基于 SDN 的电力通信网络关键技术综述

吴路明[1,2]，裘愉涛[3]，陈　琦[1,2]
（1. 国电南京自动化股份有限公司，江苏 南京 210000；2. 南京国电南自电网自动化有限公司，江苏 南京 210000；3. 国网浙江省电力有限公司，浙江 杭州 310000）

摘　要：随着智能电网和能源互联网的不断深入发展和推进，云计算、数据仓库、数据挖掘以及虚拟化等技术在电力行业的成熟应用，现有电网已无法满足业务的需求。软件定义网络（software defined network，SDN）作为新兴网络架构实现了控制功能和数据转发功能的解耦，是未来电力通信网络架构的选择之一。文中通过对 SDN 网络原理的论述，详细讨论了基于 SDN 的电力通信网络需要解决的关键技术，主要包括网架性能、安全性、时延、可扩展性、链路可靠性、容错性和兼容性，最后展望了软件定义网络相关技术在电力系统中的应用领域。

关键词：软件定义网络；SDN；电力通信；时延性；可扩展性；容错性
中图分类号：TM734　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2096-3203（2018）03-0134-11

0　引言

随着智能电网和能源互联网的不断深入发展和推进，云计算、数据仓库、数据挖掘以及虚拟化等技术在电力行业的成熟应用，基于 IP 的简洁网络架构日益臃肿且越来越无法满足高效、灵活的业务承载需求，网络发展面临一系列问题：全局优化的流量调度问题、精细化的流量操控问题、与上层应用的深度结合问题以及网络功能多样化后带来的传统设备实现困难、成本高昂的问题等[1]。并且，扰动信息、电力设备状态等新信息的爆发式增长和新型技术及设备的应用对电力系统的信息实时传输性能和网络的快速兼容性造成了巨大的挑战。

因此，当前的电力系统迫切需要引入新的技术和架构，提高网络的灵活性，以满足定制化需求。为从根本上摆脱上述网络困境，软件定义网络（software defined network，SDN）凭借其极其优越的性能（控制平台逻辑集中、通用硬件及软件可编程、控制和转发分离）受到了业界的广泛关注。

1　电力通信业务现状

目前，电力通信网络主要由基于时分多路复用技术的同步数字序列（synchronous digital hierarchy，SDH）专网、基于 IP 技术的调度数据网和综合数据网组成。其通信业务[2-3]如表 1 所示，典型电力业务的通信性能需求如表 2 所示[2]。目前电力系统所使用的双网电力通信架构[3]如图 1 所示。结合电力业务和电网的发展规划，现有的电力通信网的不足主要体现在以下几个方面。

收稿日期：2018-01-21；修回日期：2018-02-27

表 1　电力通信业务分类

Tab.1　Services of the electric power telecommunication

继电保护业务、调度自动化业务 调度数据网、调度交换网		生产管理类业务 综合数据网、行政交换网
安全Ⅰ区 实时业务系统	安全Ⅱ区 非实时业务系统	安全Ⅲ、Ⅳ区生产管理及管理信息业务系统
（1）继电保护系统 （2）安全自动控制系统 （3）暂态事件记录（故障录波等） （4）能量管理系统（EMS） （5）厂站自动化监控系统（SCADA） （6）广域相量测量系统（WAMS） （7）配网自动化系统 （8）电力市场运营系统（MOS）	（1）调度电话 （2）电能量培训系统 （3）调度员培训系统 （4）故障信息管理系统 （5）电力市场运营（交易、结算、考核、内网评价）	（1）生产管理系统（PMS） （2）行政电话、电视电话会议 （3）企业经营管理系统 （4）企业资源计划管理系统（ERP） （5）资产全寿命管理系统（EAM） （6）办公自动化系统（OAS） （7）公司财务及财务审计系统 （8）劳动及安全监察系统 （9）办公及教育培训系统 （10）企业一体化信息平台（EAI） （11）地理信息系统（GIS）

表 2　典型电力业务的通信性能需求

Tab.2　The performance requirements of the typical electric power services

业务类型	带宽	时延	安全性
继电保护	64 kbit/s，2 Mbit/s	4 ms 以内	很高
电量数据采集	64 kbit/s	几秒以内	很高
变电站视频监控	10/100 Mbit/s	实时业务	中等

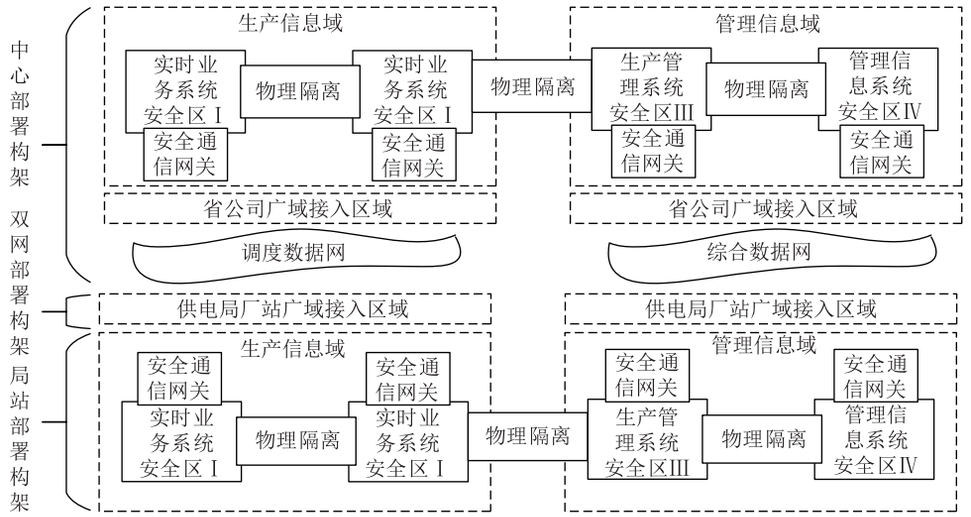


图 1 电力通信双网基础架构

Fig.1 Thedual-network architecture of the electric power telecommunication

1.1 网架性能

电网智能化的建设和发展促使电网生产、运行、管理、经营等大规模全过程的监测、控制、分析、计算逐步向动态化、在线化、智能化、全过程化转化,通信业务也从电话、数据向视频、多媒体等宽带业务发展。这导致了电网在各个环节增加了大量的信息采集、监测和传输点。电网核心业务数量及业务流量不断上升[4],网架性能的增长速度已无法匹配和信息量的增长速度。

此外,电网公司“三纵三横一环网”的特高压电网架构方案的实施,引发大电网的协同控制范围日趋增大,进而导致承载电网的通信性能需要能够跳跃式增长,表 3 即为最新的精准负荷控制系统对时延的需求。通过现有电力通信网络的分析,可以发现传统网络的 TCP(transmission control protocol)建立连接困难,TCP 协议传输低效的缺点制约了电网通信性能的提高。

