



配电网5G通信架构及其时延可靠性研究

王海洋¹, 王玉东², 刘晗³, 孙海蓬¹, 杨瑾⁴, 李正浩³

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250100;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001;

4. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 5G在数字配电网领域的核心价值在于发挥5G的超高可靠、低时延技术优势, 为配电网涉控业务提供高可靠、低时延的通信。为了系统地提供配电网5G通信时延与可靠性理论分析方案, 结合数字配电网业务给出了配电网5G通信典型架构, 深入分析了针对配电网5G通信的时延模型, 针对国内四大运营商5G帧结构逐一进行了端到端时延分析, 并通过5G链路级仿真了3GPP Rel-15和Rel-16的5G可靠性数值, 提出了配电网5G通信的时延与可靠性联合分析方法。

关键词: 5G; 数字配电网; 时延; 可靠性; URLLC

中图分类号: TN915.85

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024082

Research on 5G communication architecture of distribution network and its latency with reliability

WANG Haiyang¹, WANG Yudong², LIU Han³, SUN Haipeng¹, YANG Jin⁴, LI Zhenghao³

1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China

3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China

4. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The core value of 5G in the field of digital distribution network is to give play to the technical advantages of 5G in ultra-high reliability and low latency, and provide high reliability and low latency communication for the control related business of distribution network. In order to provide a systematic theoretical analysis scheme for the latency and reliability of 5G communication deployment applications in the distribution network, a typical architecture of 5G communication in the distribution network in combination with digital distribution network services was given, the latency model for 5G communication in the distribution network was deeply analyzed. The end-to-end latency analysis for 5G frame structures of four operators in China was conducted with 5G reliability values of 3GPP Rel-15 and Rel-16 through 5G link level simulation. At last, a joint analysis method of time latency and reliability of 5G com-

munication in distribution network was proposed.

Key words: 5G, digital distribution network, latency, reliability, URLLC

0 引言

新型电力系统的构建使得控制向配电网末梢延伸的需求量激增,以实现高比例新能源的消纳、保障电网的稳定运行和用户用电质量^[1-2]。根据2021年工业和信息化部等十部门联合发布的《5G应用“扬帆”行动计划(2021—2023年)》和国家发展改革委、国家能源局等四部门联合发布的《能源领域5G应用实施方案》等政策要求,将在配网保护与控制、新能源及储能并网、光伏与储能并网、协同调度及稳定控制等领域大力推进5G深度应用,形成“智能电网+5G”典型应用场景。5G在配电网领域的核心价值在于发挥其超高可靠低时延通信(ultra-reliable and low-latency communication, URLLC)^[3]技术优势,为配电网控制类业务提供高可靠、低时延的通信,并利用硬切片提升与其他业务的刚性隔离能力^[4-5]。

最近两年,电力企业联合运营商、设备商、科研院所等开展了多维度的配电网5G应用试点和创新^[6-9],相关工作多基于针对配电网业务的5G测试验证,主要内容集中在配电网业务自身的改进和与5G的融合。文献[6]提出了改进的配网差动保护自同步算法,文献[7]提出了基于5G通信的智能分布式馈线自动化保护方案,这两个均为配电网业务自身的改进;文献[8]和文献[9]则主要探讨了5G在配电网的应用场景和融合方案。

现有研究缺乏从系统角度对配电网5G通信系统的时延和可靠性等关键指标进行预见性的测算和仿真。配电网业务种类繁多^[8],同样为配电网控制类业务,配电自动化“三遥”一般速率为19.2 kbit/s,时延为秒级。而分布式馈线自动化

(feeder automation, FA)业务则需要2 Mbit/s速率,时延为20 ms级,业务性能需求差异极大,而5G对业务的支撑性能取决于编码调制方案、帧结构、天线数、载波频率、调度方式等诸多因素^[10],其中的关系错综复杂,难以获得简单的闭式表达。建立完备的配电网5G通信时延、可靠性的分析模型,进而为配电网5G通信提供系统性的理论分析是亟待解决的问题,可以指导5G资源、系统参数的配置,引导5G芯片模组终端的定制化研发与业务高度匹配,在保证业务性能的同时,大幅提升5G规模化应用的经济性。

1 配电网业务及5G通信典型架构

1.1 配电网数字化业务及部署

随着电网数字化转型,配电网业务系统已开始向数字化发展。近两年电网公司建设了业务中台和数据中台,具备数据资产管理、数据接入整合、数据共享分析和基础组件支撑等方面的能力^[11]。总体而言,配电网业务系统架构纵向分为感知层、网络层、系统层3个层面,横向分为生产控制大区、管理信息大区、互联网大区3个大区。根据主站部署位置不同,配电网5G业务可分为省域部署和地市域部署两类典型结构,分别如图1和图2所示。

