

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201155

基于5G通信的配电网差动保护技术研究

张建雨¹, 姜睿智¹, 李俊刚¹, 刘洋¹, 崔龙卫¹, 宋戈², 江伟建³, 徐涛¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610000;
3. 国网嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 现代配电网大量分布式电源的接入, 使得传统三段式过流保护整定困难。基于光纤通信的差动保护建设成本高, 难以大范围应用。5G通信的大带宽、低延时、高可靠特点为配电网差动保护业务提供了一种新的通信方式。通过分析5G通信承载配电网差动保护的技术手段, 结合配电网差动保护对通信的技术要求, 提出一种基于5G无线通信通道、UDP协议SV采样值报文格式、北斗卫星导航系统授时采样同步法的配电网差动保护方案。该方案在多个5G通信环境进行了验证, 差动保护性能满足配电网系统要求。

关键词: 5G; 差动保护; 采样同步; 通道延时; SV采样值

Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication

ZHANG Jianyu¹, JIANG Ruizhi¹, LI Jungang¹, LIU Yang¹, CUI Longwei¹, SONG Ge², JIANG Weijian³, XU Tao¹
(1. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China; 3. State Grid Jiaxing Power Supply Company, Jiaxing 314000, China)

Abstract: The access of distributed power in a modern distribution network makes it difficult for the traditional three-section current protection to meet the differential protection needs for the laying of optical fiber infrastructures, and its high construction cost makes its wide application difficult. The extreme data rates, ultra-low latency, and ultra-high reliability of 5G communication provide a new communication way for differential protection in a distribution network. This paper analyzes the technologies of 5G communication for differential protection, and the requirements for communication, and then proposes a solution based on a 5G wireless communication channel, SV sampling value message over UDP protocol, and sampling synchronization with a Beidou satellite navigation system. This solution has been verified in multiple 5G communication environments, showing that its differential protection performance meets distribution network requirements.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904100).

Key words: 5G; differential protection; sampling synchronization; communication delay; SV sampling value

0 引言

我国配电网线路主要采用三段式过流保护作为主保护, 随着配电网拓扑结构的日益复杂, 以及大量分布式电源的接入, 过流保护存在无法兼顾快速性和选择性要求、定值整定困难等问题, 其诱发越级跳闸和大范围停电事件的风险越来越高^[1-2]。

基于光纤通道的纵联电流差动保护具有良好的选择性、速动性和灵敏性, 抗过渡电阻能力强, 不

受系统方式潮流影响, 整定简单, 能够快速准确定位和隔离故障, 有利于配电网可靠运行。但是光纤通道建设存在周期长、成本高、难度大、通道利用率低等缺点, 影响了差动保护在配电网的推广和应用^[3-4]。

第五代移动通信技术(5G通信)具有大带宽、高可靠、低延时、多连接等特点, 并且定义了增强型移动宽带(enhanced Mobile Broadband, eMBB)、高可靠低时延通信(ultra-Reliable and Low Latency Communications, uRLLC)、大规模机器类通信(massive Machine Type Communications, mMTC)三种应用场景^[5]。其中, uRLLC应用场景与配电网差动保护十分契合。uRLLC应用场景所具备的高可

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904100); 国家电网公司科技项目资助“面向配电网的多维监测与运行辅助决策关键技术研究”(SGTYHT/19-JS-215)

靠、低延时特性,以及 SA 独立组网、MEC 边缘计算、网络切片等技术,为 5G 通信承载配电网差动保护业务提供了支撑基础。

本文首先介绍 5G 通信承载配电网差动保护的几种技术手段;其次在现有光纤纵联差动保护的技术要求基础上,分析了采用 5G 通信实现差动保护的关键技术;最后提出了一种基于 5G 通信的配电网差动保护方案,并在多个 5G 通信环境进行了验证。

