

# 基于虚拟局域网的智能变电站热备份通信

刘晓胜<sup>1</sup>, 海天翔<sup>2</sup>, 郑 检<sup>3</sup>, 朱宏林<sup>1</sup>, 徐殿国<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 国网北京市电力公司信息通信分公司, 北京 100070;

3. 国网江西省电力公司经济技术研究院, 江西 南昌 330043)

**摘要:** 虚拟局域网(VLAN)技术可提高智能变电站过程层网络通信实时性与安全性。为减小中心交换机的通信压力, 针对跨交换机通信, 设计了带热备份路由协议(HSRP)的双中心交换机通信方案。在仿真和实验中将添加了热备份路由协议的双交换机网状拓扑与传统单交换机星形网络拓扑结构进行对比, 结果表明, 采用双中心交换机热备份后, 过程层网络中心交换机压力明显减小, 并可以在链路发生故障时由备份交换机承担相应的数据通信任务, 提高了智能变电站通信网络的可靠性。

**关键词:** 智能变电站; 热备份路由协议; OPNET; 实物验证; 虚拟局域网; 通信; 可靠性; 交换机

**中图分类号:** TM 769

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.021

## 0 引言

基于 IEC61850 的智能变电站对遥控信号、保护信号等具有很高的实时性要求<sup>[1-3]</sup>。在智能变电站内部, 数据报文种类繁多, 若不按照某种规则对设备的功能进行划分, 会产生广播风暴, 增加网络延时, 造成网络拥堵, 影响变电站的正常运行。虚拟局域网 VLAN (Virtual Local Area Network) 可以很好地解决上述问题。通过对变电站中的智能电子设备 (IED) 进行逻辑划分, 将具有相同工作性质的设备划分在同一 VLAN 中<sup>[4-6]</sup>, 将数据信息限制在 VLAN 内部, 可以减轻交换机的工作压力, 减少网络延时。

在智能变电站通信的可靠性与实时性方面, 国内外众多学者从不同角度开展了相关研究工作。近年来, 有关变电站内 VLAN 技术的仿真研究逐渐开展。文献[7]提出了一种适用于智能变电站的 VLAN 划分方案, 对变电站内不同电压等级的设备进行 VLAN 划分, 从而避免广播风暴; 文献[8]对智能变电站内部各种典型数据业务进行建模与理论分析、计算, 并首次对 VLAN 在智能变电站中的应用进行了具体的仿真分析; 文献[9]采用 VLAN 技术对变电站过程层进行了合理的划分, 并在数据包大小、发送间隔、节点处理能力的基础上对智能变电站通信网络进行设置, 对跨间隔及跨交换机的 2 种场景进行仿真研究。但是现在已有的智能变电站 VLAN 研究存在着一些不足: 现有的仿真研究均采用单交换机的星形网络, 当跨交换机通信数据流增大时, 单一交换机承担压力较大, 可能产生较大的网

络延时; 当网络中出现链路或交换机设备故障时, 单一交换机难以进行容错控制, 难以保证通信的可靠性; 以往的研究均采用 OPNET 仿真的方式, 并没有在实际交换机上进行 VLAN 划分及验证。本文对核心交换机进行热冗余备份, 针对典型的 D2-1 变电站结构进行重新组网, 并采用热备份路由协议 HSRP (Hot-Standby Router Protocol), 对单一及双冗余交换机网络在中心交换机转发速率、IED 接收速率、网络延时 3 个方面进行仿真对比; 并在实际交换机上进行 VLAN+HSRP 实验, 研究了 VLAN+HSRP 技术对变电站通信实时性、可靠性方面的影响。

## 1 HSRP 在智能变电站中的应用

### 1.1 HSRP

HSRP 是美国 Cisco 自主研发的专有技术。系统中包含多个路由器, 构成 1 个“热备份组”<sup>[10]</sup>。在任意时刻, 组内只有 1 台活动的 (active) 路由器, 用于承担转发数据包的任务。当活动路由器出现故障时, 备份路由器成为新的活动路由器, 承担转发数据包的任务。从网络主机方面而言, 网关并没有发生改变, 主机仍然连通, 避免受到故障的影响, 实现了工作路由器的切换。

