



文章编号:1001-9081(2017)09-2512-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2017.09.2512

基于软件定义网络的智能变电站网络架构设计

黄 鑫^{1,2*}, 李 芹^{1,2}, 杨 贵^{1,2}, 竹之涵³, 李文猛¹, 施玉祥^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院),南京 211106; 2. 智能电网保护与运行控制国家重点实验室(南瑞集团公司),南京 211106;
3. 广州思唯奇计算机技术有限公司,广州 510003)
(*通信作者电子邮箱 huangxin@sgepri.sgcc.com.cn)

摘要:随着智能变电站二次装置标准化、智能化水平的提升,需要有一种更高效、智能的通信网络以满足变电站运行和维护要求,能够实现设备即插即用、智能监测、子网间安全隔离以及设备通用互换。针对智能站网络统一管理、子网间安全隔离以及设备兼容性、互换性的应用需求,提出了一种基于软件定义网络(SDN)技术的变电站网络架构,将 IEC61850 和 OpenFlow 协议用于网络架构设计,利用 OpenFlow 控制器管控和隔离各独立子网,以实现网络设备管理和子网安全隔离。实验结果表明,所提架构可实现流量基于业务类型的精准控制和数据的安全隔离,对于提升变电站运行和维护水平有着非常重要的应用价值。

关键词:智能变电站;软件定义网络;OpenFlow;网络交换机

中图分类号: TN915.853 **文献标志码:**A

Network architecture design of smart substation based on software defined network

HUANG Xin^{1,2*}, LI Qin^{1,2}, YANG Gui^{1,2}, ZHU Zhihan³, LI Wenmeng¹, SHI Yuxiang^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing Jiangsu 211106, China;
2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control (NARI Group Corporation), Nanjing Jiangsu 211106, China;
3. Guangzhou ptSwitch Computer Technology Company Limited, Guangzhou Guangdong 510003, China)

Abstract: With the improvement of standardization and intelligence level of secondary equipment, a kind of communication network more efficient and smarter is needed in smart substation to meet the substation operation and maintenance requirements, to achieve equipment plug and play, intelligent monitoring, subnet secure isolation and element interchange. For the application needs of substation network unified management, security isolation between subnets and equipment compatibility and interchangeability, a Software Defined Network (SDN)-based substation network architecture was proposed. IEC 61850 and OpenFlow protocols were used for network architecture design. OpenFlow controller was used to control and isolate the individual subnets to implement network device management and subnet secure isolation. The experimental results show that precise traffic control based on service types, and securely data isolation can be implemented with the proposed substation SDN-based network architecture. It has a very important application value for promoting the operation and maintenance level of smart substation.

Key words: smart substation; Software Defined Network (SDN); OpenFlow; network switch

0 引言

智能变电站采用可靠、集成和环保的智能设备,以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求,自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和检测等基本功能,具备支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策和协同互动等高级功能的变电站^[1]。

随着业务智能化需求的不断提高,使得数据采集量和功能节点之间数据交互量大大提高。面对这些应用需求,变电站通信网络作为智能变电站可靠运行的基础,其原有的组网理念以及功能、性能已不能满足建设、运维应用需求。因此,建立一种网络分层管理、业务自动感知、装置即插即用、网络安全可靠、设备通用互换的智能变电站通信网络架构,满足智

能变电站网络建设和运维需求,成为了电力科研和管理人员的共识^[2-3]。

围绕上述问题,文献[4-5]设计了延时可测技术和业务流量管理的交换机模型,有效解决过程层网络装置过分依赖对时的问题以及智能变电站过程层网络采样值(Sampled Value, SV)报文、SV 和 GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events)报文及 GOOSE 报文间的相互干扰问题;文献[6-7]提出了一种基于介质访问控制(Media Access Control, MAC)地址匹配的智能变电站网络设备拓扑动态识别方法。该方法通过交换机 MAC 地址转发表、数据报文和智能变电站全局配置文件(Substation Configuration Description, SCD),实现了智能变电站交换机网络和智能电子设备的拓扑动态识别;文献[8-9]深入研究了电力二次设备在多种报文

