



研究与开发

一种提高配电网通信可靠性的智能切换方案

徐韬¹, 许圣¹, 全汉滨¹, 洪焕华¹, 侯婧嫻¹, 陈小惠², 苏雷², 吴世帆¹, 邓亚芝¹

(1. 国网长沙供电公司, 湖南 长沙 410118;

2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘要: 配电网侧的终端通信接入方式多样, 但多种通信接入方式之间并未完全实现互联互通, 导致通信可靠性较差, 因此, 实现终端多种通信接入方式自动切换与多网融合, 进而提高配电网通信网可靠性具有重要意义。基于对双向转发检测 (bidirectional forwarding detection, BFD) 链路双向监测、单刀双掷隔离、旁路 (Bypass) 技术及隧道技术等多种成熟技术在通信网络中广泛应用的研究, 提出了提升配电网可靠性的关键技术和相融合的方法, 并搭建实物仿真环境验证所提方案的可行性。仿真验证结果表明, 所提方案能够很好地适用于复杂的配电网通信网络, 从而提升其自愈能力, 满足物理隔离要求以及业务传输对时延的要求, 进而提升整个配电网通信网络的可靠性。

关键词: 配电网通信; 网络自愈; 网络物理隔离

中图分类号: TN929.5; TM73

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024179

An intelligent switching scheme to improve the reliability of power distribution network communication

XU Tao¹, XU Sheng¹, QUAN Hanbin¹, HONG Huanhua¹, HOU Jingying¹,
CHEN Xiaohui², SU Lei², WU Shifan¹, DENG Yazhi¹

1. State Grid Changsha Power Supply Branch, Changsha 410118, China

2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410114, China

Abstract: The access methods for terminal communication on the distribution network side are diverse. However, due to the lack of complete interconnection among various communication methods, the reliability of communication is compromised. Therefore, it is of great significance to realize automatic switching of various communication access modes and multi-network integration of terminals to improve the reliability of distribution communication network. Based on the research on the wide application of mature technologies such as bidirectional forwarding detection (BFD) link bidirectional monitoring, single-pole double-throw isolation, Bypass technology and tunnel technology in communication networks, the key technologies and integration methods to improve the reliability of distribution network were put forward, and the feasibility of the proposed scheme was verified by building a physical simulation environment. The simulation results show that the proposed scheme can be well applied to the complex distribution net-

work, so as to improve its self-healing ability, meet the requirements of physical isolation and service transmission delay, and improve the reliability of the entire distribution network.

Key words: distribution network communication, network switching self-healing, network physical isolation

0 引言

为了深入贯彻落实能源安全新战略,国家电网有限公司确立了“具有中国特色国际领先的能源互联网企业”的战略目标,这迫切需要建设以电为中心、以坚强智能电网为基础平台的智慧能源系统。智慧能源系统是指具有清洁低碳、安全可靠、泛在互联、高效互动、智能开放等特征的系统。它围绕电网的发、输、变、配、用等组成部分展开,借助“云-大-物-移-智”等先进信息和通信技术,构建具有支持广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控等特征的新型电力系统^[1-2]。相较于其他能源系统,以电为中心、以坚强智能电网为基础平台的智慧能源系统具有更高的灵活性、可控性和互联性,能够更好地满足能源互联网的需求。实现上述目标需要对海量电力终端信息进行全方位采集、高速传输、智能分析和高效处理,这对配电网侧终端通信技术提出了更高的要求^[3-5]。

配电网侧的终端通信接入方式主要有以太网无源光网络(ethernet passive optical network, EPON)光纤专网、无线公网和无线专网3种,但由于多种通信接入方式之间并未完全实现互联互通,通信可靠性较差,因此实现终端多种通信接入方式的自动切换与多网融合,进而提高配电网通信网的可靠性,成为亟待解决的关键问题。目前应用较多的是光纤专网,一方面,光纤具有通信稳定、传输效率高等特点,在长途光纤通信系统中,其单通道速率可达250 Gbit/s,总传输容量高达48 Tbit/s,在短距离传输中,单通道速率达到了400 Gbit/s,总传输容量为76 Tbit/s;但另一方面,由于城市规划的调整和土地资源的日益

