

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201209

## 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析

高维良, 高厚磊, 徐彬, 李林

(电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

**摘要:** 光纤铺设费用高且普及率较低, 不利于配网差动保护的大面积推广。5G 的高性能和商用化为解决配网差动保护通道问题提供了理想机遇。通过理论分析和计算, 提出差动保护对于通信通道的要求, 包括通道速率、时延、可靠性以及安全性等方面。介绍并分析了 5G 差动保护实现的技术基础——网络切片、切片架构以及基于网络切片的电网安全体系。最后, 通过分析 5G 的主要性能指标, 得出 5G 对于配电网差动保护具有良好的适配性, 可以取代光纤成为配网差动保护新的数据通道。

**关键词:** 配电网; 差动保护; 5G; 通道; 可行性

### Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks

GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, LI Lin

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,  
Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Fiber laying costs are high and its popularity is low. These factors limit the large-scale promotion of differential protection in distribution networks. The high performance and commercialization of 5G provides a rare chance for solving the above channel problem. Through theoretical analysis and calculation, the requirements for a communication channel of differential protection are presented, including rate, delay, reliability and security of the channel. Then, the technical basis for 5G-based differential protection is introduced and analyzed. This mainly discusses network slice, slice architecture, and the security system when used for the power grid. Finally, through analyzing the main performance index of 5G, it can be concluded that 5G has good adaptability to differential protection of a distribution network, and can replace optical fiber to become a new communication channel.

This work is supported the National Natural Science Foundation of China (No. 51877127), and the Science and Technology Project of Shandong Electric Power Company (No. 5206011900DG), and the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202055018A-0-0-00).

**Key words:** distribution network; differential protection; 5G; channel; feasibility

## 0 引言

近年来, 新能源发电技术日益发展<sup>[1]</sup>, 配网中分布式电源(Distributed Generation, DG)的接入容量越来越大, 新建设的城市配电网为了进一步提高供电可靠性, 越来越多地采用闭环设计或者双环网结构。传统的单端辐射状配网变为了复杂的多端多源网络<sup>[2]</sup>, 三段式过流保护逐渐不再适用<sup>[3-6]</sup>, 电流差

动保护被引入配网当中。电流差动保护具有定位准确、灵敏性高、无需电压信息等优点, 十分适合新型配网结构。传统的基于光纤的差动保护需要光纤专网通信, 但城市中铺设光纤难度大、工期长、费用高, 且有些地区根本不具备光纤铺设的条件, 这一直阻碍着配网差动保护大面积推广。

作为上一代移动通信技术, 4G 的平均速率可以达到 10 Mbps, 理论上可以为差动保护提供数据传输服务。但差动保护并没有利用 4G 网络作为无线通信的通道, 原因主要有以下几条: (1) 时延过高。4G 系统的平均时延在 50~100 ms, 不能满足保护快速动作的时间要求。(2) 4G 通信网络可靠性较差,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51877127); 山东省电力公司科技项目资助(5206011900DG); 国网总部科技项目资助(5100-202055018A-0-0-00)

其误码率仅能达到 $10^{-3}$ ，不能满足差动保护对通道可靠性的要求。(3) 4G 网络系统耦合性太强，无法将不同类型业务实现逻辑上的分离，差动保护数据在网络中传输时易受到其他业务的干扰或者恶意攻击，其安全性和可靠性得不到保障。

5G(5<sup>th</sup> Generation mobile networks)相比于 4G 在速率、时延和可靠性等方面都有较为明显的提升，其部分关键性能指标对比如表 1 所示<sup>[7]</sup>。5G 通信具有高速率、低时延、高可靠性和无线通信的优点<sup>[8]</sup>。根据 IMT-2020 推进组对 5G 时延提出的要求，URLLC 场景下 5G 空口时延为 1 ms，端到端时延在 10 ms 以内<sup>[9]</sup>。5G 的带宽最低可以达到百兆赫兹，其接入容量可达每平方公里 100 万台设备。5G 网络中具有高精度时间同步信息，其空口授时精度可以达到 300 ns<sup>[10]</sup>。此外，5G 通信应用网络切片技术，可以实现差动保护业务与其他类型业务在逻辑上隔离，在提供高可靠低时延通信通道的同时也为差动保护数据的传输提供了高安全性。