1 5G 通信承载差动保护的关键技术

1.1 uRLLC 场景概述

uRLLC 场景是 5G 通信定义三个应用场景之一,主要面向物联网业务,具有高可靠、低延时的特点^[6]。uRLLC 场景对时延的要求是用户面上行、下行时延目标均为 0.5 ms,对可靠性的要求是用户面时延 1 ms 内传送 32 字节包的可靠性为 99.999%^[7],与差动保护对纵联通道的要求基本一致。

为了保证 uRLLC 场景对低时延和可靠性的严格要求,5G 通信从提高空口传输效率、优化信道编码、扩充无线帧结构、优化网络架构、减少中间传输节点数量等多方面进行了针对性设计^[8]。uRLLC 场景承载配电网差动保护业务所应用的关键技术主要包括:SA 独立组网、MEC 边缘计算、网络切片、频谱和天线技术、空口子帧结构^[9-10]等。

1.2 SA 独立组网

5G NR 的全称为 5G New Radio,也称为新空中接口,5G NR 是相对于 5G Core 核心网来说的。4G 网络要求空中接口和核心网必须统一演进,而 5G 网络将其分开,5G NR 和 5G Core 可以各自独立演进,由此带来了 SA 独立组网和 NSA 非独立组网两种方式。在技术层面上,SA 独立组网是最佳的选择,但考虑节约投资的原因,现有庞大的 4G 网络可采用 NSA 非独立组网方式逐步向 5G 演进。

对比 SA 和 NSA 两种组网方式,SA 独立组网支持 MEC 边缘计算、网络切片等技术,具备更强的加密算法、更安全的隐私设置、更低的网络延时和更高的可靠性。理论上 SA 独立组网相较于 NSA 非独立组网更适合配电网差动保护业务的实施,具体网络性能还需要进一步验证。

1.3 MEC 边缘计算

5G 核心网相较 4G 核心网而言,重新定义为核心网和 MEC(Mobile Edge Computing)边缘计算两部分。MEC 将原有核心网的部分用户面功能下沉至边缘云计算,改变了原有通信必须全部经过核心网传

输的方式,提供了一种在 MEC 进行计算和传输的服务,能够有效地降低通信延时,降低核心网流量负担。MEC 的思想类似于计算机的内存和缓存,将常用的信息存储在 MEC,或者将特有的信息经过 MEC 进行快速转发,能够降低用户的通信延时。

用户平面功能(User Plane Function, UPF)是 MEC 系统的重要组成部分,主要用于处理数据在边缘网络的分发导流。在配电网差动保护的应用中,使用 UPF 下沉技术能够进一步缩短传输路径,降低差动保护的通信延时。配电网差动保护在使用 MEC 边缘计算和 UPF 下沉技术时,通信数据传输路径可直接通过 UPF 导流,不必再经过核心网,可进一步降低延时。通信传输过程如图 1 所示。

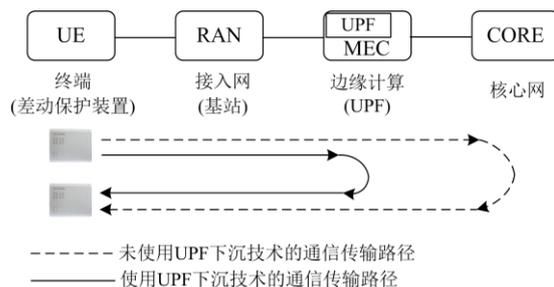


图 1 基于 MEC 边缘计算和 UPF 下沉技术的通信

Fig. 1 Communication based on MEC and UPF

1.4 网络切片

5G 网络切片(Network Slicing)是指基于软件定义网络(Software Defined Network)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization)技术,在通用的物理硬件平台上构建多个定制化、虚拟化、专用的和相互隔离的逻辑网络,不同的逻辑网络满足不同的业务需求^[11-12]。传统的在一个网络基础上增加网络容量的方法,已经无法满足 5G 业务多样化的需求。