紧张,光纤施工难度大,文献[6]中指出光纤通信网络建成后,其可变动性较差,灵活度和扩展度也存在较大缺陷,因此,光纤专网难以在终端通信中大规模推广应用。无线公网作为一种通用的无线通信接入方式,覆盖范围广,建设成本相对较低,具有较高的灵活性和便利性^[7]。然而,无线公网通信存在信号干扰、数据安全性较差、抗干扰能力相对较弱等问题。例如,无线公网数据传输误码率为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$,而光纤通信误码率低于 10^{-9} ,同时无线公网在配电场景中极易受电磁干扰影响,这些都制约了其在配电网通信网中的应用。电力无线专网是电网专有网络,主要解决电网通信“最后一公里”的通信问题。电力无线专网能够有效避免光纤和无线公网通信存在的安全性和经济性问题,同时,还具有建设难度低、性能优越、恢复周期短、政策优势明显等特点^[8-9]。因此,全面深入应用电力无线专网对智慧能源系统的建设具有重要意义。

无论是EPON光纤专网还是电力无线专网通信,均在配电网通信中应用广泛且技术成熟。然而,现有研究多集中在某一种通信网络技术上,缺乏对不同网络间的异构与融合进行全面考量,也缺乏有效的联动机制以实现类似网络自愈能力,为业务终端提供多通道保护切换。为了解决这一问题,本文结合国家电网配电自动化通信技术现状,研究光纤专网和无线专网的优势与不足,并提出一种智能切换技术,实现多种网络通道之间的自动切换,从而提高配电网通信网的可靠性。该技术不仅考虑了多通道自动切换,还兼顾了配电自动化业务对切换时延和安全物理隔离的要求。本研究可以为智慧能源系统的建设提供技术支持,同时为电力行业发展提供重要参考。



1 国内外配电自动化通信现状

1.1 国际配电网业务需求分析

国际上,高级计量基础设施(advanced metering infrastructure, AMI)、需求响应(demand response, DR)、广域态势感知(wide-area situational awareness, WASA)、分布式能源和储能(distributed energy resources and storage, DERS)、电动汽车(electric vehicle, EV)和配电网管理(distribution grid management, DGM)这6类智能配电网业务对通信有差异化需求。表1从宽带通信、时延、可靠性、安全性以及是否需要备用电源等方面进行了总结。

1.2 国内配电网常用通信技术

随着国际智能电网的发展和国内分布式电源、智能用户的增多,国家电网配电网通信网络面临巨大变革。各电力公司、高校和研究机构已展开基础研究,分析了智能配电网通信业务需求,提出了采用配电网光纤、宽带无线接入等通信技术方案以实现智能配电网。为满足庞大电网和通信网的需求,用户可根据场景、速率、实时性、可靠性和数据量选择适宜通信接入方式,如无源光网络(passive optical network, PON)、电力无线专网、工业以太网及5G等通信技术。

PON技术是光纤接入网中迅速发展的主流技

术之一,其基本构成包括局端的不同容量规格的光线路终端(optical line terminal, OLT)设备、远端的用户端设备光网络单元(optical network unit, ONU),以及它们之间通过无源光缆、光分/合路器等设备连接的光分配网(optical distribution network, ODN)。由于ODN不含有源电子设备,PON技术可以形成灵活的树状、星形或总线型拓扑结构,简化了供电配置和网管复杂度,提高了系统可靠性,节省了维护成本。该技术特点包括维护简单、设备成本低、传输带宽高,以及上、下行速率不对等,点对多点应用有利于最大化利用网络资源^[10-11]。

电力无线专网是专为电力系统设计的通信网络,旨在实现电力设备之间的数据传输和通信。国内电力无线专网频段集中在230 MHz和1 800 MHz,通常采用基于230 MHz和1 800 MHz的长期演进(long term evolution, LTE)技术。230 MHz电力无线专网在国家无线电管理委员会批准的频段内构建,用于电力负荷控制专用数据传输。国家电网相关公司尝试使用TD-LTE无线通信技术进行电力无线专网试点建设,在城市覆盖3~5 km,在农村地区覆盖15~20 km。系统具有实时性好、组网灵活、信道安全性高和建设速度快等优点^[12-13]。然而,电子无线专网一次性投资较高,产业链相对公网尚不够成熟。