表 1 5G 与 4G 性能对比

Table 1 Performance comparison of 5G and 4G

性能	4G	5G
峰值速率	上行 50 Mbps 下行 100 Mbps	上行 10 Gbps 下行 20 Gbps
延时	< 100 ms	< 15 ms
覆盖范围	3~5 km	0.2~1 km
时钟同步	1 $\mu$ s	300 ns
可靠性	99.9%	99.999%

综上，5G 通信的性能特点与配网差动保护对通道的需求非常契合，有能力代替光纤成为差动保护新的通信通道，其同步授时能力也可以用来解决差动保护两端电流数据的同步问题。5G 与差动保护相结合，为配电网应用和推广电流差动保护提供了新的解决方案。

本文针对 5G 用作配网差动保护通道的可行性进行详细论证。第一部分是配网差动保护对通道的需求分析，包括通信速率、通道时延、通信可靠性及通信安全性；第二部分介绍了 5G 通信应用于配电网差动保护的技术基础——网络切片技术；第三部分对 5G 通信性能进行分析，包括速率指标、时延指标、可靠性指标、安全性指标；最后一部分得出可行性结论。

## 1 差动保护对通信通道的需求

### 1.1 差动保护对通道速率的要求

电流差动保护需要利用通信通道将本侧电流的瞬时采样值或者相量值传送到对侧，每侧保护根据

对两侧电流相量或者瞬时值信息的比较结果区分是区内还是区外故障。基于光纤的差动保护通信方式如图 1 所示。

保护装置使用的数据帧类型有一定的要求，输电网差动保护一般采用 HDLC 协议的帧格式，该协议下一帧数据由报文头、开关量、控制位、报文内容、CRC 校验位以及报文尾等多部份组成，其中每部分所占的具体字节数如图 2 所示。

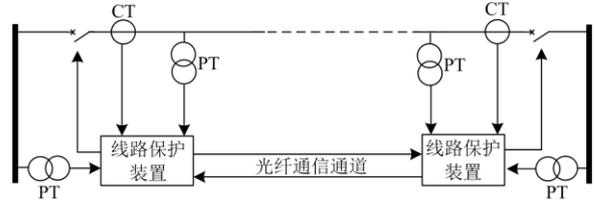


图 1 光纤差动保护通信示意图

Fig. 1 Communication schematic diagram of optical fiber differential protection

起始符 (6字节)	帧头 (2字节)	地址位 (2字节)	控制位 (2字节)	报文内容 (若干字节)	开关量 (2字节)	CRC校验位 (4字节)	帧尾 (2字节)
--------------	-------------	--------------	--------------	----------------	--------------	-----------------	-------------

图 2 HDLC 帧格式

Fig. 2 HDLC frame format

配网差动的数据帧形式也可以按照类似结构设计。报文内容长度与采用的差动判据有关，瞬时值差动需要传输三相电流瞬时值(6 字节)，相量差动需要三相电流的实虚部(12 字节)，正序故障分量差动需要传输正序故障分量的实虚部(4 字节)。有的数据帧内还包含采样点序号、电压辅助相量、开关量信息等。取保护传输数据较多的情况，即传输三相电流和电压数据(24 字节)，则一帧数据至少包含 44 字节内容，考虑备用信息等裕度，数据包长度可能会在 60 字节及以上。若每帧数据的传输间隔为 1 ms，则此时通道的通信速率最低要为 480 kbps。

考虑故障发生时，一个区域内有多台保护装置要同时进行数据交换，以区内区外各两台为例，考虑一定裕度，则用于差动保护的通信通道最少要能提供 2 Mbps 的带宽速率。

### 1.2 差动保护对通道时延的要求

配网中不需要利用通道进行两侧装置的采样同步，因此通道的延时主要影响保护动作时间。差动保护总的时延 $T_{\Sigma}$ 可以用式(1)进行计算。

$$T_{\Sigma} = T_s + T_d + T_l + T_c + T_r \quad (1)$$

式中： $T_s$ 表示采样时间，由采样频率和利用的采样点个数决定，其最大值不超过一个周波的时间； $T_d$ 表示保护装置处理数据时间； $T_l$ 表示数据包传输需