并且,伴随电网公司系统 SG-ERP 平台及数据容灾中心建设[4],传统的计算/数据中心网络中存在的 IP 地址重叠、跨子网虚拟机迁移及跨数据中心业务迁移困难、STP(spanning tree protocol)和 MSTP(multiple spanning tree protocol)技术收敛速度慢、无法为多租户提供等截面带宽、链路的实际利用率很低(平均只有 30%~40%)等问题[5]导致现有电力通信网的传输性能、管控性能愈发难以满足要求。

1.2 安全可靠性

现有电力通信网络中设备种类繁多,相关标准和接口协议无法实现标准化,增加了网络管理和维护的复杂性,加大了网络安全防护压力。

并且,在能源互联网通信网络大规模延伸的场景下,电力通信网络需提供的新特性为:规定时间内以很高概率保持路由路径的不变性。而目前的电力通信网 IP 化后,当电力通信网处于高负荷运行状态时,交换器丢弃某些重要业务如调度与监控报文会对电网产生巨大的影响。

表 3 精准负荷控制系统时延需求

Tab. 3 Time delay demand of precise load control system

控制模式	时延需求	时延构成	备注
毫秒级	150 ms		故障信息采集及决策时间
	50 ms	30 ms	协控中心站经控制中心站、控制主站至子站传输时间
		20 ms	子站到用户终端传输时间
	150 ms		用户侧转接装置延时时间
	300 ms		分路开关跳开时间
秒级	5 s	3 s	故障信息采集时间
		2 s	故障、越限判断时间
	0 s		不经辅助决策
	2.3 s	1 s	指令返校时间
		0.2 s	指令读取时间
		0.5 s	策略调用时间
		0.6 s	指令从前置发出时间
	1.1 s		指令传输到负控终端时间
	0.3 s		分路开关跳开时间
分钟级	5 s	3 s	故障信息采集时间
		2 s	故障判断时间
	5 min		实时辅助决策时间
	4.8 s	1 s	指令返校时间
		0.2 s	指令读取时间
		3 s	策略生成时间
		0.6 s	指令从前置发出时间
	1.1 s		指令传输到负控终端时间
	0.3 s		分路开关跳开时间

1.3 运维复杂性

基于电网建设的长期性,电网公司需要面对大量不同生产厂家、不同时间批次、不同类别设备的采购、设计、集成、部署、维护运行、升级改造,并且伴随“三集五大”等体系建设的推进,通信网络的运维复杂度日益增加[6]。

1.4 兼容扩展性

目前电力系统往往采用专用架构的通信设备来保证网络的安全性。这导致目前电力通信网络是复杂而刚性的,由大量单一功能的、专用网络节点和碎片化、昂贵、专用的硬件设备构成,进而导致资源不能共享,业务难融合[6]。并且,智能电网和能源互联网的网络扩张以及电力市场等新兴业务种类的持续增加要求电力通信网架能够迅速兼容新业务、新技术和新设备。

2 软件定义网络

SDN 起源于 2006 年斯坦福大学的 Clean Slate 研究课题。2008 年,OpenFlow 概念(即将传统网络设备的数据平面和控制平面两个功能模块相分离,通过集中式的控制器以标准化的接口对各种网络设备进行管理和配置)被详细提出,2009 年,Mckeown 教授正式提出了 SDN 概念:SDN 是一种新兴的、控制与转发分离并直接可编程的网络架构,其核心是将传统网络设备紧耦合的网络架构解耦成应用、控制、转发三层分离的架构,并通过标准化实现网络的集中管控和网络应用的可编程,目前广泛应用的架构有 SDN 和 NFV,如图 2 和图 3 所示[7]。

目前,SDN 的标准化组织主要有:开放网络基金会(open networking foundation,ONF)、欧洲电信标准化协会(european telecommunications standards institute, ETSI)、国际互联网工程任务组(the internet engineering task forcem, IETF)、中国通信标准化协会(China communications standards association, CCSA)、城域以太网论坛(metro ethernet forum, MEF)和国际电信联盟电信标准分局(ITU-T for ITU telecommunication standardization Sector, ITU-T)[8],主流架构有 OpendayLight,如图 4 所示。其特征主要包括:(1) 控制功能与数据转发功能解耦合,提高了复杂协议的运算效率和收敛速度;(2) 网络控制平面集中化,简化了运维复杂度,增加了管控的灵活性;(3) 统一化的数据转发硬件平台,有利于网络的智能化、自动化和硬件的标准化,降低了网络运营的复杂性和恶意端口的接入数量[9]。

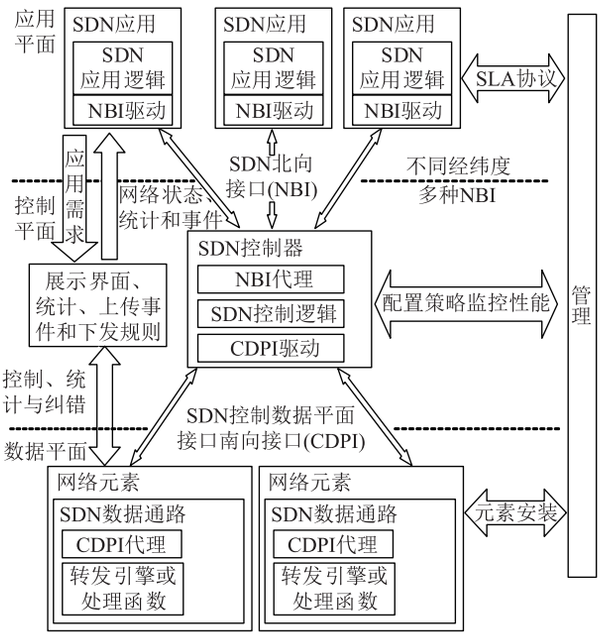


图 2 SDN 架构体系

Fig.2 The architecture of the SDN

网络功能虚拟化(network function virtualization,

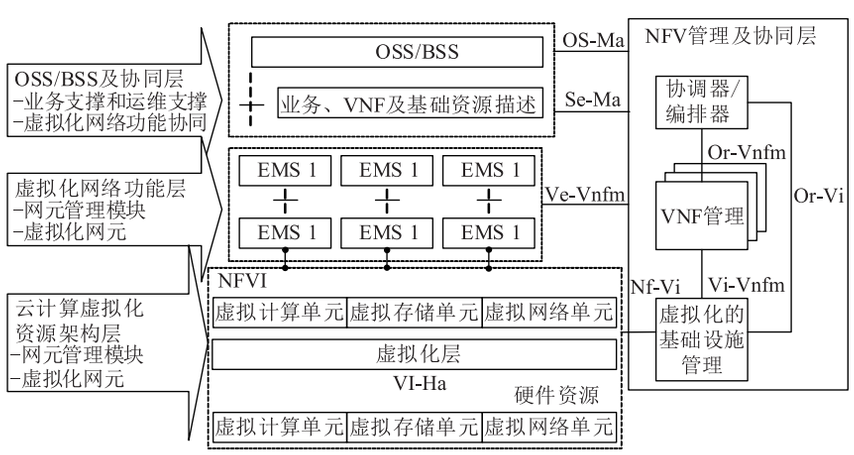


图 3 NFV 架构体系

Fig.3 The architecture of the NFV

NFV)技术的提出是基于现有专用通信设备的标准化不足特性。NFV 试图通过标准的 IT 虚拟化技术,把网络设备统一到工业化标准的高性能、大容量的服务器,交换机和存储平台上,其主体架构如图 4 所示[10]。NFV 的最大特点是可以将网络功能软件化,能根据需要随意布置服务器而不需要部署新的硬件设备,这也使其能够同时适用于有线和无线网络。