工业以太网技术是专为工业控制系统设计的

表1 国际智能配电网网络需求

业务类型	网络需求				
	宽带通信	时延	可靠性	安全性	是否需要备用电源
AMI	10~100 kbit/s 节点,回程速率 500 kbit/s	2~15 s	99.99%	高	不需要
DR	每个设备间 14~100 kbit/s	几分钟内时延 500 ms	99.99%	高	不需要
WASA	600~1 500 kbit/s	20~200 ms	99.999 9%	高	24 h 备用
DERS	9.6~56 kbit/s	20 ms~15 s	99.99%	高	1 h 备用
EV	9.6~56 kbit/s,目标是 100 kbit/s	2 s~5 min	99.99%	较高	不需要
DGM	9.6~100 kbit/s	100 ms~2 s	99.999%	高	24~72 h 备用

通信网络,采用以太网标准,兼容 IEEE802.3/802.3u 标准,使用 ISO 和 TCP/IP 通信协议。相较于传统工业网络,工业以太网技术带宽更高、传输时延更低、实时性更好,且具有强大的抗干扰能力,能够在恶劣的工业环境中稳定运行,因此,在工业自动化领域得到广泛应用。在电力系统中,国家电网和南方电网的配电自动化通信系统多采用工业以太网技术,并构建保护环网。光纤链路作为主要传输介质,能够满足长距离、高速率、抗干扰的要求,保证电力系统的通信可靠性,为智能化发展提供支持,保障电力系统安全稳定运行^[14]。

5G 支持 eMBB、mMTC 和 URLLC 等通信需求。国务院 2015 年发布了《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》,强调通过互联网推动能源系统扁平化,推动能源生产与消费模式变革。国家电网、中国电信和华为在 2018 年联合发布了《5G 网络切片使能智能电网》报告,标志着垂直行业与运营商在 5G 领域合作的重要推进。南方电网、中国移动和华为同年发布了《5G 助力智能电网应用白皮书》,推动了“5G+电网”的合作。尽管国家电网和南方电网积极开展 5G 试点,但成本和覆盖范围限制,普及速度较慢^[15-16]。总体而言,5G 在电网行业有巨大应用潜力,但也面临挑战,需要技术创新和合作推动,以实现电网系统的全面升级和智能化发展。

1.3 国内配电网通信技术应用场景分析

国内配电网通信多采用光通信、无线通信和

低压电力线载波技术,为智能配电网的监测、控制和用户互动提供安全可靠的通信。国内配电网通信用技术及其主要特点见表 2。

当前,虽然不同通信媒介均具备保护倒换和路由选择能力,但缺乏跨媒介联动保护方法,这对于庞大复杂的配电网通信节点来说将带来巨大的运维需求。为适应时代发展并响应国家政策,通信技术作为配电自动化的关键部分,需要加强配电网通信技术研究,以提升网络链路检测技术,实现网络自愈和物理隔离,提升设备可靠性、网络协议兼容性和数据安全性。

2 配电网可靠性提升技术分析

根据前文对目前配电网通信整体情况的分析,针对各种主流配电网通信技术之间存在的无法直接联动的问题,以及链路状态分析检测、安全分区要求的物理隔离要求,提出解决方案。

2.1 链路检测技术

当前以太网链路检测技术种类繁多,覆盖了从二层到三层、硬件到软件的各种技术。目前网络检测协议中通用性较好的主要有双向转发检测(bidirectional forwarding detection, BFD)和网络包测程序(packet internet groper, PING)探测 2 种。其中, BFD 协议提供了一种标准化、独立于介质和上层协议的快速故障检测机制,主要具有三大优势:一是能双向检测物理或逻辑链路间的故障;二是能为各种上层应用(如 MPLS、OSPF、IS-IS 等)提供统一的故障检测服务,保

表 2 国内配电网通信用技术及其主要特点

通信技术	传输速率	传输距离/km	主要特点
PON	1.25 Gbit/s	20~40	优点: 信号可靠、手拉手组网可靠; 缺点: ODN 设计复杂
工业以太网交换机	100~1 000 Mbit/s	10~80	优点: 有环网保护标准、工业级标准; 缺点: OAM 能力弱
无线专网	100 Mbit/s	4~10	优点: 覆盖广、部署简单快捷; 缺点: 已暂停新建
无线公网	170 kbit/s	1~10	优点: 覆盖广; 缺点: 扩展能力差、成本较高



证相同的检测时间；三是BFD的故障检测速度远快于1 s，有助于加速网络恢复，减少应用中断时间，提升网络可靠性和服务质量。因此，在配电自动化通信网络中，选择BFD检测协议更为合适。