收稿日期:2017-03-08;修回日期:2017-05-03。

作者简介:黄鑫(1980—),男,吉林长春人,高级工程师,硕士,主要研究方向:电力系统网络通信;李芹(1976—),女,江苏沭阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向:电力系统网络通信;杨贵(1976—),男,吉林柳河人,高级工程师,硕士,主要研究方向:变电站自动化;竹之涵(1970—),男,浙江嵊州人,工程师,硕士,主要研究方向:电力系统网络通信;李文猛(1989—),男,河南新乡人,工程师,硕士,主要研究方向:电力系统网络通信;施玉祥(1968—),男,浙江宁波人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向:电力系统自动化。



共网共口条件下接收和发送的优化处理机制。在接收方向上针对变电站网络风暴条件下的报文特点,提出多级过滤、分组流量控制的方法实现网络风暴抑制,保证了正常报文的接收和处理;在发送方向上提出了以优先级划分为前提的优化调度发送策略,保证了报文发送的实时性并充分利用了网络带宽;文献[10-13]分别研究了软件定义网络(Software Defined Network, SDN)在智能变电站网络中自适应配置、流量主动监控等技术,分析了SDN在智能变电站中应用研究重点和预期,其中文献[10]利用软件定义技术设计了智能电网控制器,实现流量控制检测、拒绝服务(Denial of Service, DoS)攻击检测和负载均衡检测。虽然这些技术能够实现变电站网络设备的采样同步、即插即用、拓扑可视以及流量控制等功能,提高了变电站网络的运行管理水平,为网络的智能化管理提供了很好的思路,但并没有解决站控层网络与过程层网络统一管理与网络安全隔离相互矛盾的问题,更没有解决变电站改造和设备维护过程中设备兼容性和互换性问题,这些都将成为变电站运维带来困难。

软件定义网络是一种新型网络创新架构,其核心技术OpenFlow通过将网络设备控制面与数据面分离开来,从而实现了网络流量的灵活控制,使网络作为管道变得更加智能。本文通过分析智能变电站网络现状和存在问题,结合SDN技术特点,提出了基于IEC 61850和OpenFlow协议的智能变电站网络模型和网络架构,利用OpenFlow控制器管控并隔离各独立子网,解决了全站网络统一管理与网络间安全隔离需求的矛盾,同时也解决了变电站运维过程中对设备兼容性和互换性的应用需求。

1 智能变电站网络现状分析

目前,智能变电站网络主要有三层两网和三层一网两种结构形式。在智能变电站IEC 61850体系中采用三层两网架构。在这种架构下,全站系统结构清晰,网络之间相对独立,物理隔离,网络安全高;但是,站内有多个物理子网,全站信息共享度低,网络管理困难。

针对这种状况当前各智能变电站设备厂商纷纷研制和开发“三层一网”“共网共口”组网装置,MMS(Manufacturing Message Specification)、GOOSE、SV三种数据流接入同一套物理网络,交换机及光口数量大幅减少。虽然这种网络架构简单,能够做到全站信息共享,但也带来了信息安全和流量控制等问题。目前,智能变电站通信网络存在问题如图1所示。

通过图1本文可以将智能变电站通信网络问题归结为以下两类:1)网络设备(交换机)自身能力不足:问题4、5、7、8反映了交换机对智能站业务感知能力差,未规定标准网络管理协议,兼容性差;2)网络架构需要改进:问题1、2、3、6反映了网络管理、数据共享与网络安全之间的矛盾。

针对上述两点问题,本文提出的基于IEC 61850和OpenFlow协议的智能变电站网络架构能够满足全站网络统一管理与子网间安全隔离需求。

2 基于SDN的智能站网络模型

SDN本质上具有控制和转发分离、设备资源虚拟化和通用硬件及软件可编程三大特性^[14],其在智能变电站通信网络

中的应用,可使智能变电站通信网络设备摆脱对硬件供应商及私有协议的依赖,功能更加专一化;控制器统一对网络设备进行配置,可缩短电力业务的开通时间。电力用户通过对智能站自身特性及所承载业务属性分析,开发相应的网络交换机和控制器功能模型和流表,可以实现网络的即插即用、自动配置以及智能管控等功能。

2.1 网络基本构成

基于SDN的智能变电站网络主要分为网络交换机、SDN控制器和应用程序接口(Application Programming Interface, API)三个部分^[15],具体如图2所示。其中转发平面与控制平面通信采用南向接口协议OpenFlow协议,控制平面和应用平面采用北向接口协议IEC 61850协议,通过采用国际标准协议,解决设备通用互换问题。