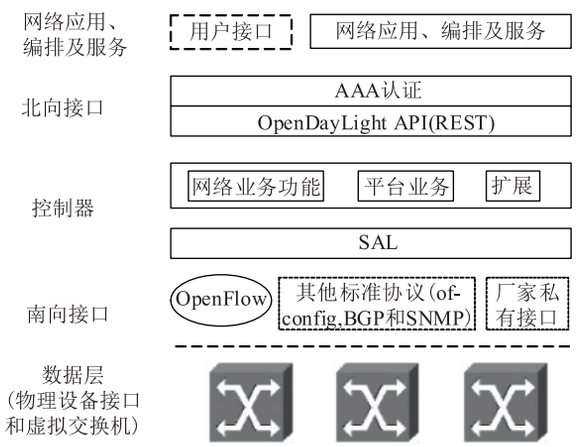


图 4 OpenDayLight 架构体系

Fig.4 The architecture of the OpenDayLight

从接口协议上看,SDN 主流的南向接口协议 OpenFlow 如图 5 所示[11],OpenFlow 网络主要包括 3 个部分:Open flow 交换机、Flow Visor 及控制器 Controller。而北向接口(northbound interface,NBI)是直接为业务应用服务的,其设计与业务应用的需求紧密相关,具有多样化的特征。目前市面上已经出现了 20 余种不同的控制器,对外提供的接口不完全相同,这说明 NBI 标准还没有完全统一。业内 SDN 基本以 SDN/NFV 为基础,为 SDN 扩展及北向协议补充,这是由于 SDN 和 NFV 的技术基础是一致的,都源于通用服务器、云计算和虚拟化技术,两者的联系如图 6 所示[12]。

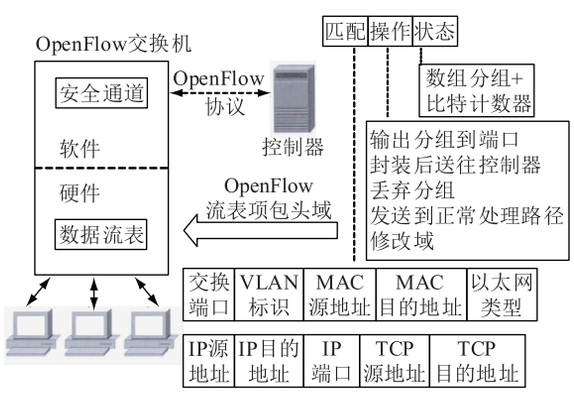


图 5 OpenFlow 协议

Fig.5 The protocol of the OpenFlow

鉴于 SDN/NFV 技术的巨大优越性,将 SDN 应

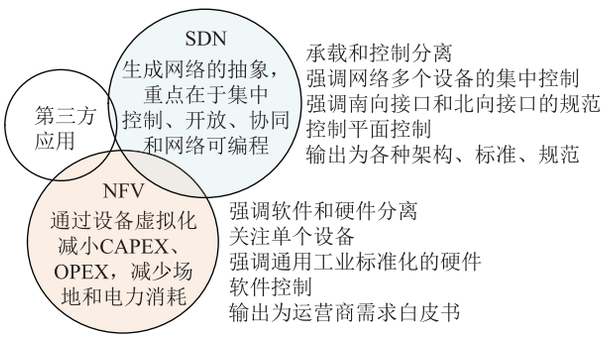


图 6 SDN 与 NFV 之间的联系

Fig.6 The relation between the SDN and NFV

用于电力通信网可以极大地改变目前电力通信网所面临的严峻考验,其影响主要体现在以下方面。

2.1 电力通信网性能提升

以 SDN 通信网为骨干网的电力通信网可以从流量控制、差异化处理、资源虚拟化分配等角度[13]优化电力通信骨干网的传输及管控能力,也可以充分调用现有公司网络资源的能力。

而海量节点与海量数据是接入网的主要特征,通过引入 SDN,可以实现接入节点的统一管理和维护,便于电力行业新业务的快速部署。新业务和新特性的部署均能通过流表的部署来快速添加,极大提高了效率。

并且,SDN 电力通信网中的信息的传输路径可通过控制功能与数据转发功能解耦合实现最优化,网络的延时等网络效率性能可得到极大提高。

2.2 建设和运维复杂度降低

目前,调度数据网运维工作主要包括故障管理、变更管理、配置管理、访问控制管理等内容[6],基于目前电力通信网络中各种不同设备和协议共存的现状,电力通信网络迫切需求标准化的网络架构和网络设备。此外,目前的电力通信网络在应对智能电网条件下大规模用于接入和精细化管理要求上显得力不从心,而 SDN 网络能够统一进行流表配置,总体上能够得到最优化。最后,基于标准化的 SDN 电力通信网络在电力通信网的扩建和灾后恢复上具有极大优势。

2.3 电力数据中心效率增长

随着智能电网进度的推进,设备数目的扩大、部署业务的种类和数量的增加和信息系统灾备业务的庞大数据占用了现在已经日趋紧张的带宽量。与此同时,在提倡节约型社会的背景下,电力数据中心的不断增长的能耗也将被纳入考核之内。

SDN/NFV 的虚拟化能力强,能够高效地管理和运维数据中心网络,能够智能进行虚拟机部署和迁移,在资源优化配置和弹性调度上具有高效性。

3 基于 SDN 的电力通信网络的关键技术

SDN 原理及特征表明基于 SDN 的新型电力通信网络理论上将能够很好地解决目前电力通信网络中存在的问题。但是,以下关键技术的研究与应用将影响基于 SDN 的电力通信网络的建设。

3.1 安全性

电力通信网中,存在诸多对通信安全要求很高的业务,甚至涉及电力系统敏感信息,但是电力系统内部数据共享、业务融合导致的交互共享导致网络攻击的形式发生了改变,高度动态用户资源的安全风险进一步扩大。SDN 的集中管控特性和开放性给传统通信网络带来了不一样的安全特性。