2.2 物理隔离技术

根据相关法规和安全方案要求，电力二次系统中的安全区Ⅰ、Ⅱ与安全区Ⅲ之间需要进行隔离。在配电自动化中，特别是在冗余通信线路中，可能涉及有线和无线、专网和公网的联动。专网和公网联动时，必须物理隔离2个网络和线路，以确保网络和业务安全符合政策要求。

物理隔离的两种主要方式是电气隔离和机械隔离。电气隔离是继电器中控制电路和被控制电路通过隔离手段进行电气隔离，防止干扰和保护电路。绝缘材料或隔离电路用于实现电气隔离，确保控制信号和输出电路相互独立。机械隔离是通过继电器内部的机械结构隔开控制部分和被控制部分，保证二者之间没有机械连接。电磁线圈吸引触点实现开闭控制，而隔离墙或隔离膜等机械隔离结构确保即使控制部分发生故障，也不会影响被控制部分，维护电路的可靠性和安全性。机械隔离技术比电气隔离更可靠稳定，不受电气干扰影响，不需要外部电源支持，成本低且适用于特殊环境，同时更环保。因此，专网和公网联动时可采用机械隔离技术实现物理隔离。

2.3 Bypass机制技术

旁路（Bypass）是一种在特定触发状态下启动的物理导通机制，用于在设备断电或死机时，网络安全设备不再经由安全系统，而是通过物理导通来保证网络的连续性。在正常状态下，网络封包经过应用软件处理后进行传播，但当启用Bypass功能后，设备的应用程序不再对网络进行封包处理，而是通过继电器闭合，将输入和主输出端口直接连接，从而允许以太网信

号从一个端口传递到另一个端口，类似于连接2个端口的交叉电缆。Bypass功能被视为网络安全设备的一个关键组成部分，因为它能够在设备出现故障时确保不同网络之间的通信连通性。当网络安全设备发生故障时，Bypass功能会自动启动，确保网络互通，从而避免网络中断带来的潜在问题。

2.4 隧道技术

隧道技术通过重新封装数据包，在网络中传输这些数据包。为提高网络兼容性和数据安全性，在复杂的配电网通信网络中，隧道技术用于建立虚拟专用网络（virtual private network, VPN）通道，以确保数据无缝传输。通用路由封装（generic routing encapsulation, GRE）VPN用于封装不同网络层协议的数据，并在另一个网络层协议中传输。在复杂的通信设备场景下，使用GRE VPN技术可以确保配电业务的连续传输，即使在网络故障时也能保持数据传输。GRE VPN技术提供了安全传输、兼容性和冗余保护，从而提高了网络可靠性和安全性，保证了配电终端设备在不同网络中的正常通信。

3 智能切换方案

随着城市化的快速发展，为满足企业和公众的用电需求，电力行业普遍采用EPON光纤方式在配电网环网柜配电终端单元（distribution terminal unit, DTU）通信中承载数据，配电网通信现有工作模式如图1所示。在中心站与环网柜之间，主要采用专用光纤通信通道作为主线路，备份线路采用230 MHz无线专网通道。然而，当主线路出现故障时，需要人工介入进行手动线路切换，这给运维人员带来压力，也可能影响配电网自动化业务的正常运行。除EPON光纤方式外，其他通信节点则采用单一无线专网或4G/5G公网，存在通信不稳定的风险，并易受外界环境因素干扰，影响配电网自动化业务的正常开