要的时间, 采用 2 Mbps 通信接口时, 可忽略不计;  $T_c$  表示通信通道延时, 与通信距离和通信介质有关;  $T_r$  表示保护出口继电器延时时间,  $T_d + T_r$  时间较短, 一般固定在 15 ms 以内。为尽量减小电压跌落对敏感负荷的影响, 配电网故障最好能在 150 ms 内切除。断路器的延时一般为 30~40 ms, 熄弧时间在 10 ms 左右, 因此保护响应的时间应该在 100 ms 之内。设保护在故障后进行  $n$  次数据交互, 则通信通道单向时延应该小于等于  $65/n$  ms, 常用的保护逻辑中交互信息次数一般不大于 3, 考虑一定裕度, 保护通信通道单向时延应该控制在 20 ms 以内。

### 1.3 差动保护对通道可靠性的要求

保护发送的数据帧中如果出现误码会导致数据帧重传或丢失, 从而导致保护误动或者拒动。保护的可靠性通过日闭锁时间  $T_{BS}$  来度量, 当一天时间内  $T_{BS}$  小于 0.864 s, 即可认为通道误码性能满足要求<sup>[11]</sup>。对于日闭锁时间可采用式(2)进行计算。

$$\begin{cases} T_{BS} = \frac{P_{er} \cdot 86400 \cdot n_b \cdot T_{bs}}{T_s} \\ n_b = V_{br} \cdot T_f \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{er}$  表示通道误码率;  $n_b$  表示数据帧的长度;  $T_{bs}$  表示由于一帧误码引起的保护闭锁时间;  $T_s$  表示采样间隔时间;  $V_{br}$  表示通道速率;  $T_f$  表示发送一帧数据需要的时间。

计算中采用误码均匀分配原则, 当数据帧中有一个及以上误码时, 即舍弃该帧, 保护闭锁一个采样间隔的时间。以配电网中基于正序故障分量的分布式保护装置为例, 采样频率选择为 1 200 Hz, 数据包长度为 60 字节, 通信距离为 10 km, 通道通信速率为 2 Mbps, 计算得出保护允许的误码率应当小于等于  $1 \times 10^{-7}$ 。式(2)中计算标准均以输电网为参照, 考虑到配电网电压等级较低, 信息传输距离很短, 且计算中采用了均匀分配原则, 而实际现场发生误码时, 一帧中可能有多个误码, 因此其误码率要求可以适度降低为  $1 \times 10^{-6}$ 。

### 1.4 差动保护对通道安全性的要求

电力系统信息安全管理中规定, 对参与系统电力生产、系统调度、继电保护、控制监测等的信息, 应该在电力通信专网中进行, 电力通信专网接入电力信息系统处需设置安全接入区。通信专网要求对不同的电力系统业务进行安全等级分区, 各专区网络间要互相隔离, 互不干扰。专网只为目标电力业务提供服务, 不与外界网络连接, 避免受到恶意的网络攻击和信息泄露<sup>[12-13]</sup>。继电保护位于生产控制大区中的安全 I 区(控制区), 按规定在进行差动保护

的数据传输过程中, 应该与其他电力信息在物理层或者数据链路层进行隔离, 必要时可以进行信息加密认证。因此, 若要作为差动保护的通信通道, 其本身应能提供专网组网功能, 与公网或专网内其他数据网实现相互隔离; 与外部网络的接口处可设置认证授权功能。

综上, 提出配网差动保护对通信通道的要求: 通道传输速率应大于等于 2 Mbps, 端到端单向时延应小于等于 20 ms, 通道误码率应低于  $1 \times 10^{-6}$ , 通道安全性达到生产控制大区安全 I 区等级。

