flow,which hierarchically dispatches the messages based on the multi-layer subqueue with MPLS(Multiple Protocol Label Switching),dynamically allocates the buffer based on the buffer division,supports multiple paths for message transfer based on the path loss. A custom switching model is established on OPNET simulation platform for an actual smart substation,where different information flows share a network,and the simulative results show that,the switching resources are reasonably allocated and the proposed switching technology is feasible and effective.

Key words: smart substation; custom switching; information flow; real-time; reliability; communication