在 HSRP 网络中, 各路由器通过 Hello 消息互相监听。若长时间未收到路由器发送过来的 Hello 消息, 即认为是活动路由器出现故障, 备份路由器便成为活动路由器。一个路由器是否为活动路由器主要由优先级决定, 若一个路由器的优先级高于其他路由器, 则该路由器成为活动路由器。若网络中路由器优先级相同, 则由各路由器共同承担业务。在 1 个热备份组中, 最多有 1 个活动路由器和 1 个备份路由器。HSRP 具有以下特点。

a. 可靠性强。2 台路由器采用 HSRP, 如果 1 台

收稿日期: 2014-12-23; 修回日期: 2015-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51277042)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277042)

路由器出现故障,备份路由器会迅速跟进承担业务。

**b. 可实现负载均衡。**众多数据网核心部分数据流量及处理业务量较大,单一设备承担不利于网络整体运行。HSRP 可以提供负载均衡机制,扩展链路带宽,加强数据处理能力,提高网络的可用性。

**c. 安全性高。**在交换机上与 VLAN 配合,可以保证子网间数据传输的安全性。

## 1.2 智能变电站采用 HSRP 的必要性

如智能变电站通信网络的一些大数据流量企业网络,一般采取“8/2”原则,即有 80% 的数据流量在各子网内部,而只有 20% 的数据流量通过骨干路由器或者中心服务器在各子网之间传递;然而,随着网络应用业务的增多,各大数据流量的企业网络受日益增多的集成应用的影响,通过骨干路由器或中心路由器的流量比重逐渐增多,现已达到了“5/5”,甚至有“2/8”的趋势。

在智能变电站内部,各通信业务种类繁多,数据类型及最大延时要求各不相同,变电站数据报文及其特点如表 1 所示。在实际中,变电站内部各报文并不局限在各间隔内部,跨交换机或跨间隔的数据流已成为变电站内部不可忽略的因素。而这些数据流仅由 1 台核心交换机承担势必对交换机可靠性提出非常严格的要求。当核心交换机承担的压力过重,其转发速率过大会对网络延时产生影响。而采用双备份路由协议,将数据流由 2 台核心交换机共同承担,可以实现负载均衡。而当变电站过程层交换机与中心交换机之间链路出现故障时,采用热备份的双交换机拓扑可以进行容错控制,数据流将在备份路径上传递,避免由于链路中断导致的通信故障,提高通信的可靠性。

表 1 智能变电站数据报文及其特点

Table 1 Data message types and corresponding features of smart substation

| 数据报文类型   | 数据特点          |
|----------|---------------|
| 采样值报文    | 稳定,量大,时间要求严格  |
| 状态设备信息报文 | 稳定,中速报文       |
| 开关操作命令报文 | 数据长度短,快速报文    |
| 文件传输报文   | 数据长度较长,实时性要求低 |
| GOOSE 报文 | 数据长度短,突发性强    |

采用双备份路由协议,将数据流由 2 台核心交换机共同承担,可以实现负载均衡。而当变电站过程层交换机与中心交换机之间链路出现故障时,采用热备份的双交换机拓扑可以进行容错控制,数据流将在备份路径上传递,避免由于链路中断导致的通信故障,提高通信的可靠性。

## 2 基于 VLAN 的智能变电站热备份通信

本文以一种典型的 D2-1 型变电站为例,对现有

的通信拓扑采用中心交换机热备份的方案,建立仿真模型,验证其在通信实时性与可靠性方面所具有的优势性。D2-1 型变电站结构如图 1 所示。

### 2.1 VLAN 的划分与设置

在对智能变电站热备份通信建模之前,首先要对该 D2-1 变电站设备进行 VLAN 的设置。在 D2-1 型变电站中,有 1 个母线间隔、2 个变压器间隔以及 6 个馈线间隔。每个间隔内分别有合并单元(MU) IED、保护与控制单元(P&C) IED 及断路器 IED。采取按间隔划分 VLAN 的原则,将该变电站划分为 11 个 VLAN,共分为以下 3 个大类:

**a. 9 个变电站间隔各自划分为 1 个 VLAN,**用于抑制广播风暴,减小中心交换机的压力;

**b. 站控主机与服务器间划分为 1 个 VLAN,**用于变电站层内部设备之间通信;

**c. 变电站中所有 IED 及站控层设备(主机、服务器)划分为 1 个 VLAN,**用于跨层通信。

在端口设置中,将各间隔交换机与中心交换机的接口都设为“Trunk”,用于实现跨交换机的 VLAN 间通信;其余端口设为“Access”,用于传递 VLAN 信息。