5G 网络切片在电力行业中具有多种典型应用。以配电网业务中的差动保护、配网自动化三遥、智能电表为例,如图 2 所示。差动保护对网络的延时和可靠性要求较高,但对带宽要求较低,可应用在 uRLLC 场景;配网自动化三遥对网络的带宽要求较高,但对延时要求较低,可应用在 eMBB 场景;智能电表对网络的接入数量要求较高,但对延时要求较低,可应用在 mMTC 场景。5G 网络切片可以在无线接入网、承载网、核心网多个环节实现逻辑隔离,提供良好的安全性,还可以针对业务需求灵活配置,在电力行业应用中提供与配电网差动保护、配网自动化三遥、智能电表相匹配的虚拟网络。

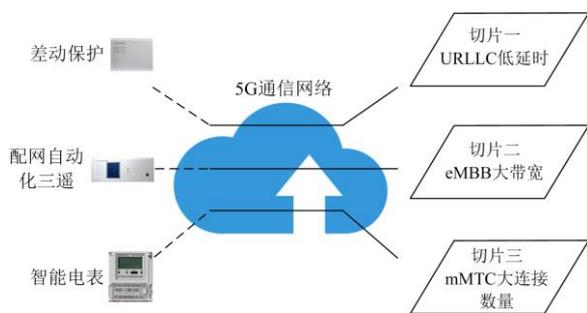


图 2 网络切片在配电网业务的应用

Fig. 2 Application of network slicing in distribution network

1.5 频谱和天线技术

5G NR 定义了更丰富的频谱资源, 在低、中、高频段均可以部署。在 5G R15 版本标准中, 定义了两大频率范围, 其中 FR1 对应的频率范围为 450~6 000 MHz, 即 Sub-6 GHz 频段; FR2 对应的频率范围为 24 250~52 600 MHz, 即毫米波频段^[13]。在 FR1 频率范围中, 我国使用的频段主要有 703~733/758~788 MHz、2 515~2 675 MHz、3 400~3 600 MHz、4 800~4 900 MHz 等频段。在配电网差动保护业务中, 700 MHz 频段具有传播损耗低、覆盖范围广、穿透能力强的特点, 同等覆盖范围内建设的基站数量更少, 更少的通信中间节点有利于降低差动保护端到端通信延时, 提高通信可靠性。

5G NR 采用了多天线技术和波束赋形。5G 多天线技术通道数可达到 64/128/256 个, 其覆盖维度从原有的平面覆盖提高到立体覆盖, 能够在相同的时频资源内为更多的终端服务^[14]。波束赋形是指利用多个天线对同一信号进行增益。在配电网差动保护业务中, 差动保护装置是固定位置安装的, 不存在移动通信的情况, 多天线技术和波束赋形技术有利于提高通信可靠性。

1.6 5G NR 帧结构

5G NR 引入了更加灵活的帧结构。相比 4G 系统, 5G NR 可扩展 OFDM 参数配置, 可以对子载波间隔、符号长度和 CP 长度等进行设置^[15-16]。5G NR 帧结构在时域上也可划分为固定结构和灵活结构两部分。固定结构部分沿用 4G 系统配置, 同样定义时域帧长度为 10 ms, 一个时域帧进一步划分为 10 个子帧, 每个子帧长度 1 ms。在时隙划分方面, 5G NR 采用灵活结构, 时隙长度和包含符号数可以根据子载波间隔灵活调整。一个子帧可以划分成 1、2 或者 4 个时隙, 每时隙又可以包括 7 个或者 14 个 OFDM 符号。此外, 5G NR 额外引入最小时隙(mini-slots)的概念, 可以将 slot 拆分成若干 mini-slots, 以便于 URLLC 业务的快速调度和传输。差动保护的