## 2 5G 网络切片

### 2.1 5G 网络切片概述

为了更好地满足物联网以及 5G 其他垂直行业的差异化需求, 5G 提出了网络切片技术。5G 网络切片是以 MEC、软件定义网络(SDN)、网络功能虚拟化(NFV)为技术支撑, 对网络功能进行软件定义, 将物理硬件设施和网络功能进行分离的一项技术<sup>[14]</sup>。其特点是可实现分类管理、按需组网和灵活部署。

网络切片为终端设备到核心网之间的通信提供专用通路, 由空口接入、承载网传输和核心网数据处理三部分组成。三部分分别负责不同的功能, 共同支撑起网络切片服务系统。具体网络切片系统示意图如图 3 所示。

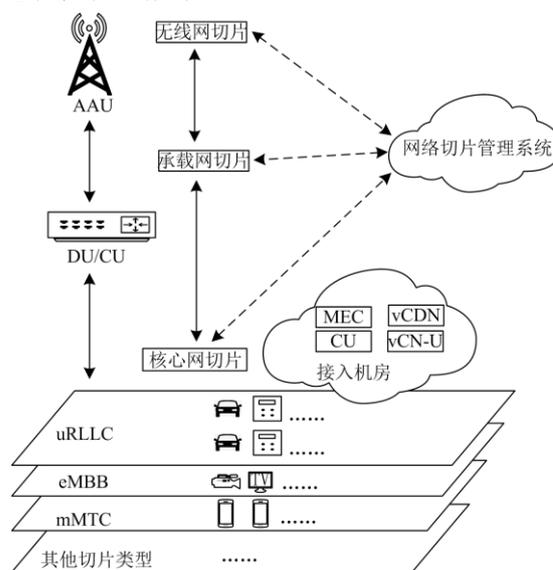


图 3 网络切片示意图

Fig. 3 Schematic diagram of network slice

网络切片的应用场景一般主要为三大类, 不同应用场景的网络切片可以满足不同的业务需求, 如: 差动保护业务对时延要求较高, 需要在 URLLC 场景下才能实现; 基于 PMU 的广域测量技术设备接

入量较多，需要在 MMTC 场景下才能达到要求；用于线路或变电站巡检的无人机或机器人等，需要实时回传高清影像，对带宽有一定的要求，必须接入 EMBB 类型的网络切片<sup>[15]</sup>。

5G 通信利用网络功能虚拟化技术将不同的业务分割在不同的逻辑子网，所以即使在同一场景类型下的不同业务，也只会在自己的切片中进行信息的传输和交互，互相不会受到干扰，数据安全性得到保障。

### 2.2 用于电力系统的 5G 网络切片

电力行业作为与 5G 关系最为紧密的垂直行业之一，是网络切片应用的重要场景。电力系统中的业务类型广泛，需要定制大量不同类型的切片服务。此外，根据电力系统无线通信应用规定，接入生产控制大区的无线专网必须设立安全接入区，与广域网的纵向连接处需设置加解密认证装置<sup>[16]</sup>，以此保证电力系统的信息安全。要满足上述要求，需要 5G 网络有较高的网络容量、较强的资源编排能力以及较高的安全性。5G 核心网具备微服务级编排能力，运营商根据电力用户提出的需求，在后台界面进行切片的参数设置、资源划分以及功能部署。为保证切片服务符合安全性要求，技术人员会设置接口安全管理，包括用户和设备接入认证、电力切片安全隔离、消息传输加密等<sup>[15]</sup>。电力网络切片的架构和安全体系如图 4 所示。

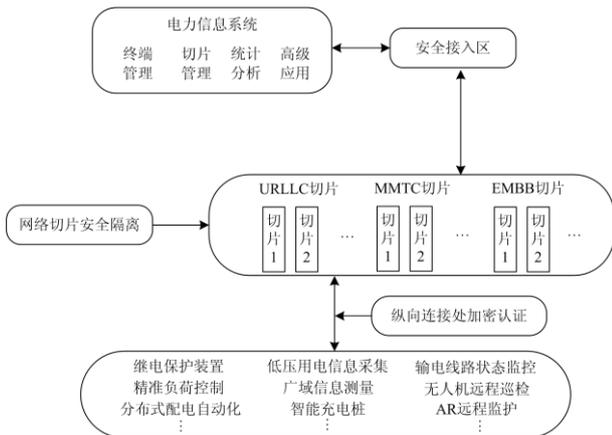


图 4 电力网络切片架构和安全体系

Fig. 4 Power network slice architecture and security system

为了使电力网络切片可靠地提供低时延、高带宽等服务，5G 通信采用了双链路通信技术，提高数据传输成功率的同时减少重传率。在保证传输可靠性的基础上，对核心网的用户面和控制面功能进行分离，将用户面下沉部署，结合 MEC 技术，使接入机房或基站有一定的数据处理能力，终端可以更