### 2.2 基于 VLAN 的智能变电站热备份通信方案

根据上文提出的智能变电站热冗余思想,对核心交换机进行热冗余备份。如图 2 所示,变电站站控层的主机与服务器分别与 2 台互为热冗余的中心交换机相连,2 台中心交换机为 3 层交换机,可进行路由协议的配置,通过 2 条光纤相连,1 条为工作路径,1 条为其备份路径,并配置为链路聚合;每个 VLAN 间隔的边缘交换机和与之相邻的边缘交换机相连,并与 VLAN 间隔内的各 IED 设备呈星形连接。将 D2-1 型变电站中的 9 个间隔分成 4 个 1 组和 5 个 1 组,共 2 组,每组与其中 1 台中心交换机相连,构成环网。在网络正常工作时,每台中心交换机分别只承担 1 组交换机转发来的数据流,各间隔的边缘交换机分别与其负责的中心交换机相连。可以看出,该热备份方案拓扑结构是星形与环形结合的复合拓扑。

由于网络中跨交换机的数据流由 2 台中心交换机共同承担,故单一交换机的数据转发速率降低,压力有所减小。而当 2 台中心交换机中的某一台出现故障或是边缘交换机与中心交换机间链路故障时,边缘交换机将通过与其他边缘交换机之间的链路与另一台中心交换机进行通信,避免出现通信中断现象,提高通信的可靠性。