采样速率一般为 1 200~4 000 点/s, 采样点时间间隔为 250~833 μ s, 5G NR 子帧结构更利于差动保护采样数据的传输。

2 采用 5G 通信的差动保护技术

2.1 差动保护业务概述

差动保护的原理是基尔霍夫电流定理。以线路差动保护为例, 正常运行时线路两端的电流流入和流出相等, 差动电流等于零; 当线路发生故障时, 两端的电流流入和流出不相等, 差动电流大于整定值时差动保护动作, 使线路两侧断路器跳开, 从而切断电源^[17-18]。安装在线路两侧的差动保护装置需要使用通信通道交互电流、电压等信息, 这种通道称为纵联通道。差动保护使用的纵联通道类型主要有电力线载波通道、微波通道、导引线通道、光纤通道。目前国内广泛应用的是光纤通道, 电力线载波通道由于历史原因还有一定存量, 微波通道和导引线通道已经很少使用。纵联通道的性能直接影响到差动保护采样同步技术的快速性和可靠性^[19]。

5G 无线通信技术为配电网差动保护业务提供了一种新的纵联通道。但是当使用 5G 通信作为纵联通道时, 差动保护的采样同步方案、报文传输方案需要进一步分析, 5G 通信的延时和抖动对差动保护的影响也需要进一步验证。

2.2 差动保护采样同步方案

差动保护的采样同步技术, 根据时钟来源可分为基于内部时钟和外部时钟采样同步两大类。基于内部时钟的采样同步技术主要有采样插值同步法、采样时刻调整法、延时可测的插值同步法; 基于外部时钟的采样同步技术主要有基于绝对时钟源的采样序号对齐法^[20]。

基于内部时钟的采样同步技术, 主要依赖于通信链路应具有确定的路径、稳定的延时, 且不能有较大的通信延时抖动。采样插值同步法和采样时刻调整法主要基于“乒乓算法”原理, 要求通信链路的收发路径一致且延时稳定, 通过计算两侧装置的发送和接收时刻得出通信延时, 最终得出两侧采样间隔时间差, 进行插值计算或调整一侧采样时刻使采样同步。延时可测的插值同步法, 依赖于通信网络中的交换机、路由器等设备, 能够准确测量自身处理数据交换的延时, 并将延时数据累加存储在报文的特定位置, 保护装置依此回溯到报文发送的准确时刻, 采用插值算法实现采样同步。在基于 5G 通信的差动保护中, 采样数据传输环节包括无线空口、基站、核心网等各个环节的交换机、路由器、服务器, 各个环节的数据处理延时可测很难实现,

因此基于内部时钟的采样同步技术难以应用。

基于外部时钟的采样同步技术，主要依赖于外部绝对时钟源的准确和可靠。基于绝对时钟源的采样序号对齐法是在线路两端都配置时钟同步装置，时钟同步信号以 1 s 为间隔，发送至保护装置的微处理器，用来给采样数据置以序号标签，两侧的保护装置再按序号对齐的方法完成采样同步。该方法的采样同步精度主要包括“绝对时钟源授时精度 T1”和“差动保护装置 CPU 计时精度 T2”两部分，北斗卫星导航系统授时精度可达到 10 ns^[21]，差动保护装置 CPU 计时精度取决于使用的晶振频率，以选用 100 MHz 频率的晶振为例，CPU 计时精度为 10 ns，则两侧采样同步最大误差为 2 倍的 T1 和 T2 之和 40 ns。基于外部时钟的同步采样技术同步精度高，且不受通道传输路径的影响，可以应用于基于 5G 通信的差动保护。

2.3 差动保护报文传输方案

差动保护光纤纵联通道目前所使用的报文主要有两种，一种是基于 HDLC 高级数据链路控制协议的私有报文，另一种是基于 IEC 61850-9 协议的 SV 采样值报文，都是工作在数据链路层的两层报文。

5G 通信网络的核心基于 TCP/IP 协议簇，IP 协议工作在第三层网络层，TCP 和 UDP 协议工作在第四层传输层。TCP 和 UDP 协议的主要区别在于 TCP 是“面向连接”，具有保证数据正确性的重传和拥塞控制机制，实时性慢；UDP 是非“面向连接”，没有保证数据正确性的机制，但实时性较高^[22-23]。差动保护纵联通道报文与 UDP 报文的机制类似，对实时性要求高，数据正确性可由差动保护逻辑进行处理，因此差动保护报文在 5G 通信中采用 UDP 报文进行封装是一种具有延续性的解决方案。