快地得到数据响应<sup>[17-18]</sup>。相较于公网中的数据，网络切片中的数据传输速度更快、转发路由更少、数据安全性和保密性更高。图 5 中记录了数次保护装置分别利用公网和网络切片进行数据传输的时间对比，由图中可以看出，当由网络切片为保护提供专用通道时，传输时延大概会缩短 23 ms。

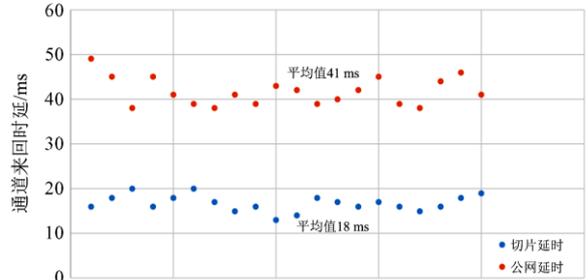


图 5 公网和切片时延对比

Fig. 5 Time delay comparison between public network and slice

综上，网络切片技术为不同类型的电力系统业务提供了高可靠、高安全和高速的通信通道，是实现 5G 智能电网的重要技术基础。

## 3 5G 性能特征分析

### 3.1 5G 速率指标分析

5G 是利用高频段资源(3~6 GHz 和 24 GHz 以上)进行通信的技术，根据香农定理，信号的频段越高，传输速率也越快<sup>[19]</sup>。同时，5G 新应用了 Massive MIMO 技术，Massive MIMO 的好处是可以实现信道空间的分集和复用，从而大大提高通信的速率。根据 ITU-R 发布的 5G 通信性能指标，5G 通信的峰值速率可以达到 10 Gbps 以上，用户平均体验速率可达百兆每秒。

利用高频段资源的缺点是 5G 信号对应的波长非常短，其穿透、绕射和抗干扰能力比 4G 要弱很多。因为差动保护是要在 URLLC 场景下实现，对带宽和容量要求并不高，并且考虑室外环境下基站的覆盖范围要较大。所以，应用 5G 作为差动保护通信通道时，可以选择中低频段的信号，目前国内主要试验频段为 3.5 GHz。5G 受到的户外损耗主要为大气吸收、雨雾天气影响以及传播路径上障碍物引起的路径损耗<sup>[20]</sup>。其中，大气吸收和雨雾衰减的影响相对较小。由大气吸收引起的衰减，只会在极高频的几个特定频段(60 GHz 等)产生较大值，在 3.5 GHz，由大气吸收引起的信号衰减小于 0.1 dB/km，可以忽略不计<sup>[21]</sup>。雨雾天气在 28 GHz 以下频段引起的衰减同样不是很大，在降雨量为 25 mm/h 时，损耗仅为 5 dB/km<sup>[22]</sup>。

对于传播路径上的损耗, 电信运营商在修建基站之前, 会根据基站(天线)高度、用户端高度、基站预计覆盖范围和场景等因素, 做出链路预算。在实际使用过程中, 5G 基站也会实时地根据终端反馈的信号情况, 动态调整发射功率和波束角度, 使其得到一个相对较好的信号质量。因此在确定终端到基站的通信路径以及基站的覆盖场景后, 就可以按照链路预算的结果来建设基站。为了保证差动保护需要的最低通信速率 2 Mbps, 基站需要提供稳定可靠的覆盖范围, 在建筑物密集的城区, 基站间的距离要在 300 m 左右; 而在一般城区, 站间距可以在 400 m<sup>[23]</sup>。