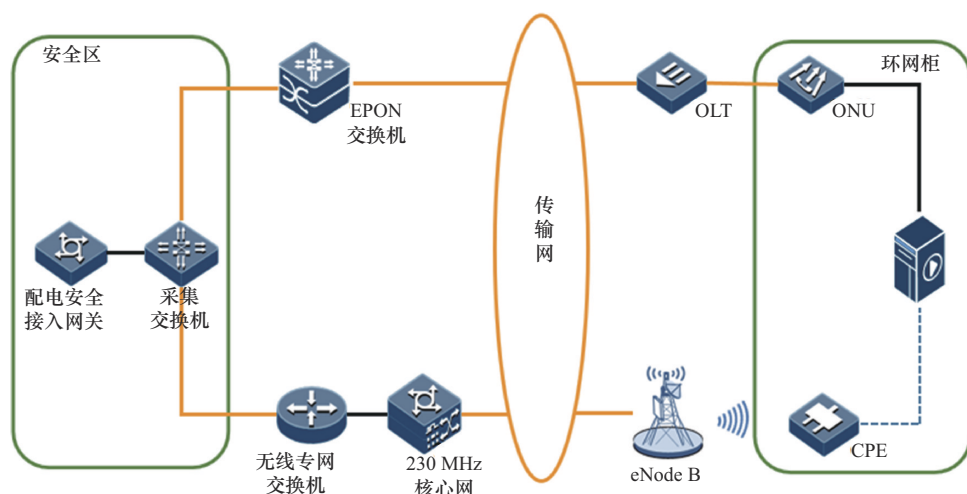


图1 配电网通信现有工作模式

展。现有的冗余保护方式仍依赖于被动的、人工干预的方式，无法实现智能化的自动切换，限制了配电网通信的可靠性和稳定性。

针对以上问题，结合前文所分析的关键技术，提出如图2所示的智能切换方案。该方案整合了多种标准技术和协议，符合国家电网对新技术接纳能力“适度超前”的要求。

本文所提方案在实际应用中可以有效解决以下问题。

(1) 光纤中断无线备份问题：检测有线链路状态，实现有线网络和无线备份网络的智能切换和备份，解决了光纤中断时无法进行通信的问题。

(2) 有线/无线网络安全问题：继电器切换电

路设计从根本上保证了有线和无线之间的网络隔离，同时在无线侧实现了灵活组网，可选择4G/5G、LTE230组网方式，解决了网络安全问题。

(3) 针对有线和无线IP网段划分不同的情况，通过创建GRE/VxLAN隧道的方式，在不改变无线侧网络配置的情况下，实现了网络通信。

该模式致力于实现智能化的自动切换，使得无线通信与有线通信能够实现状态监测和自动联动。当有线通信出现故障时，能够自动切换到无线通信，实现了配电网通信的持续可靠输出。这一智能切换方案的提出，将为配电网自动化通信系统带来重大的技术突破，并为智能化配电网通信的发展提供重要的技术支持。

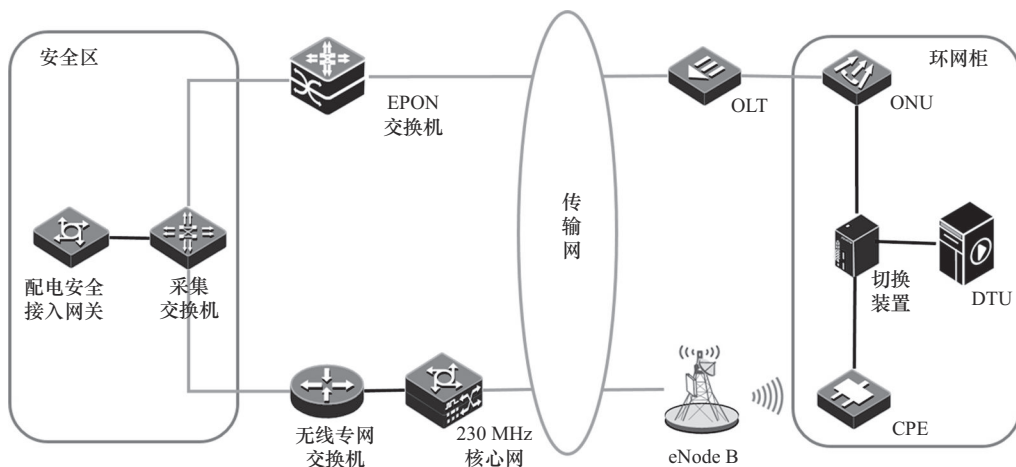


图2 智能切换方案



4 仿真验证

4.1 仿真场景设置

为了验证所提方案的有效性,本文搭建了仿真测试网络,拓扑示意图如图3所示,主要包括智能切换装置、辅测设备-1和辅测设备-2。其中,辅测设备-1采用 ISCOM5104P-4R-EA-AC 设备,支持 EPON 上行链路 2 路,采用 220 V 交流供电;辅测设备-2 采用 Gazelle G532i-B-4GE-00 设备,该设备内置 5G 全网通模块,支持 5G NR/LTE-TDD/LTE-FDD/WCDMA 等制式,提供 4 个吉比特以太网 WAN 网口,采用 12 V/24 V 直流供电。智能切换装置与辅测设备-1 之间、辅测设备-1 和辅测设备-2 之间搭建有 BFD 检测线路;测试仪 TC1 作为数据源,负责产生数据流,TC2 作为数据接收端,负责接收数据流并做相应的数据分析。整个仿真拓扑包含数据传输主线路 line1 和数据传输备用线路 line2 两条线路,基于仿真拓扑实现链路检测、故障切换与回切、Bypass 功能的仿真测试。仿真测试参数设置见表 3。