图1 智能变电站通信网络存在问题

Fig. 1 Problems in communication network of smart substation



图2 基于SDN的智能站网络基本结构

Fig. 2 Basic structure of smart station network based on SDN

2.2 交换机的功能模型

图3为网络交换机的模型,模型分为4个模块:分别为业务流输入、路径选择(映射/筛选)、排队规则和报文离去,路径选择(映射/筛选)模块和排队规则模块一般由专用芯片完成。

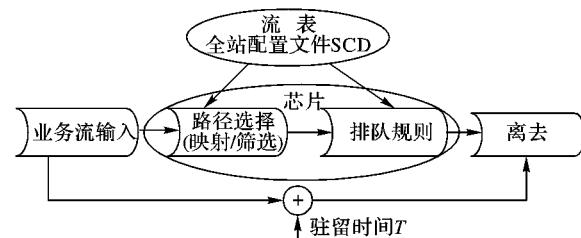


图3 网络交换机功能模型

Fig. 3 Functional model of network switch

针对图3所示的各个模块说明如下:

- 1) 业务流输入模块。主要功能为记录报文进入时刻 T_1 ,以及端口物理特性识别,如光功率、温度等。
- 2) 路径选择(映射/筛选)模块。依据IEC 61850全站配



置文件(SCD)生成的流表规则,对输入业务流进行筛选,流量进行控制,建立端口间关联链路,并建立链路间虚拟隔离通道;业务流特征过程层可以包括:MAC、以太网类型、APPID(Application Identifier)、发送频率、流量等;站控层可包括:TCP(Transmission Control Protocol)及 UDP(User Datagram Protocol)协议属性以及 MMS、NTP(Network Time Protocol)的会话关系等。

3) 排队规则模块。依据 IEC 61850 全站配置文件 SCD 生成的流表规则,对关键报文进行优先排列或建立专属通道,以保证 SV、GOOSE 的实时性。

4) 报文离去模块。记录报文离开时间 T_2 ,并计算出驻留时间 $\Delta T(\Delta T = T_2 - T_1)$,写入报文内部(一般为 SV 报文的 Reserved 字段),并发送出去。驻留时间的计算能够有效解决由于网络延时抖动大,影响采样同步性的问题。

2.3 SDN 控制器功能模型

相对智能变电站通信网络中所有网络设备进行 IEC 61850 建模,再进行第三方分析,SDN 技术可直接借助自身网络操作系统(Network Operation System, NOS)实现对全站通信网络的监控和实时状态监测,不再依赖于第三方安全设备或软件,减少了网络安全成本投入,降低了对不同厂商网络设备的依赖。

应用于智能变电站的 OpenFlow 控制器首先需要安全可靠,能够管控各独立子网,并且使各独立子网仍然保持严格的逻辑隔离,同时兼容 IEC 61850 协议,使其适用于智能变电站应用需求。

OpenFlow 控制器的功能模型主要包括北向接口、服务和应用、南向接口三个部分。其中北向接口协议符合 IEC 61850 协议,与变电站一体化监控系统等应用系统进行协议交互;服务和应用包括变电站网络需要的转发策略、地址转换、QoS(Quality of Service)、镜像以及环网恢复等功能,同时具备接口隔离功能,为满足智能变电站网络配置要求,控制器能够将 SCD 文件描述内容转化为 OpenFlow 流表;南向接口协议符合 OpenFlow 协议,用于流表下发。

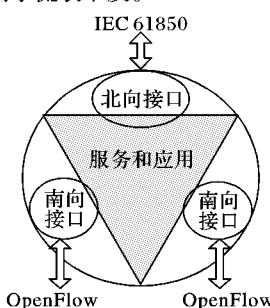


图 4 OpenFlow 控制器功能模型

Fig. 4 Functional model of OpenFlow controller

2.4 API 应用功能需求模型

应用层功能主要从工程建设和运行维护两个方面出发,为电力用户提供订制化管理功能,目前主要用到的管理功能如图 5 所示。工程建设需求包括:网络拓扑发现、网络测试、告警管理、设备管理和文件管理;运行维护需求包括:智能检修、拓扑管理、回路检测、流量管理、告警管理、设备管理、文件管理、安全分析以及业务隔离功能。