目前,我国的电力通信网络不是一个宽带综合业务网络。它是由国家电力通信传输网、国家电力数据网及国家电力信息网所组成[14],主要业务分别对应话音、实时数据和信息应用。

针对该通信架构,通信网络安全通常包括承载网与业务网的安全、网络服务安全以及信息传递安全;且其安全威胁主要表现在对抗攻击方面,主要分为以下 3 类:(1) 非法利用,包括秘密使用电力通信网络资源、非法骚扰和犯罪;(2) 秘密侦测是,包括秘密侦听电力通信网络的通信内容、秘密侦测网络参数、在电力通信网络中建立侦测环境、通过电力通信网络侦测信息系统;(3) 恶意破坏,包括电磁干扰(例如劣化或阻断电磁信号)、恶意业务量拥塞电力通信网络(例如秘密制造虚伪的大话务量、释放蠕虫)、恶意控制破坏电力通信网络的支持网络和破坏电力通信网络设施[15]。

作为新兴的网络架构,与传统网络相比,SDN 网络对目前的安全模型有了较大的冲击。在传统网络中,防火墙等安全设备在网络中的位置是固定的关键位置,信息流被强制性地从这些安全设备总流过。而 SDN 则是一个流规则驱动型网络,信息流的路径完全由流规则决定,预先部署的物理安全设备及其防护措施失去了防护作用。

在网络安全态势信息的获取方式上,传统网络需要向多个设备发送请求信息,然后在收到信息后再进行综合评估当前的态势信息。而 SDN 网络在本质上已经建立了整个网络的全局视图,其安全态势信息可以直接从控制器中获取[16]。与此同时,这种便捷性带来的是可以被攻击者获取到更多的网络信息而造成更大规模的攻击。

SDN 架构实现传统网络架构总网络管理功能的集中。这种创新虽然带来管理和运维的灵活性,但其也带来特有的安全威胁,主要包括流规则的合法性和一致性问题、控制器的脆弱性、控制器和应用程序之间缺乏信任机制和控制层-基础设施层之间的威胁(如 OpenFlow 协议的安全性)等问题[16]。

在流规则的合法性和一致性问题上,主要表现形式为:(1) 控制器上同时运行着多个自定义或第三方提供的应用程序,这些应用程序生成的流规则之间可能出现相互竞争、彼此冲突或覆盖的情况;(2) 流规则在下发时,由于时延或被攻击者恶意篡改等原因,使得控制器和交换机流规则不一致;(3) 不同控制器之间缺乏有效、安全的流规则同步方案。

在控制器的脆弱性上,主要表现形式为:(1) SDN 中最严重的威胁、故障或恶意的控制器可使整个 SDN 网络受到威胁;(2) 常规入侵检测系统(intrusion detection systems,IDS) 技术很难发现 SDN 中某个具体攻击的发起者,尚不足以保证 SDN 的安全。

在控制器和应用程序之间缺乏信任机制上,主要表现形式为:(1) 控制器和应用程序之间缺乏有效的信任评估和信任管理机制;(2) 验证网络设备是否安全的技术和验证应用程序是否安全的技术并不相同;(3) 恶意应用程序可以轻易地被开发,已授权的合法应用程序也可能被篡改,并应用于控制器上。

在控制层-基础设施层之间的威胁上,主要表现形式为:(1) 主要指南向接口协议面临的安全威胁,如拒绝服务攻击(denial of service,DoS)、分布式拒绝服务(distributed denial of service,DDoS)攻击或数据窃取等;(2) 安全传输层协议(transport layer security,TLS)、安全套接层(secure sockets layer,SSL)加密的基础是公钥基础设施(public key infrastructure,PKI),不足以保证交换机与控制器之间的安全通信。

在局域网的接入控制及网络监督上,传统网络的基本做法是基于 IEEE 802.1Q 协议,其方法配置和接入控制方案较为复杂,而 SDN 的控制器能够通过便捷有效的管理功能模块在底层就拒绝不符合要求的数据包。

在攻击检测和网络溯源上(例如针对 DDOS 攻击),传统网络的识别过程会造成巨大的开销压力。而 SDN 得益于其可编程性,可通过控制器的转发功能将数据转发到特定的流量识别器上,从而避免在遭受攻击的时候影响网络的正常运行。

针对 SDN 中存在的各种典型安全问题,现有解决方案的主要思路主要有:(1) SDN 安全控制器的

开发;(2) 控制器可组合安全模块库的开发和部署;(3) 控制器 DoS/DDoS 攻击防御;(4) 流规则的合法性和一致性检测[16];(5) 北向接口的安全性;(6) 应用程序安全性[16-18];(7) 安全策略:基于交换机安全等级(性能、被攻击历史、实时带宽等)划分的安全路由策略等[19];(8)交换机洗牌[20];(9) 基于端口跳变等。

3.2 时延

当数据包经过控制器转发,向另一个节点发送时,总体的传输时延主要包括以下几种延时类型:(1) 传输时延,数据包在链路上传输的时延;(2) 处理时延,控制器对数据包的转发处理时延;(3) 排队时延,数据包在发送前的缓冲时延;(4) 发送时延,将数据包由接口发送到链路的时延;(5) 失效恢复时延,网络从失效到恢复的延时。

鉴于电力系统对信息传递的时延性越来越敏感(现有的电力业务的时延要求如表 4[21];针对过程层的信号传输,《智能变电站继电保护技术规范》规定"传输各种帧长数据时交换机固有时延应小于 10 μs",具体如表 5[22]所示),SDN 网络需要保证时延的可控,即需要研究 SDN 网络中对上述时延产生影响的各种因素,进而优化各阶段的时延。表 6[23]展示了一个具有 1 GB/s 带宽,200 km 长链路的网络,在转发长度为 1250 B 的数据包的时延情况[19]。

表 4 电力业务通信性能需求

Tab.4 The performance requirements of electric power communication

电力业务	时延	误码率	实时性	安全区
500 kV 继电保护	≤10 ms	$\leq 10^{-6}$	极高	Ⅰ区
220 kV 继电保护	≤10 ms	$\leq 10^{-6}$	极高	Ⅰ区
电能计量遥测	秒级	$\leq 10^{-6}$	低	Ⅱ区
调度电话	≤150 ms	$\leq 10^{-3}$	高	Ⅰ区
调度自动化	≤10 0ms	$\leq 10^{-6}$	高	Ⅰ区
安稳系统	≤30 ms	$\leq 10^{-7}$	极高	Ⅰ区
保护信息管理(无远方设置)	≤15 min	$\leq 10^{-5}$	低	Ⅱ区
广域测量	≤30 ms	$\leq 10^{-9}$	高	Ⅰ区
雷电定位监测	≤250 ms	$\leq 10^{-5}$	低	Ⅲ区
变电站视频监测	≤150 ms	$\leq 10^{-3}$	高	Ⅲ区
办公自动化	无明确要求	$\leq 10^{-5}$	高	Ⅳ区
行政电话	≤250 ms	$\leq 10^{-3}$	高	Ⅳ区
视频会议	≤150 ms	$\leq 10^{-5}$	高	Ⅳ区