UDP 报文主要包括以太网帧头、IP 协议帧头、UDP 协议帧头和应用数据四部分。各个协议帧头根据配置不同长度在 40~60 字节，应用数据一般包括三相电流模拟量采样值、三相电压模拟量采样值、采样序号、CRC 校验码等信息。考虑一定的扩展裕度，基于 5G 通信的差动保护 UDP 单帧报文长度一般在 100~300 字节。差动保护的报文发送频率一般与采样频率一致，一般有每工频周波 24 点、32 点、80 点采样，对应为 1 200 帧/s、1 600 帧/s、4 000 帧/s。因此，单个差动保护装置占用的 5G 通信带宽为 1~12 Mbit/s。

2.4 5G 通信的通道延时和抖动对差动保护的影响

差动保护业务对于通道延时和抖动要求极高。《DL/T 364-2019 光纤通道传输保护信息通用技术条件》中规定，用于继电保护的通信通道单向时延

应不大于 12 ms，《IEC 61850-90-12 电力公用事业自动化的通信网络和系统》中规定，差动电流模拟比较业务的通道抖动应小于 100 μs。

通道延时主要影响差动保护的動作时间。由于差动保护需要将两侧装置的采样点数据进行采样同步，因此保护装置必须设置一定的采样缓冲区存放本侧采样数据，等待对侧采样数据传输至本侧后进行采样同步。采样同步后的数据，经过差流计算、逻辑判别，满足动作条件再触发差动保护动作。

通道延时抖动对差动保护影响主要有两方面。一方面，通道延时抖动影响差动保护的動作时间，其原理与通道延时对差动保护的影响是相同的；另一方面，如果通道延时抖动很大，就无法使用“乒乓算法”原理，从而无法使用基于内时钟的采样同步方案。

基于 5G 通信的配电网差动保护端到端通道总延时如图 3 所示，由差动保护装置、5G CPE、基站和核心网等节点构成。

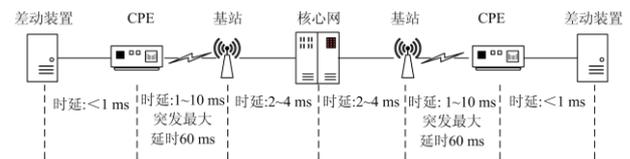


图 3 基于 5G 通信的差动保护通道总延时示意图

Fig. 3 Total delay of differential protection based on 5G

从图 3 的延时分布可以得出以下结论。5G 通信的通道延时主要由空口延时和核心网延时两部分构成。在目前 5G R15 标准的架构下，通道各个环节总延时在 6~30 ms，空中接口发生突发大延时的情况总延时可能大于 100 ms。差动保护对光纤通道的时延要求为不大于 12 ms，而 5G 通道延时不能可靠满足此要求，为了适配这种通信工况，差动保护可以在原有光纤差动方案的基础上增加适当的采样缓冲区，但是会牺牲一定的保护快速性；通道延时在 6~30 ms 内的抖动情况需要验证是否普遍存在，如果普遍存在则基于内部时钟乒乓算法的采样同步方法不能使用，需要采用基于外部时钟的采样同步方法；突发大延时超过 100 ms 的情况，需要验证发生概率，差动保护可以采取短时闭锁保护的方法。

通道延时抖动主要由空口突发大延时引起，原因有两点，一是终端下行 PDCCH 虚警，导致 DCI 解析错误，引发上/下行 HARQ 4 次重传；二是空口无线传播存在不确定性，PDCCH 采用盲检方式，存在一定虚警概率^[24]。由此可见，5G 通信空口协议还具有优化的空间，例如：优化上下行调度、优化空口误码、减少空口重传、减少重传时延。