图 5 API 应用功能需求

Fig. 5 Functional requirements of API application

3 基于 SDN 的智能变电站网络架构设计

作为 SDN 的核心部分,控制平面的特性对整个网络的性能有非常大影响。通常来讲,软件定义网络的控制平面主要由以下三部分组成:1) 控制平台,控制平台主要负责状态分发,如通过特定的接口从/向转发设备读取/发送状态数据,以及在多个控制器实例间协同网络状态信息;2) 控制应用,控制应用通过使用控制平台提供的编程接口开发而成,负责实现具体的网络控制逻辑;3) 控制网络,控制网络用于在控制平面和转发平面之间传递信息,还用于在不同的控制器实例间传递信息。由于网络故障能够导致 SDN 中网络组件(如控制器或交换机)间的通信中断,进而影响 SDN 的功能,因此提高控制网络的可靠性十分重要^[16-17]。

3.1 独立子网节点分析

智能变电站三层两网架构,网络结构清晰,全站有多个物理子网,网络安全程度很高;考虑到网络安全在智能变电站重要性,本文重点研究基于三层两网架构下的 SDN 网络构,重点解决全站信息共享和网络间安全隔离问题。

以 220 kV 变电站交换机配置原则为例,Q/GDW 393—2009 110(66) kV~220 kV 智能变电站设计规范中规定:1) 站控层(含 MMS、GOOSE)交换机要求:站控层应冗余配置 2 台中心交换机;2) 间隔层宜按设备室或电压间隔配置;3) 过程层网络当 GOOSE 和 SV 均采用网络方式传输,220 kV 电压等级宜每两个间隔配置两台交换机,110(66) kV 电压等级宜每两间隔配 B 网,每个网络交换机数量在 10 台左右,其中中心交换置 2 台交换机。主变各侧可配置 2 台交换机,35 kV 及以下交换机宜接母线段配置^[18]。依据 Q/GDW 393—2009,图 6 为简化的 220 kV 三层两网网络架构。

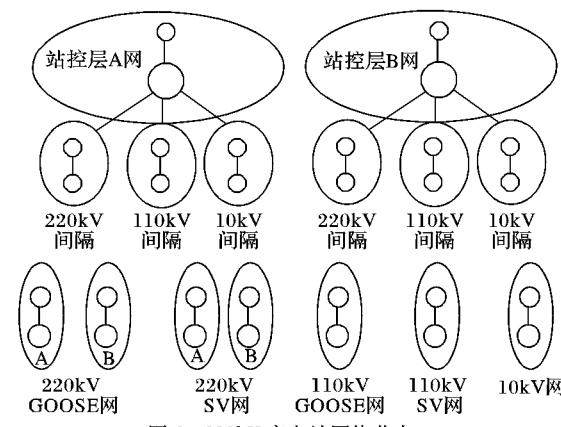


图 6 220kV 变电站网络节点

Fig. 6 Network nodes of 220kV substation

可以看出,智能变电站网络独立子网较多,站控层网络分



为站控层 A 网和站控层 B 网;过程层网络按电压等级划分,一般分为 220 kV GOOSE A 网、220 kV GOOSE B 网、220 kV SV A 网、220 kV SV B 网、110 kV GOOSE 网和 110 kV SV 网,每个网络 2~3 台交换机。

根据以上原则,将网络简化为图 6 所示,在现有的智能站三层两网架构中,网络采用星形接线、A/B 网冗余方式,充分考虑了网络的可靠性问题。

3.2 网络架构设计

智能变电站网络架构设计主要考虑控制器的部署位置、网络路径的冗余配置和子网间安全隔离三个方面。

1) 控制器的部署位置:由于控制器既要控制站控层网络,又要控制过程层网络,同时保证站内架构清晰,以此将控制器设计在间隔层;再考虑到控制器对过程层网络的控制,以及连接线缆的便捷性,将控制器设计在主变保护间隔。

2) 网络路径的冗余配置:由于星形网络不具有数据通信路径冗余功能,考虑到网络控制路径冗余性,需要至少 2 台以上控制器部署在网络的不同交换机上,以实现控制路径的冗余。

3) 子网间安全隔离:控制器部署后的网络架构如图 7 所示,考虑到网络隔离和安全性需求,SDN 控制器在各子网间应当满足严格逻辑隔离要求,这一点需要在控制器设计中各独立接口采用独立控制芯片。