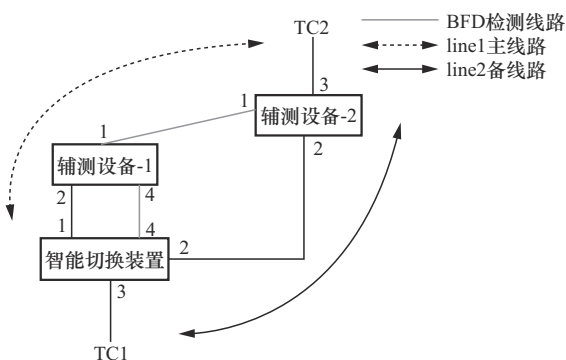


图3 仿真测试网络拓扑示意图

表3 仿真测试参数设置

功能	收发包间隔/ms	故障位置	故障类型
链路检测	200	line1 口	拔掉 line1 口
故障切换	100	line1 口	拔掉 line1 口
故障回切	1 000	辅测设备间链路	辅测设备间链路断开
Bypass	500	—	装置断电

4.2 仿真测试分析

按照图3搭建实物测试环境,进行链路检测,具体检测结果见表4。当实物测试环境中无 BFD 故障时,TC2 数据包接收情况正常,主线路 line1 指示灯亮,备用线路 line2 指示灯灭,表明主线路 line1 导通正常,备用线路 line2 处于未导通状态。当引入 BFD 故障时,TC2 先处于断开状态,未接收到数据包,之后再处于导通状态,最终数据包正常接收,主线路 line1 指示灯灭,备用线路 line2 指示灯亮,表明当存在 BFD 故障时,可以实现主线路 line1 向备用线路 line2 的切换,从而保障数据包的正常传输。

表4 链路检测结果

测试环境	TC2 收包情况	line1	line2
无 BFD 故障	正常	指示灯亮	指示灯灭
有 BFD 故障	先断开再导通,最终收包正常	指示灯灭	指示灯亮

基于仿真拓扑分别进行 5 次故障切换与回切测试,具体测试结果见表 5 和表 6。其中,切换时延包括开关切换时间、物理层建立时间以及网络层刷新时间 3 部分。从表 5、表 6 中可以看出,当拔掉 line1 口后,在 TC1 发包速率保持不变的情况下,TC2 起初出现少量丢包情况,之后数据包接收稳定且不存在丢包现象,平均切换时延稳定在 334 ms 左右。当插回 line1 口后,TC2 在经过少量丢包后也达到稳定状态,且不再存在丢包现象,平均切换时延稳定在 153 ms 左右。插拔 BFD 口制造 BFD 检测线路故障,进行 BFD 故障切换与回切测试,具体测试结果见表 7 和表 8。从表 7、表 8 中可以看出,当发生 BFD 检测线路故障时,在经过短暂的少量丢包后,成功完成线路切换,数据包能够正常传输,切换时延整体维持在 300 ms 以下。当 BFD 故障回切时,其切换时延维持在 150 ms 以下,处于较低水平。

目前配电系统中具有高速切换需求的业务主要有自动重合闸系统、自动恢复系统和远程

表5 切换测试结果

动作	发包速率/ (f·s ⁻¹)	丢包个数	切换时间/ms
拔掉 line1 口	1 000	372	372
拔掉 line1 口	1 000	355	355
拔掉 line1 口	1 000	330	330
拔掉 line1 口	1 000	311	311
拔掉 line1 口	1 000	302	302

表6 回切测试结果

动作	发包速率/ (f·s ⁻¹)	丢包个数	切换时间/ms
插回 line1 口	1 000	112	112
插回 line1 口	1 000	108	108
插回 line1 口	1 000	192	192
插回 line1 口	1 000	175	175
插回 line1 口	1 000	177	177

表7 BFD 检测线路故障切换测试结果

动作	发包速率/(f·s ⁻¹)	丢包个数	切换时间/ms
拔掉 BFD 口	1 000	138	138
拔掉 BFD 口	1 000	133	133
拔掉 BFD 口	1 000	233	233
拔掉 BFD 口	1 000	220	220
拔掉 BFD 口	1 000	256	256