3 一种基于 5G 通信配网差动保护实现方案

3.1 方案概述

本文提出了一种基于 5G 通信的配电网差动保护实现方案。该方案使用基于北斗卫星导航系统授时的采样序号同步法。通信报文格式采用基于 UDP 协议封装的 IEC 61850-9-2 SV 采样值报文, 报文内容包括三相电流采样值、三相电压采样值、采样序号等, 单帧报文长度为 175 字节。采样率为每工频周波 80 点, 即报文发送频率为 4 000 帧/s, 带宽为 5.6 Mbit/s。

差动保护的通信总体方案如图 4 所示。差动保护装置和 5G CPE 通信终端之间采用以太网连接, 接口型式为 RJ45, 传输速率为 100 Mbit/s。5G CPE 通信终端与基站采用 5G NR 新空中接口通信, 5G 核心网由通信运营商提供。线路两侧均配置北斗导航时钟同步装置, 用于对差动保护进行时钟和采样同步。

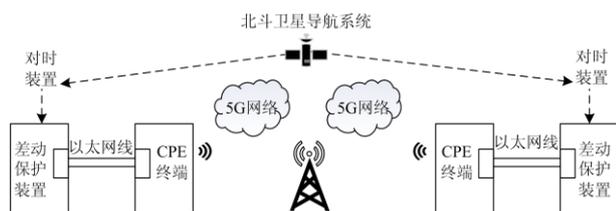


图 4 一种基于 5G 通信的配电网差动保护方案

Fig. 4 A method for differential protection of distribution network based on 5G

3.2 测试场景

本差动保护方案在多个通信试验室和试点工程现场进行了测试, 本文列举了其中三个具有代表性的测试场景。

测试场景一: 通信试验室内, 差动保护装置、5G CPE 通信终端、北斗对时设备安装于试验屏柜, 通信终端天线和北斗对时天线安装于户外, 试验室位于同一个 5G 基站覆盖范围内, 5G 核心网采用 NSA 非独立组网方式, 未使用 UPF 下沉技术。

测试场景二: 试点工程现场, 分为位于两个居民小区的环网箱, 差动保护装置、5G CPE 通信终端、北斗对时设备安装于环网箱内, 通信终端天线和北斗对时天线安装于环网箱顶部, 两个环网箱位于不同的 5G 基站覆盖范围内, 5G 核心网采用 SA 独立组网方式, 未使用 UPF 下沉技术。

测试场景三: 通信试验室内, 差动保护装置、5G CPE 通信终端、北斗对时设备安装于试验屏柜, 通信终端天线和北斗对时天线安装于户外, 试验室

位于同一个 5G 基站覆盖范围内, 5G 核心网采用 SA 独立组网方式, 使用 UPF 下沉技术。

通信网络版本: 三个通信网络均基于 5G R15 版本标准。5G R16 版本标准于 2020 年 7 月 3 日冻结发布, 相关通信设备仍在研发阶段, 目前不具备测试环境。

网络性能测试样本: 测试案例以差动保护装置 10 s 的通信数据样本为 1 组, 每个测试场景进行 10 组测试, 统计分析丢帧率、平均通道延时、通道延时抖动时间。

丢帧率: 差动保护 10 s 内发送报文理论值为 40 000 帧, 根据实际收到的数据帧计算丢帧率。

平均通道延时: 根据数据包的发送时刻和接收时刻计算平均通道延时。

通道延时抖动时间: 两个相邻数据帧的接收时间间隔和发送时间间隔的差值。本方案发送报文时间间隔为 250 μ s, 统计所有帧的接收时间间隔。

延时抖动时间占比: 分别统计抖动时间小于 1 ms、1~10 ms、大于 10 ms 的帧数在总帧数的占比。

三种测试场景的网络性能测试结果如表 1 所示。

表 1 通信网络性能指标

Table 1 Main performance of three test networks			
网络性能	网络一	网络二	网络三
丢帧率/%	0.05	0.005	0.005
平均通道延时/ms	25	15	10
最大抖动时间/ms	127	110	108
抖动时间 < 1 ms 占比/%	96.15	96.48	96.78
抖动时间在 1~10 ms 占比/%	3.57	3.47	3.17
抖动时间 > 10 ms 占比/%	0.28	0.05	0.05