针对信号损耗高的情况, 5G 中应用 Massive MIMO 和波束赋形技术加以改善。Massive MIMO 技术可以增加基站输出功率, 波束赋形技术可以使 5G 信号在特定方向上增强, 集中能量精确对准用户, 提高抗干扰能力以及减少损耗。

### 3.2 5G 时延指标分析

4G 系统中采用子帧作为最小调度单位, 所以即使传输最小的数据包, 最小的传输时间间隔也固定为 1 ms<sup>[24]</sup>。5G 采用更短的帧结构, 以时隙为最小调度单位, 可以缩短最小传输间隔, 同时 5G 支持多种上下行时隙的配比, 传输方式更加灵活。5G 同时优化了数据的调度方式, 上行时采用预调度或者

免授权调度的方式, 减少基站分配资源和授权的时间; 下行时采用抢占资源策略, 高优先级业务可以抢占低优先级业务的传输资源, 加快了数据的传输<sup>[25]</sup>。网络切片技术使核心网中用户面功能下沉, 也缩短了数据的传输时间。

URLLC 场景下 5G 的端到端时延理论上在 10 ms 以内, 但实际运行中各部分的传输时延会有一些的偏差。如图 6 所示, URLLC 切片下端到端的时延主要由终端到基站的空口时延、承载网传输时延以及核心网处理数据的时延组成<sup>[26]</sup>。对于空口时延, 目前国内主要应用 TDD 网络下的 2.5 ms 双周期帧结构, 在这种帧结构下, 数据下行产生的最大时延为 3 ms, 上行传输在基于预调度方式时, 最大时延为 2.5 ms<sup>[27]</sup>。承载网传输时延主要由数据从基站向核心网传输的路径时延以及路由设备转发的时延组成<sup>[28]</sup>。承载传输通道一般为光纤组成, 其速度极快, 200 km 的距离时延只为 1 ms。路由设备转发时延同样很短, 在任务量较大时, 时延也控制在 0.05 ms 以内。当核心网距离基站在 200 km 之内时, 承载网时延基本可以控制在 1 ms 左右。数据在核心网内的计算、转发、调度等时间, 一般在 5 ms 之内。

基于以上时延分析并考虑一定裕度的情况下 5G 端到端的单向时延最大可以达到 15 ms。

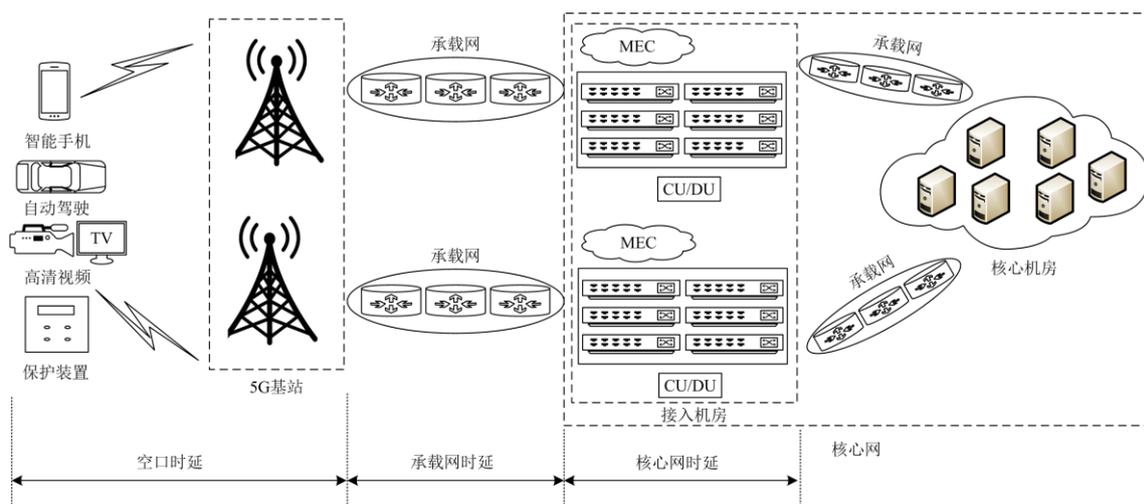


图 6 URLLC 网络切片时延组成

Fig. 6 URLLC network slice delay composition

### 3.3 5G 可靠性指标分析

5G 中应用了多链路传输机制, 将相同的数据资源用几个独立的不同的路径并行传输<sup>[29]</sup>, 以此来增加传输成功率, 减少重传次数。同时, 5G 中采用 6 阶的调制方式<sup>[27]</sup>, 在保证高速率的同时提高可靠性。在 R15 版本中, 3GPP 对 5G 数据传输提出的可