3.2.1 传输时延——控制器

Heller 等在 2012 年首次提出了控制器放置问题,其指出该问题的关键点在于控制器数量和控制器在网络拓扑中的位置[24]。然而目前电力系统中变电站的选址与电力通信网络的建设是解耦的关系;因此,建设基于 SDN 的电力通信架构应当增加该因素的影响评估。与控制器放置位置相关联的性能尺度包括以下若干因素:

(1) 传输延时因素,主要包括控制器与交换机间传输时延和控制器间传输时延。

(2) 开销因素,主要包括成本开销(控制器数量)[25]、流策略部署开销(交换机向控制器请求的消息数和传输开销)[26]。

(3) QoS 影响,新型业务的兴起,对网络服务质量需求日益增加,低延时和延时抖动率对通信网络的性能提出了更高要求。针对 SDN 网络,国内外主要研究控制器部署动态调整中的拓扑映射、拓扑备份等问题[27]。

表 5 变电站站内信息流的数据量及实时性要求

Tab. 5 The performance requirements of the network in the single substation

报文类型	特征	数据量/(Mbit·s^{-1})	时延要求/ms
MMS	TCP 协议传输	全网<10	遥测突变时<100
GOOSE	突发,有重传机制	一般情况忽略不计,雪崩时全网<21	跳闸时<3
SV	额定速率发送,抖动<10 μs	单端口<7 全网<80	<3

表 6 SDN 网络时延

Tab. 6 The time delay of the SDN network

操作	传输时延/μs	处理时延/μs	排队时延/μs	发送时延/μs
单流表简单的 MAC 层转发	1000	10	[0,∞)	10
多级流表的复杂控制	1000	500	[0,∞)	10

3.2.2 处理时延——路由算法

原有 IP 网络路由器遵循内部网关协议(interior gateway protocol ,IGP),大多基于距离、跳数或时延,采用最短路径算法计算路径,将数据按照计算好的最短路径逐条转发,但 IGP 是在不考虑链路拥塞的基础上进行计算[28]。

基于 SDN 的控制与数据分离特性,SDN 的路由算法具有更强的灵活性,能够避免链路拥塞导致的时延。目前国内外的研究方向主要集中在基于负载均衡(大象流和老鼠流的相互影响[29]),基于业务资源偏好的批路由策略[30],虚拟链路映射[31],采用多路径算法和动态调整路由计算参数等方法来改进路径时延[32],使用 Steiner 树构建多播路由来

节约带宽和提高应用吞吐量[33]及分布式选择探测算法[34]。

3.2.3 排队/发送时延——数据平面时延

数据平面带来的时延主要分为两个方面:一种是由于SDN控制器计算路由信息带来的首分组转发时延;另一种是由于控制器计算路由后下发的流表项的不合理,导致的SDN交换机数据转发查询流表的时延[35]。

现有的相关测表明目前在运电力专用交换机通过网络传输SV的转发延时为1 μs左右,传输GOOSE报文的时延偏差值为4.5 μs以内[22]。

不同的流表下发模式将导致的不同的SDN控制器控制时延[36],具体测试结果如表7所示。

表7 两种流表下发模式下控制时延的测试结果

Tab. 7 Test results of control time delay under two flow table release modes

模式	并发数	应用系统涉及的控制时延/ms			
		拓扑发现	配置新增	配置删除	合计
Reactive模式	50	3138	784	136	3274~3922
	100	3877	1504	200	4077~5381
	150	4674	2978	365	5039~7652
Proactive模式	50	335	308	127	462~643
	100	372	477	181	553~849
	150	337	589	278	615~926

3.2.4 失效恢复时延

目前失效恢复方式有两种:一种为控制器主导的失效恢复,另一种为交换机主导的失效恢复[37]。目前的研究集中于控制器主导的失效恢复,使用局部路由[38]的方式能够有效缩短恢复时间。

3.3 可扩展性

随着经济的发展,越来越多的变电站需要融入电力通信网络,其可扩展性将是制约SDN电力通信网络发展的一大障碍。然而SDN网络的可扩展性问题是由其本质属性决定的。影响其扩展性的因素主要有以下几点。

3.3.1 本质特征

(1) 控制平面与数据平面分离带来的通信开销、传输延迟、数据平面处理延迟;

(2) 逻辑集中的控制带来的扩展性问题:控制器负载过大、控制平面路由计算复杂度超线性增长;网络规模受限。目前主要使用新的分布式网络体系结构和东西向通信接口来解决问题。

(3) 细粒度的流管控带来的扩展性问题:当大量的新流到来时,没有匹配流表规则的分组将会被放入Packet_In消息并发送到控制平面,将给控制平面带来巨大的压力。

目前主要的实现方案[39]如表8所示。

表8 SDN可扩展问题研究进展

Tab.8 Research on the scalability of SDN

扩展性	相关研究	相关方法
性能可扩展	控制平面	多线程支持、共享队列、请求流水线采用主动预下发流表的方式、GPU分组、将部分功能下放到数据平面
	数据平面	在交换机中增加性能更强的CPU、将其他硬件与TCAM结合起来使用
规模可扩展	多控制器体系结构	扁平式体系结构:HyperFlow、Onix、ONOS以及Yanc;层次式体系结构:Kandoo]、Logical xBar以及ElastiCon;混合式体系结构:Orion
	东西向通信接口	DHT、键-值存储、管控可扩展
管控可扩展	控制器放置	基于各种指标的优化方式,相关指标可能有:延迟、容错、负载均衡、成本等
	单管控域单自治域	多控制体系结构中各控制器的相关方式均可用
	单管控域多自治域	B4、Owan
	多管控域多自治域	多管控域的东西接口协议、互联网交换节点IXP等

3.3.2 技术迭代

SDN技术还处于高速迭代过程中,SDN网络中使用的主流南向接口(OpenFlow)和北向接口协议并不能完全统一和定型,目前主要是通过接口抽象技术[40]和支持通用协议的相关技术[41]来进行解决,并且数学理论支持的抽象接口语言[42]成为了一种研究趋势。

3.3.3 跨域通信

不同区域大规模部署SDN网络后,鉴于实际利益关系,SDN可能将无法准确获取对方域内的全部网络信息。因此,SDN跨域通信[43]将是另一亟待解决的问题。

目前跨域通信主要通过可扩展的会话协议(extensible session protoco1,XSP)[44]、多域网络的高性能网络交换机制[45]、分级路由[46]等方式来解决。