由表 1 可以看出, 5G 通信采用 SA 独立组网时, 丢帧率、平均通道延时相较 NSA 非独立组网均有大幅的降低; 采用 UPF 下沉技术时, 平均通道延时进一步降低, 其他性能基本不变。三种网络的大部分延时抖动时间都在 1 ms 以内, 说明 5G 通信大部分时间比较稳定。通道延时抖动时间在 1~10 ms 的报文数占比达到 3% 以上, 通道延时抖动说明 5G 通信存在报文堆积现象, 报文堆积是指发送端按均匀间隔发送报文, 通过 5G 网络传输后接收端并不是均匀收到报文, 而是间断性地突然接收到连续多帧报文。三个测试环境均会偶尔出现抖动时间大于 100 ms 的情况。

针对上述现象, 差动保护进行了相应的改进, 采用了增加采样缓冲区和短时闭锁差动保护的方法。增加采样缓冲区主要解决两个问题, 一是测试场景的平均通道延时在 10~25 ms, 超过了光纤纵联

通道对通道延时的要求；二是测试场景通道延时抖动普遍在 0~10 ms，占比为 99.95%。短时闭锁差动保护主要解决通道延时偶尔大于 100 ms 的情况。

3.3 差动保护性能测试

分别在三种 5G 通信网络下进行差动保护性能测试。整定差动保护动作定值 1 A，施加 2 倍故障差流，差动保护动作时间测试结果如表 2 所示。

表 2 差动保护动作时间测试结果

Table 2 Operating time test result of differential protection

序号	网络一动作 时间/ms	网络二动作 时间/ms	网络三动作 时间/ms
1	62.1	50.3	48.4
2	60.3	49.6	45.6
3	60.3	53.2	48.1
4	62.9	52.8	47.3
5	61.3	53.3	43.6
6	58.6	52.9	47.9
7	58.5	50.3	45.2
8	58.3	48.7	44.3
9	60.1	48.3	43.4
10	63.2	50.1	45.3
平均	60.5	50.9	45.8

从表 2 可以看出，基于 5G 通信的差动保护动作时间有明显增加。配电网光纤纵联差动保护动作时间一般在 35 ms 以内，使用 5G 通信后差动保护动作时间有明显增加，结合表 1 中三个网络的平均通道延时分析，差动保护动作增加时间和平均通道延时一致。

4 结论

本文介绍了 5G uRLLC 场景实现低延时、高可靠通信的关键技术，分析了差动保护采用 5G 通信时的技术难点，提出了一种基于 5G 通信的配电网差动保护实现方案，验证了 5G 通信技术承载配电网差动保护业务的可行性。基于 5G 通信的差动保护性能可以满足配电网对保护的要求。

目前，基于 R15 版本的 5G 通信存在报文间隙不均匀、突发延时大等缺点，在短报文、空口重传机制等方面还可以进行优化。差动保护也存在通信流量较大、基于外部对时采样同步方法受天气和地理因素影响较大的缺点，在降低流量和采样同步方案方面也存在改进空间。

参考文献

[1] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on

relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.

[2] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.

[3] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.

[4] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.

[5] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG Ping, TAO Yunzheng, ZHANG Zhi. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.

[6] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.

[7] 朱红梅, 林奕琳, 刘洁. 5G URLLC 标准、关键技术及网络架构的研究[J]. 移动通信, 2017, 41(17): 28-33.
ZHU Hongmei, LIN Yilin, LIU Jie. Research on URLLC standard, key technique and network architecture for 5G[J]. Mobile Communications, 2017, 41(17): 28-33.