本文研究的基于 SDN 的智能变电站网络架构,满足三层两网的智能站网络架构要求,符合智能变电站设计规范,网络结构清晰,采用星形接线、A/B 网冗余方式,充分考虑了网络的可靠性问题;其中 SDN 控制器采用多端口设计,布置于变电站间隔层,各端口间严格逻辑隔离,满足各子网内业务流和子网间控制流通信需求。在第 4 章将对 SDN 控制器对网络隔离和数据过滤的有效性进行验证。

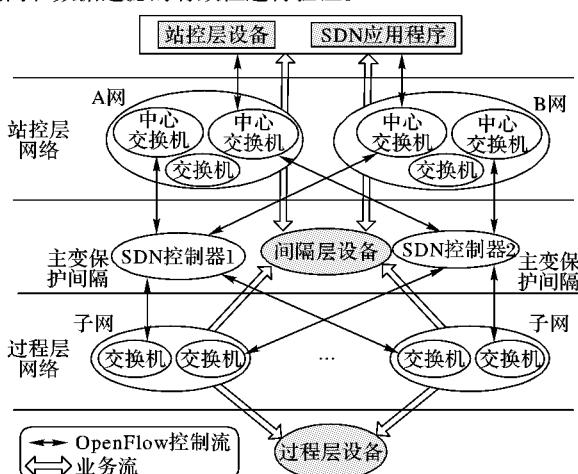


图 7 基于 SDN 的智能变电站网络架构
Fig. 7 Network architecture of smart substation based on SDN

4 测试验证

目前国内还没有智能变电站工业交换机支持 OpenFlow 协议,因此本项目在研究过程中挑选了一款支持 Openflow 协议的商用交换机,采用开源 SDN 控制器进行适合智能变电站应用的流表开发^[19],搭建了测试验证平台,进行了 SV、GOOSE 数据转发和网络隔离验证。智能变电站 OpenFlow 流表设计流程如图 8 所示。

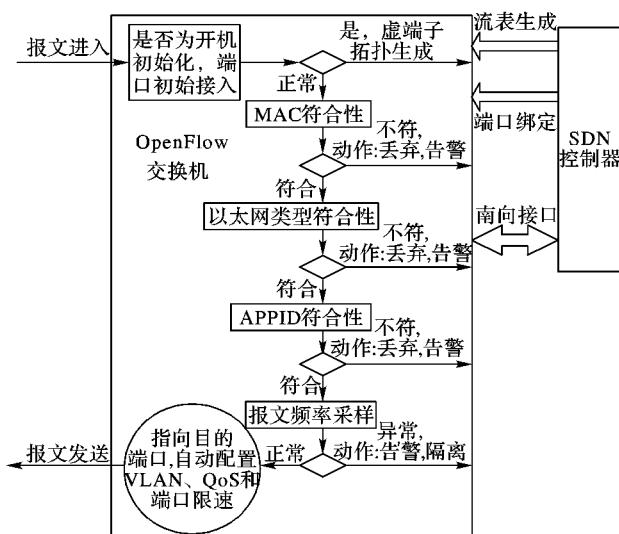


图 8 OpenFlow 流表设计
Fig. 8 Flow graph design of OpenFlow

为便于实验验证,测试裁剪了某 330kV 智能变电站全站配置文件 SCD,仅保留了 4 种 IED (Intelligent Electronic Device) 设备,发送 SV、GOOSE 的组播地址分别为:

- A:01-0C-CD-04-00-20
- B:01-0C-CD-01-00-30
- C:01-0C-CD-01-00-31
- D:01-0C-CD-04-00-21

通过 SDN 控制器下发组表和流表项,指定流量输出端口,实现 SV、GOOSE 报文的订阅关系。下发组表和流表的语句示例如下。

组表示例:

```
{
  "version": "1.3.0",
  "group": {
    "id": 1,
    "type": "all",
    "command": "add",
    "buckets": [
      {
        "weight": 0,
        "watch_group": 4294967295,
        "watch_port": 4294967295,
        "actions": [{"output": 26}]
      },
      {
        "weight": 0,
        "watch_group": 4294967295,
        "watch_port": 4294967295,
        "actions": [{"output": 27}]
      }
    ]
  }
}
```