靠性要求为: 5G 在 1 ms 时延内传输 32 字节的误码率不得超过 0.001%。按照式(2)折算, 其传输单字节的误码率在  $10^{-7}$  左右。随着 5G 技术的进一步发展以及控制类行业对可靠性需求的不断提高, 预计在下个版本中, 5G 可以实现 99.9999% 的可靠性指标。

### 3.4 5G 安全性分析

5G 属于虚拟网络技术,具有较强的脆弱性。在应用 5G 通信网络作为差动保护通信通道时,需要保证通信网络不受干扰以及恶意攻击,从而保证继电保护的可靠性。5G+网络切片技术为电力系统提供无线专网通信时,其安全等级可以达到生产控制大区安全 I 区等级要求:用于电力系统的网络切片会在电力信息系统与网络切片无线专网连接处设置安全接入区;无线专网与公网的纵向连接处也设置了加解密认证,仅允许已授权的用户或设备接入,外部人员或电子设备需经认证解密后连入。同时,相关人员还会采用对数据信息进行加密处理,甚至采用专门的入侵检测技术,来保证电力系统信息的安全性和保密性<sup>[30]</sup>。

## 4 结论

本文首先对差动保护对通信通道的需求做出分析,提出了配电网差动保护通信通道的指标要求。其次对 5G 网络切片技术和各方面性能做出了介绍和分析,并论证在最严重情况下 5G 的各方面性能指标。结果表明,在保证站间距分布合理以及利用网络切片的前提下,5G 通信在速率、时延、可靠性和安全性等方面,完全满足配电网差动保护对通道的要求,可以替代光纤成为配网差动保护新的通信通道。

### 参考文献

- [1] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [2] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78-84.  
XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.
- [3] 马帅, 武志刚, 高厚磊, 等. 适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 43-50.  
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 43-50.
- [4] 邵庆祝, 杨畅, 谢民, 等. 基于 RTDS 的光伏接入配电网故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 1-8.  
SHAO Qingzhu, YANG Chang, XIE Min, et al. Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 1-8.
- [5] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [6] 杨晶晶, 林凡勤, 周成瀚, 等. 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 116-123.  
YANG Jingjing, LIN Fanqin, ZHOU Chenghan, et al. Comparison protection method of current sequence components for feeder with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 116-123.
- [7] SHAFI M, MOLISCH A, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [8] 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.
- [9] IUT. ITU-R M. 2083 IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[S]. Geneva: ITU-R, 2015.
- [10] 王廷凰, 余江, 徐健, 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 Yanhuang, 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.
- [11] 微波电路传输继电保护信息设计技术规定: DL/T 5062—1996[S].  
Technical specification of relay protection information design for microwave circuit transmission: DL/T 5062—1996[S].
- [12] 国家电监会第 5 号令. 电力二次系统安全防护规定[S]. 北京: 国家电监会, 2004.
- [13] 国家经贸委[2002]第三十号令. 电网和电厂计算机监控系统及调度数据网络安全防护的规定[S]. 北京: 国家经贸委, 2002.