### 2.3 智能变电站通信数据流建模

根据各类报文的不同特点及具体的参数要求,本文按照数据流的流向,将变电站内的通信数据流分为以下 5 类,并进行数据流建模。

**a. 采样值报文。**

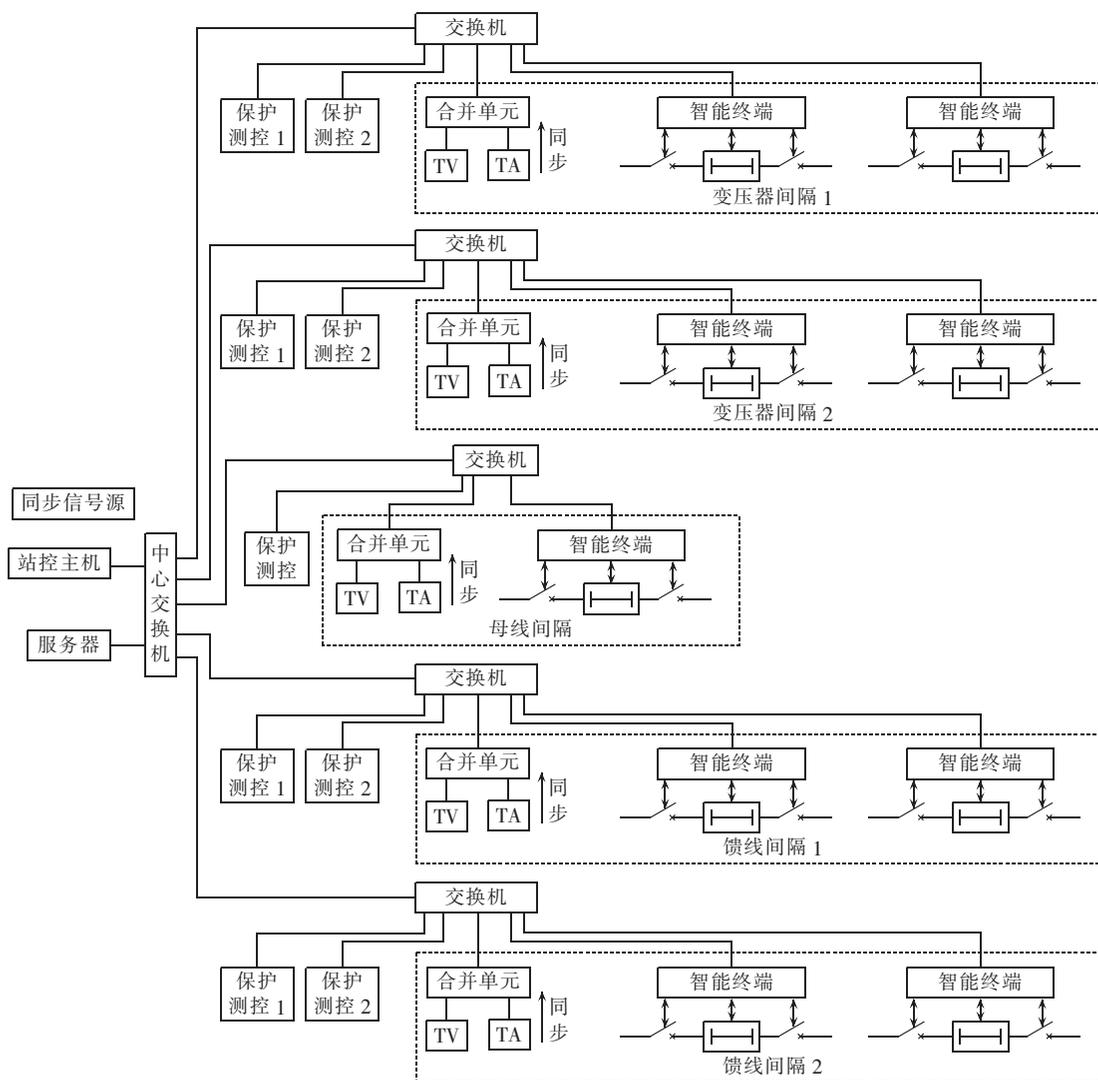


图 1 D2-1 型变电站结构图

Fig.1 Structure of D2-1 type substation

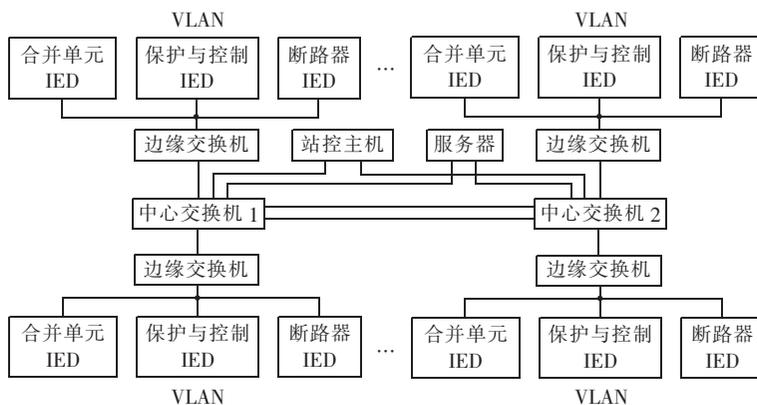


图 2 智能变电站热备份方案

Fig.2 Hot-standby scheme of smart substation

采样值 SAV(SAmpled Value)报文是每个间隔内的合单元 IED 以一定频率向 P&C IED 以广播方式发送的周期性报文,属间隔内报文,分为变压器间隔内 SAV 报文和非变压器间隔内 SAV 报文。前者数据包最大长度为 171 Byte,后者数据包最大长度

为 125 Byte,每秒发送数据包 4000 个。

**b. 设备状态信息报文。**

设备状态信息报文由各间隔内的 P&C IED 和断路器 IED 向站控服务器发送,属跨层通信报文,数据包发送间隔为 20 ms,报文大小为 256Byte。

c. 跳闸报文。

跳闸报文属间隔内和跨间隔的复合报文。在馈线间隔内,P&C IED 向断路器 IED 发送跳闸报文,同时向母线间隔内断路器 IED 发送跳闸报文。报文大小为 16Byte,到达时间服从泊松分布( $\lambda=500$ )。

d. GOOSE 报文。

GOOSE 报文为典型的突发性报文,也是间隔内和跨间隔的复合报文。发生故障后,间隔内的 P&C IED 同时收到本间隔内断路器及母线间隔发送的 GOOSE 报文,采用 ON/OFF 机制,报文在 ON 时刻产生。处于 ON 状态时服从  $\alpha=1.1, k=512 \mu s$  的帕累托分布,处于 OFF 状态时服从泊松分布( $\lambda=50$ )。

e. 文件传输报文。

变电站站控层内部传输的报文,由服务器向站控主机发送,属跨交换机报文;数据包较大,为 1 MByte,报文将被持续发送。

3 基于 VLAN 的智能变电站热备份仿真分析

3.1 仿真场景

仿真场景中,采用 155 Mbit/s 带宽的链路即可满足变电站通信的要求。仿真以下列通信事件为例:某一馈线间隔发生故障,在发送跳闸指令至间隔内 P&C IED 及母线间隔内断路器 IED 的同时,还进行着变电站层主机与服务器之间跨中心交换机的 FTP 文件传输。仿真从 100 s 开始,首先由合并单元持续产生 SAV 报文,直至仿真结束;110 s 时,站内各 P&C IED、断路器 IED 开始向站控设备发送设备状态信息报文;跳闸指令在 120 s 时进行传送;GOOSE 报文和文件传输报文在 120~130 s 内随机时刻进行传送,整个仿真时间持续至 1200 s。