流表示例:

```
{
  "flow": {
    "priority": 1,
    "table_id": 0,
    "idle_timeout": 60,
    "match": [
      {"eth_dst": "00:00:cd:04:00:20"]
    ],
    "instructions": [
      {"write_actions": [{"group": 1}]}
    ]
  }
}
```

在示例中,将交换机的端口 26、27 作为组表 group 1 的动



作输出端口,可类比为传统交换机的组播转发端口。实验验证拓扑如图 9 所示。

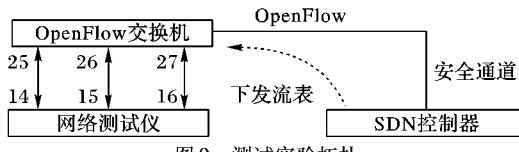


Fig. 9 Topology of test experiment

网络测试仪端口 13~15 分别连接交换机端口 25~27, 测试仪端口 13 模拟 4 种 IED 设备的流量进行流表转发项的验证。

SDN 控制器与交换机建立安全通道后, 向交换机下发组表和流表。测试过程中, 先下发组表和 A、B 两条流表, 测试仪发送流量验证 OpenFlow 流表配置的正确性及流量数据统计的准确性。SDN 控制器上查询到的组表、流表以及测试仪的测试结果分别见图 10~12。

Datapath 00:01:70:ba:ef:6c:26:b2					
概要		端口		流表	
				组表 ID	
A11					显示组表
		组表 ID	类型	属性	
		0	权重	监视组	监视端口
		0	0	4294967295	Output:26
				0	4294967295
					Output:27

图 10 SDN 控制器上的组表

Fig. 10 Group table on SDN controller

Datapath 00:01:70:ba:ef:6c:26:b2					
概要		端口		流表	
				显示流表 匹配项	
0	30000	103344	13228032	dst:01:0c:cd:04:00:20	Write-actions;group:1
0	30000	2584	330752	dst:01:0c:cd:04:00:30	Write-actions;group:1

图 11 SDN 控制器上的流表

Fig. 11 Flow table on SDN controller

Basic Counters Errors Basic Sequencing Advanced Sequencing Histograms					
Name/ID	Tx Port Name	RX Port Names	TX Count (Frames)		RX Count (Frames)
01-0C-CD-04-00-20:65530	Port//1/13	Port//1/14, Port//1/15	103,344	205,698	
01-0C-CD-04-00-21:65537	Port//1/13		103,944	0	
01-0C-CD-01-00-30:65538	Port//1/13	Port//1/14, Port//1/15	2,584	5,168	
01-0C-CD-01-00-31:65539	Port//1/13		2,584	0	

图 12 SDN 控制器实验结果

Fig. 12 Experimental result on SDN controller

从图 10~12 中可看出, 数据按流表和组表正确转发到分配的接口, 每条流量的转发可按字节和包数分别进行统计。流表中没有的条目, 数据不会转发。

继续下发 C、D 两条流表, 发送相同的流量验证, 在交换机上查询到的组表、流表如下, 测试结果见图 13。

1) 交换机上的组表数据如下。

Instance 1 group table information:

Group count: 1

Group entry 1:

Type: All, byte count: --, packet count: --

Bucket 1 information:

Action count 1, watch port: any, watch group: any

Byte count --, packet count --

Output interface: XGE1/0/26

Bucket 2 information:

Action count 1, watch port: any, watch group: any

Byte count --, packet count --

Output interface: XGE1/0/27

Referenced information:

Count: 4

Flow table: 0

Flow entry: 18, 19, 20, 21

2) 交换机上的流表数据如下。

Flow entry 18 information:

Cookie: 0X0, priority: 30000, hard time: 0, idle time: 0, flags: none, Byte count: 19988608, packet count: 156161

Match information:

Ethernet destination MAC address: 010c-cd04-0020

Ethernet destination MAC address mask: ffff-ffff-ffff

Instruction information:

Write actions:

Group: 1

Flow entry 19 information:

Cookie: 0X0, priority: 30000, hard time: 0, idle time: 0, flags: none, Byte count: 499840, packet count: 3905

Match information:

Ethernet destination MAC address: 010c-cd01-0030

Ethernet destination MAC address mask: ffff-ffff-ffff

Flow entry 20 information:

Cookie: 0X0, priority: 30000, hard time: 0, idle time: 0, flags: none, Byte count: 169088, packet count: 1321

Match information:

Ethernet destination MAC address: 010c-cd01-0031

Ethernet destination MAC address mask: ffff-ffff-ffff

Flow entry 21 information:

Cookie: 0X0, priority: 30000, hard time: 0, idle time: 0, flags: none, Byte count: 6760576, packet count: 52817

Match information:

Ethernet destination MAC address: 010c-cd01-0021

Ethernet destination MAC address mask: ffff-ffff-ffff

3) 交换机上的实验数据如图 13 所示。

由图 13 可看出, 进入交换机的数据严格按照组表和流表项转发, 并能实现同类数据流量的累加统计。

Basic Counters Errors Basic Sequencing Advanced Sequencing Histograms					
Name/ID	Tx Port Name	RX Port Names	TX Count (Frames)		RX Count (Frames)
01-0C-CD-04-00-20:65530	Port//1/13	Port//1/14, Port//1/15	52,817	105,634	
01-0C-CD-04-00-21:65537	Port//1/13		52,817		
01-0C-CD-01-00-30:65538	Port//1/13	Port//1/14, Port//1/15	1,321	2,642	
01-0C-CD-01-00-31:65539	Port//1/13	Port//1/14, Port//1/15	1,321		

图 13 交换机实验结果

Fig. 13 Experimental result on switch

以上实验证明, Openflow 交换机和开源的 SDN 控制器通过简单的流表编辑和下发即可完成 SV/GOOSE 数据流的特定转发, 由 SDN 控制器调度交换机的转发动作, 实现控制平面与转发平面解耦, 交换机没有复杂的功能配置, 数据进入交换机后直接根据流表进行转发, 提高了交换机的转发效率, 也不会出现数据拥塞的情况, 在某种程度上实现了交换机的“即插即用”和安全隔离。实验结果表明, 提出的基于 SDN 的智能站网络架构, 在流量控制和数据安全隔离方面, 实现了基于业务类型和流量的精准控制, 对于提升变电站运行和维护水平有着非常重要的应用价值。

5 结语

从网络技术的发展来看, SDN 提出的流量转发与控制的分离技术, 有利于专用网络的业务部署, 用户可以自定义来实现网络路由和传输规则策略, 从而使网络更加灵活和智能。本文针对智能站网络统一管理、子网间安全隔离以及设备兼容性、互换性的应用需求, 提出了一种基于 SDN 技术的变电



站网络架构,将 IEC61850 和 OpenFlow 协议用于网络架构设计,利用 OpenFlow 控制器管控和隔离各独立子网,实现了网络设备管理和子网安全隔离,对于提升变电站运行和维护水平有着非常重要的应用价值。IEC 61850 体系 SCD 文件中规定了全站 IED 设备之间的订阅关系,展望 SDN 技术在智能变电站的应用,对于面向智能变电站应用的 SDN 控制器设计,使 SCD 文件转化为高效的流表来调度全站网络数据,将成为 SDN 网络在智能变电站应用的重点和难点。

参考文献 (References)