- [14] 刘彩霞, 胡鑫鑫. 5G 网络切片技术综述[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 569-575.  
LIU Caixia, HU Xinxin. Overview of 5G network slicing technology[J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(6): 569-575.
- [15] 夏旭, 朱雪田, 梅承力, 等. 5G 切片在电力物联网中的研究和实践[J]. 移动通信, 2019, 43(1): 63-69.  
XIA Xu, ZHU Xuétian, MEI Chengli, et al. Research and practice on 5G slicing in power internet of things[J]. Mobile Communications, 2019, 43(1): 63-69.
- [16] 韩治, 张晋. 5G 网络切片在智能电网的应用研究[J]. 电信技术, 2019(8): 5-8.  
HAN Zhi, ZHANG Jin. Research on the application of 5G network slicing in smart grid[J]. Telecommunications Technology, 2019(8): 5-8.
- [17] 梁雪梅. 5G 网络切片技术在国家电网中的应用探讨[J]. 移动通信, 2019, 43(6): 47-51.  
LIANG Xuemei. Application discussion on 5G network slicing technology in state grid corporation of China[J]. Mobile Communications, 2019, 43(6): 47-51.
- [18] 李少华. 浅析 5G 网络低时延特性及优化措施[J]. 电子世界, 2018(24): 117-118.  
LI Shaohua. A brief analysis of low delay characteristics and optimization measures of 5G network[J]. Electronics World, 2018(24): 117-118.
- [19] 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.
- [20] OBARA T, OKUYAMA T, et al. Indoor and outdoor experimental trials in 28-GHz band for 5G wireless communication systems[C] // Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), August 30-September 2, 2015, Hong Kong, China: 846-850.
- [21] RANGAN S, RAPPAPORT T. S, et al. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 366-385.
- [22] 李茜茜. 毫米波在大气中的传播损耗及对 5G 通信的影响[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.  
LI Qianqian. Millimeter wave propagation loss in the atmosphere and the effect on 5G communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [23] 赵伟康. 5G 传播损耗及链路预算[J]. 中国新通信, 2019, 21(24): 8-9.  
ZHAO Weikang. 5G transmission loss and link budget[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(24): 8-9.
- [24] 董帝焯, 许国平, 林斌. URLLC 低时延的技术研究及业务应用[J]. 移动通信, 2020, 44(4): 78-84.  
DONG Dilang, XU Guoping, LIN Bin. Low-latency technology research and service application of URLLC[J]. Mobile Communications, 2020, 44(4): 78-84.
- [25] 梁健生, 陈晓冬. URLLC 关键技术研究及空口时延分析[J]. 移动通信, 2020, 44(2): 35-39, 44.  
LIANG Jiansheng, CHEN Xiaodong. On the key technology research and air interface delay analysis of URLLC[J]. Mobile Communications, 2020, 44(2): 35-39, 44.
- [26] 林何平, 高志英, 韩剑, 等. 网络时延分析及面向 5G 的低时延策略[J]. 电信工程技术与标准化, 2018, 31(9): 26-30.  
LIN Heping, GAO Zhiying, HAN Jian, et al. Research on network delay and low latency strategy of 5G[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2018, 31(9): 26-30.
- [27] 黄韬, 李鹏翔. URLLC 关键技术和网络适应性分析[J]. 移动通信, 2020, 44(2): 25-29.  
HUANG Tao, LI Pengxiang. Analysis of URLLC key technologies and network adaptability[J]. Mobile Communications, 2020, 44(2): 25-29.
- [28] 许明元. 5G 低时延技术的应用浅析[J]. 移动通信, 2017, 41(9): 90-96.  
XU Mingyuan. Analysis on the application of 5G low latency technology[J]. Mobile Communications, 2017, 41(9): 90-96.
- [29] 温萍萍. 5G 网络中支持 URLLC 业务的数据复制传输技术[J]. 无线互联科技, 2018, 15(10): 20-22.  
WEN Pingping. Data duplication technique supporting URLLC service in 5G network[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(10): 20-22.
- [30] 薛帮国. 5G 网络数据安全策略探讨[J]. 计算机产品与流通, 2018(9): 50-51.  
XUE Bangguo. Discussion on 5G network data security strategy[J]. SP, 2018(9): 50-51.

收稿日期: 2020-10-08; 修回日期: 2021-03-02

作者简介:

高维良(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网保护与故障自愈; E-mail: 17865192112@163.com

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: houlei@sdu.edu.cn

徐彬(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为 5G 在电力系统的应用以及海上风电场的保护与控制。E-mail: xubinsdu@163.com

(编辑 葛艳娜)