3.2 仿真建模

仿真场景中馈线间隔内的合并单元 IED 产生的 SAV 报文属于快速报文,直接映射到数据链路层,为减少协议开销,采用 OPNET 中的 Ethernet\_station 模型。状态信息报文、GOOSE 报文及跳闸报文属于中速或快速报文,与之有关的断路器 IED、P&C IED 以及站控主机均采用 Ethernet\_workstation 模型。Ethernet\_station 模型和 Ethernet\_workstation 模型均采用 OPNET 自带的模型,根据数据报文的进行设置,来模拟各类数据报文。各类报文的仿真应用、传输协议、优先级设置如表 2 所示。在优先级的设置中,VLAN 的优先级标志位位于其标签字段第 3 个字节的高 3 位,最低为 0,最高为 7。根据智能变电站数据报文通信实时性要求的不同,将 GOOSE 报文及跳闸报文的优先级设置为最高级 7,将实时性要求最低的文件传输报文设置为系统的默认等级 4。

本文针对变电站通信中跨交换机、跨间隔通信情

表 2 智能变电站数据报文仿真设置

Table 2 Settings for data message simulation of smart substation

| 数据报文类型   | 仿真应用             | 传输协议 | 优先级 |
|----------|------------------|------|-----|
| SAV 报文   | Video conference | UDP  | 5   |
| 状态设备信息报文 | Video conference | UDP  | 6   |
| 跳闸报文     | Video conference | UDP  | 7   |
| 文件传输报文   | FTP              | TCP  | 4   |
| GOOSE 报文 | Video conference | UDP  | 7   |

况,运用上述的热备份思想与 VLAN 结合,以减小中心交换机的压力,故采用对比仿真的方式比较常规单交换机网络与双交换机网络在通信实时性和可靠性方面的差异。改进前后的 OPNET 整体网络模型分别如图 3(a)、(b)所示,馈线间隔如图 3(c)所示。

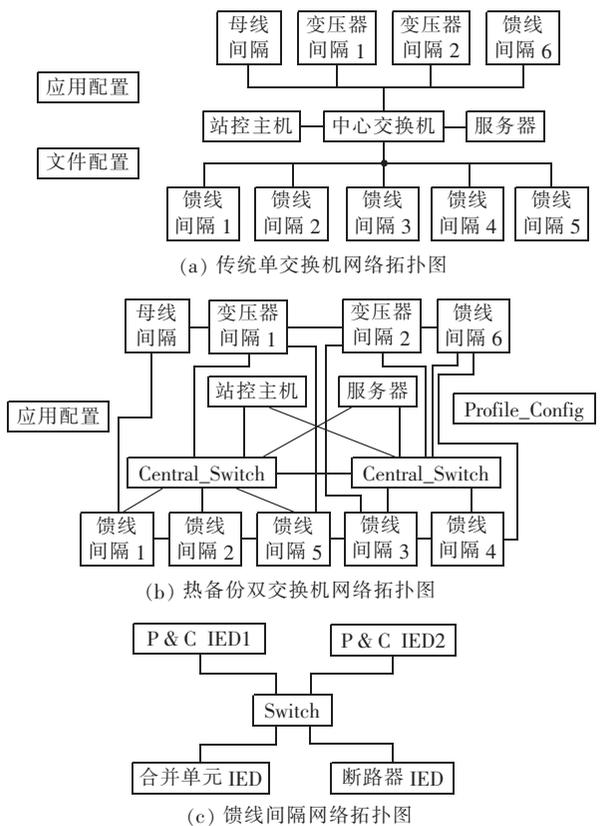


图 3 OPNET 仿真拓扑图

Fig.3 Topological diagrams of OPNET simulation

3.3 仿真结果分析

对传统单交换机网络与热备份双交换机网络从实时性与可靠性 2 个方面进行对比,仿真结果如图 4—7 所示。

从图 4 可以看出,采用了 VLAN 技术的场景,由于划分了 VLAN,使 SAV 报文只在本间隔内部传送,中心交换机转发速率明显减小,大幅减小了交换机的压力;采用图 3(b)中的热备份双交换机拓扑,每台交换机只承担一半的业务转发任务,中心交换机的转发速率进一步减小,约为单交换机场景转发速率的 1/2。