- [1] 黄鑫. 智能变电站网络交换机发展综述与技术验证 [J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(5): 6–11. (HUANG X. Overview of development and technical verification of network switch in smart substations [J]. Electric Power ICT, 2015, 13(5): 6–11.)
- [2] 荀思超, 沈雨生, 王小波, 等. SDN 在新一代智能变电站通信网中的应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(1): 49–52. (XUN S C, SHEN Y S, WANG X B, et al. The application of SDN in next-generation smart substation communication network [J]. Electric Power ICT, 2016, 14(1): 49–52.)
- [3] 曹军威, 王继业, 明阳阳, 等. 软件定义的能源互联网信息通信技术研究 [EB/OL]. [2016-11-22]. http://web.mit.edu/~caoj/www/pub/doc/jcao_j_sdnei.pdf. (CAO J W, WANG J Y, MING Y Y, et al. Soft-defined information and communication technology for energy Internet [EB/OL]. [2016-11-22]. http://web.mit.edu/~caoj/www/pub/doc/jcao_j_sdnei.pdf.)
- [4] 张延旭, 蔡泽祥, 竹之涵, 等. 基于传输延时补偿的继电保护网络采样同步方法 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 81–85. (ZHANG Y X, CAI Z X, ZHU Z H, et al. Network sampling synchronization of relay protection based on transmission delay compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 81–85.)
- [5] 杨贵, 吕航, 袁志彬, 等. 智能变电站过程层网络流量控制和同步方法研究与实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 70–74. (YANG G, LYU H, YUAN Z B, et al. Research and realization of intelligent substation process level network flow control and synchronization method [J]. Electric Power ICT, 2015, 43(11): 70–74.)
- [6] 高磊, 杨毅, 卜强生, 等. 基于 MAC 地址匹配的智能变电站网络设备拓扑动态识别 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 81–84. (GAO L, YANG Y, BU Q S, et al. Dynamical topology identification of smart substation network equipment based on MAC address matching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 81–84.)
- [7] 刘颖. 智能变电站全寿命周期“即插即用”技术体系的研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 23–28. (LIU Y. Research and application on the technology system of plug & play in the smart substation's life cycle [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 23–28.)
- [8] 周华良, 郑玉平, 姚吉文, 等. 面向智能变电站二次设备的网络报文管控技术 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 96–100. (ZHOU H L, ZHENG Y P, YAO J W, et al. Network packet control technology for secondary equipment in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 96–100.)
- [9] 刘玮, 王海柱, 张延旭. 智能变电站过程层网络报文特性分析与通信配置研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 110–115. (LIU W, WANG H Z, ZHANG Y X. Study on message characteristics and communication configuration of process layer network of intelligent substation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 110–115.)
- [10] 沈海平, 陈孝莲, 沈卫康. 利用软件定义网络的智能电网控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(9): 3045–3048. (SHEN H P, CHEN X L, SHEN W K. Design of smart grid controlling system based on IEC61850 by using SDN framework [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(9): 3045–3048.)
- [11] MAZIKU H, SHETTY S. Software defined networking enabled resilience for IEC 61850-based substation communication systems [C]// Proceedings of the 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 690–694.
- [12] LEAL E A, BOTERO J F. Transforming communication networks in power substations through SDN [J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(10): 4409–4415.
- [13] VARGAS C A, CARMONA-RODRIGUEZ C. Software defined networking for electrical substations based on IEC 61850 [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–6.
- [14] 邢宁哲, 吴舜, 万莹, 等. SDN 技术在电力企业的探索与研究 [C]// 2014 电力行业信息化年会. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 410–412. (XING N Z, WU S, WAN Y, et al. Exploration and research on the SDN technology in electric power companies [C]// Proceedings of the 2014 Annual Meeting of Electric Power Industry Informatization. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 410–412.)
- [15] 杨松. 面向自感知网络的测试关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 13–15. (YANG S. Research on self-aware network oriented test key technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 13–15.)
- [16] 张朝昆, 崔勇, 唐嵩伟, 等. 软件定义网络(SDN)研究进展 [J]. 软件学报, 2015, 26(1): 62–81. (ZHANG C K, CUI Y, TANG H Y, et al. State-of-the-art survey on Software-Defined Networking (SDN) [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 62–81.)
- [17] 左青云, 陈鸣, 赵广松, 等. 基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究 [J]. 软件学报, 2013, 24(5): 1078–1097. (ZUO Q Y, CHEN M, ZHAO G S, et al. OpenFlow-based SDN technologies [J]. Journal of Software, 2013, 24(5): 1078–1097.)
- [18] 国家电网公司. 110(66)kV~220kV 智能变电站设计规范 [EB/OL]. [2016-12-16]. <https://wenku.baidu.com/view/818d4a7e844769eae009edd4.html>. (State Grid Corporation of China. Specifications of design for 110(66)kV~220kV smart substation [EB/OL]. [2016-12-16]. <https://wenku.baidu.com/view/818d4a7e844769eae009edd4.html>.)
- [19] 张卫峰. 深度解析 SDN 利益、战略、技术、实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 67–71. (ZHANG W F. SDN Interest, Strategy, Technology and Practice [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 67–71.)

HUANG Xin, born in 1980, M. S., senior engineer. His research interests include power system network communication.

LI Qin, born in 1976, M. S., senior engineer. Her research interests include power system network communication.

YANG Gui, born in 1976, M. S., senior engineer. His research interests include substation automation.

ZHU Zhihan, born in 1970, M. S., engineer. His research interests include power system network communication.

LI Wenmeng, born in 1989, M. S., engineer. His research interests include power system network communication.

SHI Yuxiang, born in 1980, M. S., professor-level senior engineer. His research interests include power system automation.