3.4 链路可靠性

电网中的链路的中断会引起非常严重的后果,并且管理与控制SDN的命令是通过控制路径传输的,控制路径的可靠性更是通信网络建设必须考虑到的一点。

针对链路的可靠性的可供参考的研究主要有:负载过大引起故障量的提高[47],利用控制路径失联

的预期率[48],控制路径有效性[49]和链路故障恢复(端口故障、流表条目错误和链路负载过重引起的大量分组丢失或者链路出现短路[50])。

3.5 容错性

3.5.1 单点失效

由于控制器的故障率比较低,控制器系统的可靠性主要取决于控制器的单点故障率。$N+1$ 冗余备份模型作为经典的故障解决方案,能较好地解决该问题[51]。而网络故障检测方法是实现快速切除故障的技术支撑。目前,大量网络故障检测方法主要为贝叶斯网络、人工智能、神经网络等基于历史信息的推断方法。为保障故障检测的实时性,三类方案被提出:轮询、事件通知和两者的集合[52]。

3.5.2 规则冲突

除了单点失效的影响,由于电力系统过于庞大,导致使用集中式 SDN 控制器不经济也不现实。因此,分布式 SDN 控制器将是一个选择,但是使用分布式 SDN 控制器必然带来的严峻挑战是如何在大规模频繁变化的网络环境保持各控制器的规则策略一致性、信息的同步性和数据的热备份。

目前一致性和同步性主要集中在两个方面:(1) 增加交换节点的自治智能(DIFANE 系统[53]、DevoFlow 设计方案[54]);(2) 让控制器通过状态管理模块对网络设备的暂时中间态进行管理[55]。

相关技术有:通过虚拟化切片技术[56],使用基于角色认证和安全约束执行策略的控制器扩展软件 FortNox[57],分阶段更新方法(静默更新和单触更新)[58],使用头部交换机下发更新指令和流表[59]等方式。

3.6 兼容性

3.6.1 传统网络

电力通信是一个具有较重历史负担的通信网络,网络中存在种类繁多的通信设备和协议,随着 SDN 的持续发展,传统电力通信网络将与 SDN 电力通信网络长期共存。目前解决方案有:(1) 协议抽象技术;(2) 建立标签机制,统一管理中间件。

3.6.2 新型终端

手持式终端在电力系统中呈现大量应用的趋势,可以通过两种方式进行接入 SDN 主电力通信网:(1) 通过静态无线接入点直接为用户提供服务;(2) 在核心网络将数据传输给某个(某些)用户之后,多个用户之间通过 D2D(device-to-device)通信的方式共享资源。

3.6.3 其他新型网络架构

虽然 SDN 网络具有巨大的优势,但不可否认的是,其他新型网络架构具备某些 SDN 不具有的优势。如何将新技术的优点融入到 SDN 电力通信网络中是一个巨大的挑战,例如:(1) 主动网络具有可编程性,允许执行环境(即控制层)直接执行代码,具有很强的灵活性;(2) 信息中心网络[64],其采用了信息驱动的方式。

4 展望

通过更进一步的研究,使基于 SDN 的电力通信网络可以满足能源互联网的建设,推动电力通信网向融合化、带宽化、智能化、布局扁平化、功能层次化、业务灵活化多样化的方向发展。例如:

(1) 应用于变电站站内,减少光缆的数量,降低相应的成本;

(2) 应用于变电站之间,可以稳定电力系统潮流方向,保证能源互联网的稳固运行;

(3) 应用于电力数据中心,可以增加电力业务的灵活性,更好地服务用户;

(4) 应用于电力系统的监控,可以很好地保证数据的实时性,提高稳控系统的反应速度。

5 结语

本文从电力系统对通信网架的新需求出发,结合 SDN 网络的原理特征,讨论了基于 SDN 网络的电力通信网络的网架性能、安全性、时延、可扩展性、链路可靠性和容错性和兼容性的关键技术,并对 SDN 未来在电力通信系统中的应用场景进行了展望。现有研究表明,未来的基于 SDN 的电力通信网络将是由基础设施(物理层)、控制器和业务平台三层架构组成的通信网络。具体而言:(1) 为保证可扩展性,其控制器宜采用分布式部署;(2) 为保证业务特征的契合度,业务平台宜采用 NFV 的数据中心架构,重点研究网络虚拟化技术;(3) 为保证时延等网络性能,控制器的流表控制模式应进行优化,需研究集中控制、资源弹性调度、控制器协同控制等控制平面关键技术;(4) 为保证容错性和兼容性,需研究 SDN 的融合技术方案。

参考文献:

[1] 陈仲华,沈成彬,张坚平. SDN 技术在电信网络中应用的关键问题探讨[J]. 电信科学,2014,30(9):133-138.
CHEN Zhonghua, SHEN Chengbin, ZHANG Jianping, Discussion on the key problems in the application of SDN technology in telecommunication network [J]. Telecommunications Science, 2014,30(9): 133-138.

[2] 刘 川,黄 辉,喻 强,等. 基于 SDN 的电力通信集中控制高可靠性业务支撑机制研究[J]. 电力信息与通信技术,2015,13(12):1-5.
LIU Chuan, HUANG Hui, YU Qiang, et al. Research on high

reliability business support mechanism for power communication system centralized control based on SDN[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015,13 (12):1-5.

[3] 张倩倩. 面向配电网的电力通信流量分析和预测技术[D]. 天津:天津大学,2012.
ZHANG Qianqian. The power communication traffic analysis and forecasting techniques of power distribution network[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.

[4] 赵子岩,张大伟. 国家电网公司"十二·五"电力通信业务需求分析[J]. 电力系统通信,2011,32(5):56-60.
ZHAO Ziyan, ZHANG Dawei. Analysis on the requirement of SGCC on telecommunication service in the "12th Five-Year Plan" period [J]. Telecommunications for Electric Power System ,2011,32(5):56-60.

[5] 温向明,孙春蕾,张 威. 基于SDN的下一代能源互联网通信网络体系研究[J]. 智能电网,2015,3(12):1168-1173.
WEN Xiangming, SUN Chunlei, ZHANG Wei. Research on the next generation communication network of energy internet based on SDN [J]. Smart Grid,2015,3 (12):1168-1173.

[6] 王景川. 基于智能电网的电力调度数据网运维管理研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
WANG Jingchuan. Study on the operation and management of electric power dispatching data network based on smart grid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.

[7] SDN 产业白皮书[EB/OL]. http://www.sdnfv.org/class/view? id=10103.
SDN Industrial White Paper[EB/OL]. http://www.sdnfv.org/class/view? id=10103.