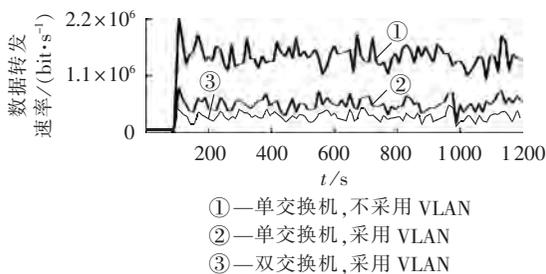


图 4 不同拓扑结构对中心交换机转发速率的影响  
Fig.4 Influence of topological structure on forwarding rate of central switch

从图 5 可以看出,进行 VLAN 划分的场景下,P&C IED 只收到本间隔内部合并单元 IED 发送的数据,抑制了广播风暴。不采用 VLAN 的场景下,P&C IED 接收数据速率平均值为  $4 \times 10^5$  bit/s 左右;而采用 VLAN 的场景下,P&C IED 接收数据速率平均值为  $0.45 \times 10^5$  bit/s,为不采用 VLAN 场景下的 1/9 左右,与理论分析一致。

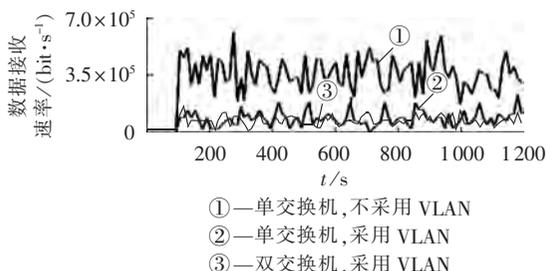


图 5 不同拓扑结构对 IED 数据接收速率的影响  
Fig.5 Influence of topological structure on data receiving rate of IED

在实时性方面,可以从图 6 看出,划分了 VLAN 的网络场景延时明显减小,更加符合 IEC61850 中规定的最大延时标准;而热备份交换机网络场景由于多增加了 1 台交换机,势必带来一些附加的交换机延时,从图 6 可以看出其延时要比单交换机延时稍长,不过仍小于不采用 VLAN 的网络场景,符合 IEC 61850 中规定的延时标准。

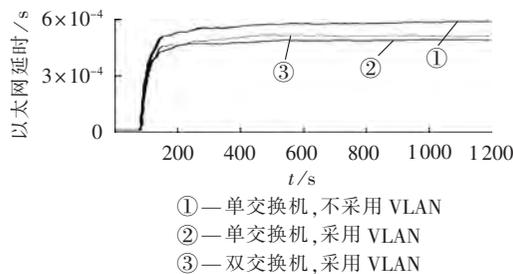


图 6 不同拓扑结构对网络延时的影响  
Fig.6 Influence of topological structure on network delay

在可靠性方面,假设仿真在进行到 500 s 时,馈线间隔 1 的路由器与中心交换机链路发生故障,分析此时站控层服务器接收到的数据。从图 7 中可以看

出,当链路发生故障时,采用热备份双交换机的网络场景的站控层服务器接收到的数据基本未受到影响;而传统的单交换机星形网络由于无法提供备份路径,一旦与中心交换机相连的链路出现故障,站控层设备将无法收到相应数据,对变电站通信造成严重影响。

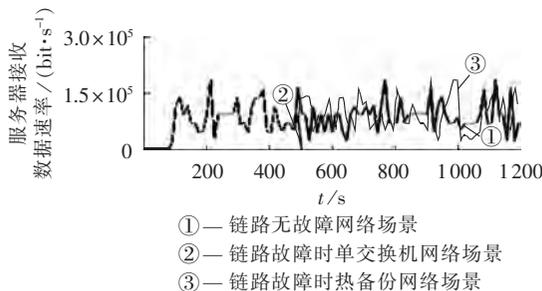


图 7 链路故障对站控服务器接收速率的影响  
Fig.7 Influence of link failure on receiving rate of station control server

#### 4 实物验证

为了验证 VLAN 及 HSRP 能够在实际交换机上进行配置,保证通信的安全性、实时性、可靠性,本节在前文仿真的基础上,利用实际的交换机进行组网实验。

实验平台包括 4 台交换机,均为可配置的思科网关型交换机,其中:3 层交换机 C3560 为 2 台,可进行路由协议的设置,采用“一次路由、多次交换”的原理,进行基于 IP 地址的数据包转发,代表变电站内的中心交换机;2 层交换机 C2950 为 2 台,连接着 PC 机,用于数据包的转发,代表着变电站间隔内交换机。实验将从安全性、实时性及可靠性 3 个方面进行验证,利用 PC 机上的超级终端对交换机进行配置,并利用 Ping 指令进行网络的连通性、实时性测试。