表8 BFD 检测线路故障回切测试结果

动作	发包速率/(f·s ⁻¹)	丢包个数	切换时间/ms
插回 BFD 口	1 000	101	101
插回 BFD 口	1 000	98	98
插回 BFD 口	1 000	145	145
插回 BFD 口	1 000	133	133
插回 BFD 口	1 000	138	138

控制系统等。其中，自动重合闸系统用于在电网出现故障时，自动切断故障区域，隔离故障，保护电网和设备安全；自动恢复系统用于在电网故障被隔离后，自动恢复电力供应，减少停电时间，提高电网可靠性；远程控制系统通过远程控制设备，实现对配电系统的远程监控、操作和管理，包括远程开关、调节、切换等功能。自动重合闸系统切换时延一般要求在几百毫秒以内，自动恢复系统恢复时延一般要求在

数秒钟以内，远程控制系统对切换时延的要求相对较低，一般在数秒钟到数十秒钟之间。可以看出，不论故障切换还是故障回切，TC2 在经过短暂的少量丢包后，均能恢复数据包正常接收状态，且切换时延均远低于 500 ms，能够满足工业现场的实际应用需求。

Bypass 功能测试结果见表 9。从表 9 可以看出，当智能切换装置断电后，TC2 出现少量丢包，之后流量转发正常且无丢包现象；在断电 10 min 后，流量可以实现正常转发，与智能切换装置断电前无异。在智能切换装置重新上电以及重启后，TC2 均能够实现流量的正常转发。测试结果表明，所提 Bypass 机制能够有效降低网络故障产生的不良影响，保证掉电情况下不中断正常业务，能够满足配电网通信网络的稳健性需求。

表9 Bypass 功能测试结果

动作	TC2 收包情况
智能切换装置断电	少量的丢包后流量转发正常且无丢包现象，在断电 10 min 后，流量正常转发
智能切换装置上电	流量正常转发
智能切换装置重启	流量正常转发

5 结束语

本文通过对配电自动化通信网络技术现状的分析，总结了适用于配电网通信网的各类成熟技术，并构思了这些技术的进一步融合，提出了一种智能切换方案，该方案可广泛应用于配电网通信中，包括双通信线路冗余切换保护、电力光纤有线网和无线网间的备份切换，以及无线专网与无线公网间的备份切换等场景。仿真验证结果表明，所提方案能够很好地适用于复杂的配电网通信网络，从而提升其自愈能力，满足物理隔离要求以及业务传输对时延的要求，进而提升整个配电网通信网络的可靠性。此外，该方案还解决了独立网络间的自愈配合问题，并利用网络隔离技



术满足电网对数据安全性的要求,为配电网通信网的发展提供了重要的理论和实践指导。

参考文献:

- [1] 张瑶,王傲寒,张宏.中国智能电网发展综述[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):180-187.
ZHANG Y, WANG A H, ZHANG H. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.
- [2] 孙艳玲,王永真,朱晨光,等.“互联网+”智慧能源的再认识:基于熵视域[J].全球能源互联网,2023,6(5):538-546.
SUN Y L, WANG Y Z, ZHU C G, et al. Rethinking of “Internet+” intelligent energy: from the perspective of entropy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 538-546.
- [3] 张平,邱超,张琳娟,等.面向配电网的5G异构网络部署策略[J].电子技术应用,2022,48(3):13-17.
ZHANG P, QIU C, ZHANG L J, et al. A 5G heterogeneous network deployment strategy for power distribution network[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(3): 13-17.
- [4] 李祥珍,何清素,孙寄生.智能配电网通信组网技术研究及应用[J].中国电力,2011,44(12):78-81.
LI X Z, HE Q S, SUN J S. Research and application on communication technology in smart distribution and utilization grid[J]. Electric Power, 2011, 44(12): 78-81.
- [5] 李群,孙健,李顺宗.配电自动化建设与应用新技术[M].北京:中国电力出版社,2020.
LI Q, SUN J, LI S Z. New technologies for distribution automation construction and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.
- [6] 梁婷.大数据互联网时代光纤通信技术的发展与挑战[J].智慧中国,2024(Z1):114-115.
LIANG T. Development and challenge of optical fiber communication technology in the era of big data Internet[J]. Wisdom China, 2024(Z1): 114-115.
- [7] 常洁.基于公网的工业无线连接方案[J].电信科学,2018,34(10):116-123.
CHANG J. Scheme of industrial wireless connections based on public network[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(10): 116-123.
- [8] 何二朝,耿朋进,张慧丽.基于边缘计算的电力无线专网组网方案[J].电信科学,2019,35(S2):248-255.
HE E C, GENG P J, ZHANG H L. Power wireless private network networking scheme based on edge computing[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(S2): 248-255.
- [9] 伍晓平,肖振锋,伍仁勇.电力无线专网规划设计与优化[M].长沙:湖南大学出版社,2021.
WU X P, XIAO Z F, WU R Y. Planning, design and optimization of power wireless private network[M]. Changsha: Hunan University Press, 2021.
- [10] 邱顺利,杨毅,胡荣.一种新型的低成本双向传输相干无源光网络系统[J].电信科学,2016,32(7):146-151.
QIU S L, YANG Y, HU R. A novel low cost bidirectional transmission coherent passive optical network system[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 146-151.
- [11] 霍佳皓,张晓营,高凯强,等.工业无源光网络物理层关键技术及发展趋势[J].工程科学学报,2023,45(10):1641-1652.
HUO J H, ZHANG X Y, GAO K Q, et al. Key technologies and trends in the development of industrial passive optical networks[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(10): 1641-1652.
- [12] 周想凌.切片分类下短切片/短复用电力无线专网的融合构建研究[J].电力信息与通信技术,2023,21(5):69-75.
ZHOU X L. Research on the fusion construction of short slice/short multiplexing for power system wireless private network under slice classification[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(5): 69-75.
- [13] 王兴涛,赵训威,孙孝波,等.230 MHz电力无线专网通信终端设计与应用[J].电讯技术,2021,61(8):999-1004.
WANG X T, ZHAO X W, SUN X B, et al. Design and application of telecommunication terminal for 230 MHz power wireless private network[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(8): 999-1004.
- [14] 冯涛,鲁晔,方君丽.工业以太网协议脆弱性与安全防护技术综述[J].通信学报,2017,38(S2):185-196.
FENG T, LU Y, FANG J L. Summary of vulnerability and security protection technology of industrial Ethernet protocol[J]. Journal on Communications, 2017, 38(S2): 185-196.
- [15] 孙建成,孙嘉颖,缪德山,等.5G NTN网络架构标准化演进思考[J].电信科学,2023,39(9):76-86.
SUN J C, SUN J Y, MIAO D S, et al. Thoughts on the standardization evolution of 5G NTN network architecture[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(9): 76-86.
- [16] 张平,郑征,张琳娟,等.面向配电网业务的5G通信技术适配性研究[J].电力信息与通信技术,2023,21(1):26-33.
ZHANG P, ZHENG Z, ZHANG L J, et al. Research on the adaptability of 5G communication technology for distribution network businesses[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(1): 26-33.

[作者简介]



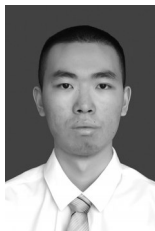
徐韬(1988-),男,国网长沙供电公司工程师,主要研究方向为电力通信。



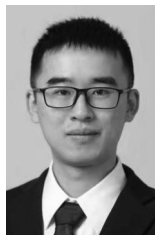
许圣 (1982-), 女, 国网长沙供电公司高级工程师, 主要研究方向为计算机科学与技术。



陈小惠 (1987-), 男, 国网湖南省电力有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信。



全汉滨 (1997-), 男, 现就职于国网长沙供电公司, 主要研究方向为电力通信。



苏雷 (1994-), 男, 现就职于国网湖南省电力有限公司, 主要研究方向为电力通信。



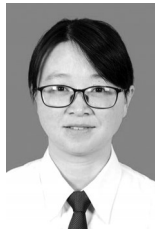
洪焕华 (1995-), 男, 现就职于国网长沙供电公司, 主要研究方向为电力通信。



吴世帆 (1997-), 女, 现就职于国网长沙供电公司, 主要研究方向为计算机科学与技术。



侯婧嫒 (1987-), 女, 国网长沙供电公司高级工程师, 主要研究方向为计算机科学与技术。



邓亚芝 (1981-), 女, 国网长沙供电公司高级工程师, 主要研究方向为自动化。