[8] 赵慧玲,史 凡. SDN/NFV 的发展与挑战[J]. 电信科学,2014,30(8):13-18.
ZHAO Huiling, SHI Fan. Development and challenge of SDN/NFV[J]. Telecommunications Science,2014, 30 (8):13-18.

[9] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, et al. Nox: Towards an oper-ating system for networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38 (3): 105-110.

[10] 闫鲁生. OpenDayLight 北向接口技术及其应用[J]. 指挥信息系统与技术,2015,6(5):74-78.
YAN Lusheng. Implementation of northbound interface technology on OpenDayLight platform[J]. Command Information System and Technology, 2015,6(5): 74-78.

[11] 郑 毅,华一强,何晓峰. SDN 的特征、发展现状及趋势[J].电信科学,2013,29(9):102-107.
ZHENG Yi, HUA Yiqiang, HE Xiaofeng. Characteristics, development and future of SDN [J]. Telecommunications Science, 2013,29(9):102-107.

[12] 赵 河,华一强,郭晓琳. NFV 技术的进展和应用场景[J]. 邮电设计技术,2014(6):62-67.
ZHAO He, HUA Yiqiang,GUO Xiaolin. The progress and application scenarios of NFV technology[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications,2014(6):62-67.

[13] 郝悍勇,胡紫巍,李建岐. SDN 在下一代电力通信网中的典型应用探讨[J]. 电力信息与通信技术,2016,1405):65-68.
HAO Hanyong, HU Ziwei, LI Jianqi. Investigation on typical applications of SDN in next generation electric communication network[J]. Eelectric Power ICT, 2016,14(5):65-68.

[14] 丁道齐. 在现代电网上架构"1+3"电力电信复合型光通信网——兼谈信息通信产业与电力工业的相互依存性及相关技术[J]. 中国电力,2002(10):4-13.
DING Daoqi. Configuring "1 + 3" electric power-communications composite optical communication network on the modern power system[J]. Electric Power, 2002 (10):4-13.

[15] 苗 新,陈 希. 电力通信网的安全体系架构[J]. 电力系统通信,2012,33(1):34-38.
MIAO Xin, CHEN Xi. Security architecture of electric power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System,2012,33(1):34-38.

[16] 王蒙蒙,刘建伟,陈 杰,等. 软件定义网络:安全模型、机制及研究进展[J]. 软件学报,2016,27(4):969-992.
WANG Mengmeng, LIU Jianwei, CHEN Jie, et al. Software defined networking: security model, threats and mechanism [J]. Journal of Software. 2016,27(4):969-992.

[17] 陶 冶,张 尼,张云勇,等. SDN 安全防护技术研究[J]. 电信技术,2014(6):14-17.
TAO Ye, ZHANG Ni, ZHANG Yunyong, et al. The safety technology of the SDN[J]. Telecommunications Technology, 2014(6):14-17.

[18] 钟志琛,尚 方,刘 生. 基于SDN的新一代电网数据中心安全防护架构研究[J]. 电力信息与通信技术,2017,15(8):21-25.
ZHONG Zhichen, SHANG Fang, LIU Sheng. Research on security protection architecture of new generation grid data center based on SDN[J]. Electric Power Information and Communication Technology,2017,15 (8): 21-25.

[19] 李兵奎,庄 雷,胡 颖,等. SDN 中基于交换机等级划分的安全路由策略[J]. 计算机应用研究,2017,34(2):522-525.
LI Bingkui, ZHUANG Lei, HU Ying, et al. Security routing strategy based on switch hierarchies in software defined network [J]. Application Research of Computers, 2017, 34 (2):522-525.

[20] 武泽慧,魏 强,任开磊,等. 基于 OpenFlow 交换机洗牌的 DDoS 攻击动态防御方法[J]. 电子与信息学报,2017,39(2):397-404.
WU Zehui, WEI Qiang, REN Kailei, et al. Dynamic defense for DDoS attack using OpenFlow-based Sswitch shuffling approach[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2017,39 (2):397-404.

[21] 樊 冰,唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1191-1197.
FAN Bing, TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE,2014, 34(7):1191-1197.

[22] 汪 强,徐小兰. 电力专用交换机在智能变电站过程层通信网络的测试研究[J]. 电力信息与通信技术,2016,14(8):132-136.
WANG Qiang, XU Xiaolan. Test study of samrt substation process layer communication network for power switch[J]. Electric Power ICT, 2016,14(8):132-136.

[23] ROYA,YOCUM K,SNOEREN A C.Challenges in the emulation of large scale software defined networks [C]// APSYS 2013: Proceedings of the 2013 4th Asia-Pacific Workshop on Systems. New York: ACM, 2013: 10-16.

[24] HELLER B, SHERWOOD R, MCKEOWN N. The controller placement problem[C]//The First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. 2012: 7-12.

[25] SALLAHI A, STHILAIRE M. Optimal model for the controller placement problem in software defined networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(1): 30-33.

[26] ZENG D, TENG C, GU L, et al. Flow setup time aware minimum cost switch-controller association in software-defined networks[C]// The 11th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QSHINE). 2015: 259-264.

[27] HEELER B, SHERWOOD R, MCKEOWN N, et al. Thecontrollerplacement problem[C]// The First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks. 2012: 7-12.

[28] 李婷婷,欧阳峰,贾庭兰. SDN 组网关键技术及标准化研究[J]. 广播与电视技术,2017,44(06):68-72.
LI Tingting, OUYANG Feng, JIA Tinglan. Research on key technology and standardization of SDN[J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2017,44(06):68-72.

[29] KANDULA S, SENGUPTA S,GREENBERG A,et al.The nature of datacenter traffic: measurements and analysis [C]// IMC'09:Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference.New York: ACM,2009: 202 -208.

[30] 房秋生,洪佩琳. SDN 网络中基于业务资源偏好的批路由策略[J]. 中国科学院大学学报,2016, 33(4):554-561.
FANG Qiusheng,HONG Peilin. Batch routing in SDN networks with resource preference consideration [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(4): 554-561.

[31] TRIVISONNO R,VAISHNAVI I,GUERZONI R,et al. Virtual links mapping in future sdn-enabled networks[C]// Future Networks and Services (SDN4FNS) ,2013 IEEE SDN for. IEEE,2013: 1-5.

[32] 柯友运. 面向 SDN 的路由算法研究[J]. 中国科技信息,2014,(22):131-134.
KE Yunyou. The research on routing algorithm of the SDN[J]. China Science and Technology Information, 2014,(22):131-134.

[33] RAMANATHAN S. Multicast tree generation in networks with asymmetric links [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,1996, 4(4):558-568.

[34] 梁宁宁,兰巨龙,张 岩. 基于分布式选择探测算法的服务路由机制[J]. 电子学报,2017,45(7):1545-1552.
LIANG Ningning, LAN Julong, ZHANG Yan. A service routing mechanism nased on the distributed selection probing algorithm[J]. Acta Electrpmoca Somoca,2017,45(7):1545-1552.