[8] 王宏延, 顾舒娴, 完颜绍澎, 等. 5G 技术在电力系统中的应用与研究[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 78-85.
WANG Hongyan, GU Shuxian, WANYAN Shaopeng, et al. Research and application of 5G technology in power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 78-85.

[9] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G[J]. China Communications, 2015, 121(10): 1-15.

[10] DEMESTICHAS P, GEORGAKOPOULOS A, KARVOUNAS D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio access network[J]. IEEE Communications

- Magazine, 2013, 8(3): 47-53.
- [11] 毛玉欣, 陈林, 游世林, 等. 5G 网络切片安全隔离机制与应用[J]. 移动通信, 2019, 43(10): 31-37.
MAO Yuxin, CHEN Lin, YOU Shilin, et al. 5G network slicing security isolation mechanism and application[J]. Mobile Communications, 2019, 43(10): 31-37.
- [12] 夏旭, 朱雪田. 5G 在能源互联网应用的分析和思考[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 29-33.
XIA Xu, ZHU Xuétian. 5G application for energy internet[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(6): 29-33.
- [13] 鲜永菊, 张艳. 5G 网络中基于用户需求的频谱资源分配方案[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(5): 15-21.
XIAN Yongju, ZHANG Yan. Spectrum allocation scheme based on user requirements in 5G network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2018, 30(5): 15-21.
- [14] MARZETTA T L. Non-cooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [15] 杨士霄, 高月红, 张欣, 等. 5G 新空口下 eMBB 与 URLLC 业务复用技术的研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2018, 31(8): 23-28.
YANG Shixiao, GAO Yuehong, ZHANG Xin, et al. 5G NR-multiplexing of eMBB and URLLC[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2018, 31(8): 23-28.
- [16] 赵福川, 刘爱华, 周华东. 5G 确定性网络的应用和传送技术[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 62-67.
ZHAO Fuchuan, LIU Aihua, ZHOU Huadong. Applications and transmission technology of 5G deterministic network[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 62-67.
- [17] 王坤. 5G 时代物联网技术在电力系统中的应用[J]. 通信电源技术, 2018, 35(5): 187-188.
WANG Kun. The application of the internet of things in the 5G era in the power system[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(5): 187-188.
- [18] GANGOLU S, SARANGI S. A novel complex current ratio-based technique for transmission line protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 239-247. DOI: 10.1186/s41601-020-00168-6.
- [19] 王廷凰, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. 供用电, 2019, 36(9): 18-21, 27.
WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [20] 李文正, 李宝伟, 倪传坤, 等. 智能变电站光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 136-140.
LI Wenzheng, LI Baowei, NI Chuankun, et al. Study on synchronization method for optical differential protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 136-140.
- [21] 张浩, 杨鸿珍, 邵炜平, 等. 北斗 RNSS 授时技术在智能电网雷电定位系统中的应用[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 134-141.
ZHANG Hao, YANG Hongzhen, SHAO Weiping, et al. Application of Bei-Dou RNSS timing technology in smart grid lightning locating system[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 134-141.
- [22] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 97-103.
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 97-103.
- [23] 陈晓杰, 徐丙垠, 陈羽, 等. 配电网分布式控制实时数据快速传输技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 151-158.
CHEN Xiaojie, XU Bingyin, CHEN Yu, et al. Real-time data fast transmission technology for distributed control of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 151-158.
- [24] 王常玲, 赵元. 基于 5G 承载网的电力差动保护业务时延抖动分析[J]. 通信世界, 2019, 32(19): 33-36.
WANG Changling, ZHAO Yuan. Analysis of delay of differential protection service based on 5G network[J]. Communications World, 2019, 32(19): 33-36.

收稿日期: 2020-09-19; 修回日期: 2021-03-02

作者简介:

张建雨(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网控制保护技术; E-mail: zjyok1984@163.com

姜睿智(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网控制保护技术;

李俊刚(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网控制保护技术。

(编辑 许威)