##### 4.1 安全性验证

VLAN 最大的特点就是不同 VLAN 之间若不设置路由则无法进行通信,这可保证数据只在 VLAN 内部传递,安全性强,可避免广播风暴。在安全性实验中,采用 1 台 C3560 交换机和 3 台 PC 机的实验拓扑,如图 8 所示。

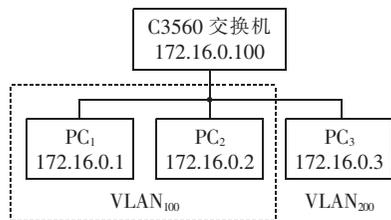


图 8 安全性验证实验拓扑  
Fig.8 Topology of security verification experiment

将实验用的 3 台 PC 机及交换机配置为如图 8 中所示的 IP 地址,并将交换机划分为 VLAN<sub>100</sub>、VLAN<sub>200</sub>



Reply from 192.168.10.2: bytes=32 time<1ms TTL=255  
 Ping statistics for 192.168.10.2:

Packets: Sent=18, Received=16, Lost=2(11% loss),

Approximate round trip times in milli-seconds:

Minimum=0 ms, Maximum=2 ms, Average=0 ms

表 4 可靠性验证实验结果

Table 4 Results of reliability verification experiment

| 实验场景    | 实验结果    | 通信中断时间 |
|---------|---------|--------|
| 无 HSRP  | 通信中断    | 永久     |
| 采用 HSRP | 通信受影响较小 | 短暂     |

从实验结果中可以看出,无 HSRP 的网络在中心交换机出现故障后,通信发生中断。采用 HSRP 的网络在中心交换机出现故障后,数据将通过 C2950 交换机 2 经另一中心交换机转发至目的 PC,具有较好的容错功能和较强的可靠性,通信经过短时间中断后能恢复正常。

## 5 结论

本文针对智能变电站通信中存在的跨交换机、跨间隔等情况,结合 HSRP 提出一种双交换机热备份的网络结构。通过与传统单交换机网络拓扑的对比仿真可知,采用了 HSRP 的网络拓扑凭借硬件冗余的方式,减小了中心交换机的压力,缩短了网络延时;而当链路发生故障时,备份交换机可承担起故障活动交换机的转发任务,避免了通信中断,确保了通信的可靠性。最后用交换机与 PC 机实验平台验证了仿真的结论。该热备份双交换机方案可应用于实际的变电站通信中。

## 参考文献:

- [1] 曹进明,房鑫炎,吴蓉. 基于 IEC61850 标准的变电站高可靠性通信研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):89-93.  
CAO Jiming,FANG Xinyan,WU Rong. Reliable substation communication based on IEC61850[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):89-93.
- [2] 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,S19.  
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,S19.
- [3] 王德文,邸剑,张长明. 变电站状态监测 IED 的 IEC61850 信息建模与实现[J]. 电力系统自动化,2012,36(3):81-86.  
WANG Dewen,DI Jian,ZHANG Changming. Information modeling and implementation for satus monitoring IED in substation[J].