[35] 陈伟虹. 基于时延的 SDN 控制器放置问题研究[D].长沙:湖南师范大学,2016.
CHEN Weihong. Research on controller placement problems based on delay in SDN[D]. Changsha:Hunan Normal University,2016.

[36] 刘 川,李炳林,娄 征, 等. 支撑电力业务规划的软件定义网络控制器时延性能分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):142-147.
LIU Chuan, LI Binglin, LOU Zheng, et al. Analysis on time delay performance of software defined networking controller in support of power service planning[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2017,41(17):142-147.

[37] 樊自甫,伍春玲,王金红. 基于 SDN 架构的数据中心网络路由算法需求分析[J]. 电信科学,2015,31 (2):42-51.
FAN Zifu, WU Chunling, WANG Jinhong. Requirements analysis of data center network routing algorithm based on SDN architecture[J]. Telecommunications Science, 2015,31 (2):42-51.

[38] GUDE N, KOPONEN T, PETTIT J, et al. Nox: Towards an operating system for networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38 (3): 105-110.

[39] 付永红,毕 军,张克尧,等. 软件定义网络可扩展性研究综述[J]. 通信学报,2017,38(7):141-154.
FU Yonghong, BI Jun, ZHANG Keyao, et al. Scalability of software defined network [J]. Journal on Communications, 2017,38(7):141-154.

[40] SONG H. Protocol-oblivious forwarding: unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane. In: Proc. of the ACMSIGCOMM Workshop on HotSDN, 2013,127-132. http://dl.acm.org/citation.cfm? id= 2491190.

[41] REKHTER Y, LI T, HARES S. A border gateway protocol 4 (BGP-4)[J]. IETF RFC 4271, 2006.

[42] ANDERSON C J, FOSTER N, GUHA A, et al. NetKAT: semantic foundations for networks[C]//In: Proc. of the ACM SIGPLAN-SIGACT Symp on POPL, 2014, 113-126.

[43] BENNESBY R, FONSECA P, MOTA E, et al. An inter-AS routing component for software-defined networks[J]. In: Proc. of the IEEENOMS, 2012,138-145.

[44] KISSEL E, SWANY M. The extensible session protocol: a protocol for future internet architectures[R].Dissertations & Theses-Gradworks, 2012:1-14.

[45] LIN P, BI J, WANG Y. East-west bridge for SDN network peering[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.

[46] EGILMEZ H E, CIVANLAR S, TEKALP A M. A distributed qos routing architecture for scalable video streaming over multi-domain open flow networks[M]. Proceedings of the 19th

IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Orlando, USA, 2012: 2237-2240.
[47] YAO G, BI J, GUO L. On the cascading failures of multi-controllers in software defined networks[C]//The IEEE International Conference on Network Protocols. 2013: 1-2.
[48] HU Y, WANG W, GONG X, et al. Reliability-aware controller placement for software-defined networks[C]//IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. 2013:672-675.
[49] TOOTOONCHIAN A, GORBUNOV S, GANJALI Y, et al. On controller performance in software-defined networks[C]//2012 Usenix Conference on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services. 2012:7-10.
[50] 侯 乐,汪 硕,林毅凯,等. 基于 SDN 的链路故障恢复[J]. 电信科学,2015,31(6):25-30.
HOU Le, WANG Shuo, LIN Yikai, et al. Link failure recovery based on SDN[J]. Telecommunications Science, 2015,31(6):25-30.
[51] 王贤锋,刘 涛. 宽带远程接入服务器冗余热备份技术在 IP 城域网中的应用[J]. 电信科学,2013,29(9):132-136.
WANG Xianfeng, LIU Tao. Application of redundancy and standby technology for BRAS in the metropolitan area network[J]. Telecommunications Science, 2013,29(9):132-136.
[52] DINI P, BOUTABA R. Deriving variable polling frequencypolicies for pro-active management in networks anddistributed systems[C]//Integrated Network Management V. Springer US, 1997: 541-552.
[53] MINLAN Y, MICHAEL J, JIA W. Scalable flow-based networking with DIFANE[C]//SIGCOMM'10. New Delhi, India: [s.n.], 2010.
[54] CURTIS A R, MOGULJ C, TOURRILHES J, et al. DevoFlow: Scaling flow management for high-performance networks[C]//Proc of the SIGCOMM. Toronto: ACM Press,2011.
[55] DAN L, ANDREAS W, BRANDON H. Logically centralized state distribution trade-offs in software defined networks[C]//HotSDN'12. Helsinki, Finland: [s.n.], 2012.
[56] GUDE N, KOPONEN T, PRTTIT J, et al. Nox: Towards an operating system for networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(3): 105-110.
[57] PHILIP P, SEUNGWON S, VINOD Y, et al. A security enforcement kernel for OpenFlow networks: proceedings of the first workshop on hot topics in software defined networks(HotSDN)[C]. Helsinki:ACM Press, 2012.
[58] REITBLATT M, FOSTER N, REXFORD J, et al. Abstractions for network update[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Techologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, New York:ACM Press, 2012:323-334.
[59] CHEN G, PENG H, LIU S, et al. An efficient flow table consistent update scheme for software defined network[C]//Proc of IEEE/CIC International conference on Communications in China(ICCC). Piscataway:IEEE Press,2015:1-5

作者简介:


吴路明

吴路明(1988—),男,硕士,工程师,从事继电保护新技术研究工作(E-mail:luming-wu@sac-china.com);

裘愉涛(1967—),男,硕士,教授级高级工程师,从事继电保护技术管理工作;

陈 琦(1985—),男,本科,工程师,从事继电保护与控制技术领域研究工作。

The Critical Technology of the Electric Power Telecommunication Based on SDN

WU Luming[1,2], QIU Yutao[3], CHEN Qi[1,2]
(1. Guo Dian Nanjing Automation Co.,Ltd., Nanjing 210000, China;
2. Nanjing Guodian Nanzi Grid Automation Co.,Ltd., Nanjing 210000, China;
3. State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: With the continuous development of the smart grid, the energy internet, the application of cloud computing, big data, data mining and virtualization technology in the power industry, the electric power telecommunication has been una-ble to satisfy the requirements of the power system. As a new network architecture, software defined network (SDN) realizes decoupling of the control function and data transmission function, which is one of the choices of future electric power telecommunication network architecture. Based on the principle of SDN network that is discussed in the paper, the key technology of electric power telecommunication network based on SDN is shown in detail. And the key technologies are as follows: performance, security, scalability, delay, link reliability, fault tolerance and compatibility. What's more, this paper discusses the application of prospect of SDN in Power System with great prospect.

Key words: software defined networking; SDN; electric power telecommunication; scalability; delay; fault tolerance

(编辑 钱 悦)