- Automation of Electric Power Systems,2012,36(3):81-86.
- [4] 牛占平. VLAN 技术在智能化变电站网络中的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):75-78.  
NIU Zhanping. Application of VLAN technology in the intelligent substation network[J]. Power System Protection and Control,2009,37(23):75-78.
- [5] 李广华. 数字化变电站组网技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):142-146.  
LI Guanghua. Digital substation networking technologies[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):142-146.
- [6] 邱智勇,陈建民. 500 kV 数字化变电站组网方式及 VLAN 划分探讨[J]. 电工电能新技术,2009,28(4):60-65.  
QIU Zhiyong,CHEN Jianmin. Discussion of 500 kV digital substation network mode and VLAN partition[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2009,28(4):60-65.
- [7] 丁腾波,林亚男,赵萌. 智能变电站虚拟局域网逻辑结构划分方案的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(1):115-119,155.  
DING Tengbo,LIN Yanan,ZHAO Meng. Research of the virtual local area network in smart substation[J]. Power System Protection and Control,2012,40(1):115-119,155.
- [8] 张志丹,黄小庆,曹一家,等. 基于虚拟局域网的变电站综合数据流分析与通信网络仿真[J]. 电网技术,2011,35(5):204-209.  
ZHANG Zhidan,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Comprehensive data flow analysis and communication network simulation for virtual local area network-based substation[J]. Power System Technology,2011,35(5):204-209.
- [9] 秦川红,王宁,任宏达,等. 采用虚拟局域网的数字化变电站数据通信仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):126-131.  
QIN Chuanhong,WANG Ning,REN Hongda,et al. Simulation and study on data communication in digital substation based on virtual local area network[J]. Power System Protection and Control,2013,41(2):126-131.
- [10] 李晓娟,陈存社. 热备份路由及负载均衡在 VLAN 中的实现[J]. 计算机工程与设计,2005,26(5):1203-1204.  
LI Xiaojuan,CHEN Cunshe. Solution to hot standby routing and load-balance for VLAN[J]. Computer Engineering and Design,2005,26(5):1203-1204.
- [11] 辛建波,段献忠. 基于优先级标签的变电站过程层交换以太网的信息传输方案[J]. 电网技术,2004,28(22):26-30.  
XIN Jianbo,DUAN Xianzhong. A transfer scheme based on priority-tag in switched Ethernet for substation process-level[J]. Power System Technology,2004,28(22):26-30.
- [12] 李兰欣,苗培青,王俊芳. 基于 IEC61850 的数字化变电站系统解决方案的研究[J]. 电网技术,2006,30(增刊 2):321-324.  
LI Lanxin,MIAO Peiqing,WANG Junfang. Analyze and implementation of substation automation system based on IEC61850 standard[J]. Power System Technology,2006,30(Supplement2):321-324.
- [13] 张沛超,高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术,2006,30(24):73-77.  
ZHANG Peichao,GAO Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology,2006,30(24):73-77.
- [14] 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 Sun'an. Study on the new substation automation network communication system[J].

Proceedings of the CSEE,2003,23(3):16-19.

- [15] 王海峰,丁杰. 对变电站内若干网络通信问题的探讨[J]. 电网技术,2004,28(24):65-68.  
WANG Haifeng,DING Jie. Research on several issues of sub-station network communications[J]. Power System Technology, 2004,28(24):65-68.
- [16] 邹玲,石坚,贺聿志. 网络设计与仿真方法的研究[J]. 计算机工程与应用,2000(6):129-132.  
ZOU Ling,SHI Jian,HE Yuzhi. The study of network planning and simulation methodology[J]. Computer Engineering and Applications,2000(6):129-132.

#### 作者简介:



刘晓胜

刘晓胜(1966—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能电网、电力系统通信、电力线载波通信;  
海天翔(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,主要研究方向为智能电网、电力系统通信(E-mail:haitianxiang9999@163.com);  
徐殿国(1960—),男,黑龙江大庆人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网、电力电子技术。

### Hot-standby communication of VLAN-based smart substation

LIU Xiaosheng<sup>1</sup>, HAI Tianxiang<sup>2</sup>, ZHENG Jian<sup>3</sup>, ZHU Honglin<sup>1</sup>, XU Dianguo<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Beijing Electric Power Company, Beijing 100070, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330043, China)

**Abstract:** The real-time performance and security of process-level network communication in smart substation can be improved by the application of VLAN(Virtual Local Area Network) technology. A scheme of dual-switch communication with HSRP(Hot-Standby Router Protocol) is designed for the multi-switch communication to reduce the communication load of central switch and its mesh topology is compared with the star topology of single-switch communication in simulation and experiment, which show that, the central switch load of process-level network in the proposed scheme is obviously reduced and the standby switch can take over the corresponding data communication task when fault occurs in the link, which improves the reliability of smart substation communication network.

**Key words:** smart substation; hot-standby router protocol; OPNET; physical verification; virtual local area network; communication; reliability; switches

(上接第 125 页 continued from page 125)

### Power source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty

XIAO Dingyao<sup>1</sup>, WANG Chengmin<sup>1</sup>, ZENG Pingliang<sup>2</sup>, SUN Weiqing<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Flexibility is an important index to evaluate the ability of power system against the uncertainty. Aiming at the uncertainty caused by the renewable energy and based on the characteristic analysis of flexibility, a mathematic model with a comprehensive evaluation system is proposed to evaluate the source flexibility of power system. The source flexibility model considers the maximum mutation of renewable energy generation and divides the constraints into traditional constraints and source flexibility constraints. According to different control methods and objects, a flexibility evaluation table is built in the evaluation system to reflect the state, variation and trend of flexibility during power system operation. The inherent flexibility index is used to compare the flexibility among different operating conditions or power systems. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed evaluation system.

**Key words:** renewable energy resources; electric power systems; flexibility; uncertainty; optimization; comprehensive evaluation table; inherent flexibility