其中可通过5G接入的省域部署配电网业务主要有智能配电台区融合终端、能源控制器、380 V/220 V分布式电源、电动汽车充电桩等。可通过5G接入的市域架构的配电网业务有10 kV分布式光伏、精准负荷控制、配电自动化“三遥”、分布式FA、配网差动保护、配网电源管理单元(power management unit, PMU)等。可见地市域部署的配电网5G业务中,涉控类业务类型占比高于省域部署的业务。涉控类业务对通信时

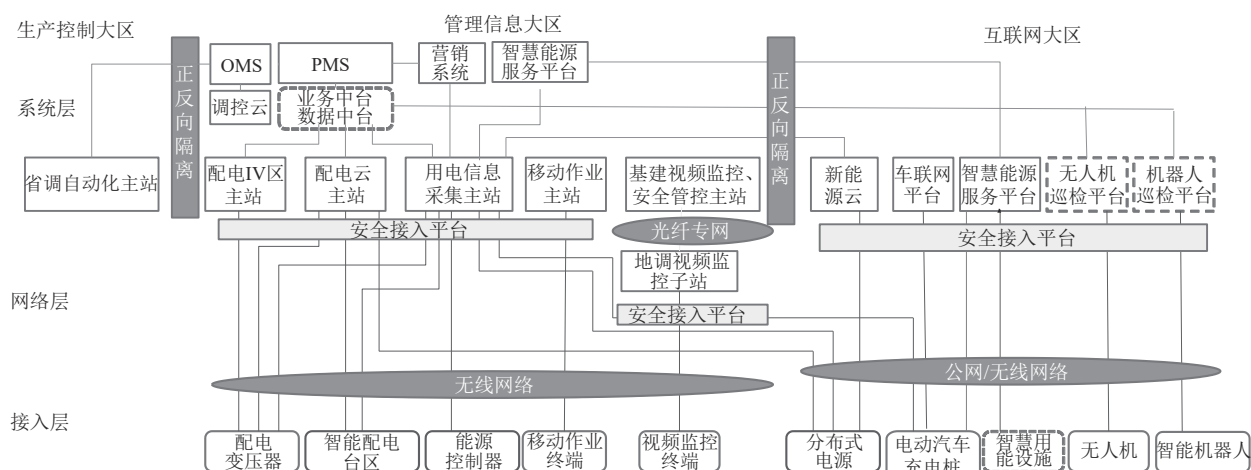


图1 省域部署的配电网5G业务典型结构

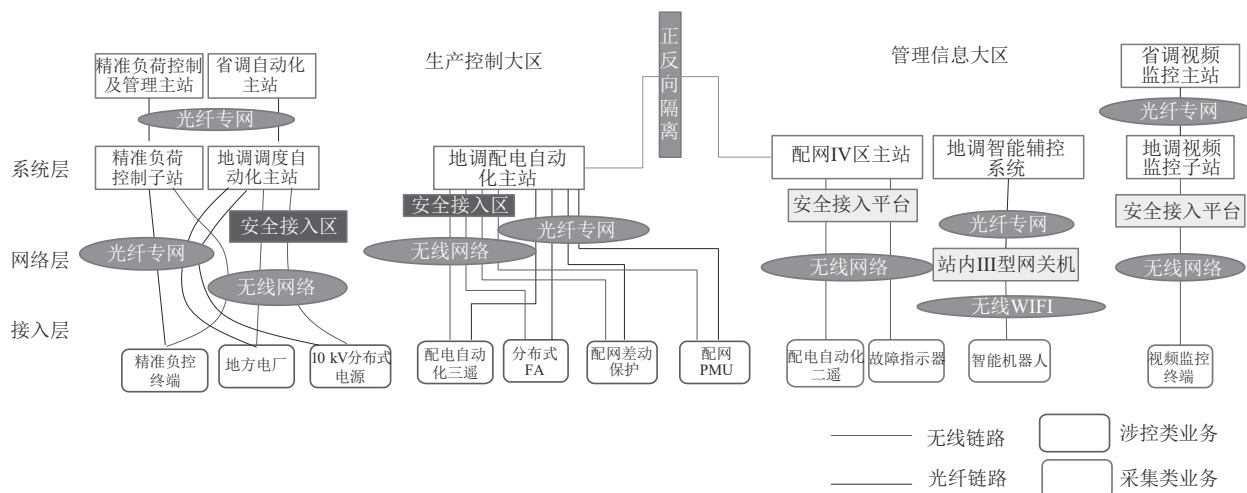


图2 地市域部署的配电网5G业务典型结构

延、可靠性要求较高，且要求与管理信息大区物理隔离^[12]，配电网涉控业务通信需求见表1。

4G LTE 网络难以满足上述配电网涉控类业务的性能和安全隔离要求^[13]，导致配电网涉控类业务无法在4G得到应用推广。5G 不仅为URLLC

业务定义了场景应用，且可以按需实现空口、承载网、核心网参数的定制，支持物理资源块（physical resource block, PRB）隔离及用户独享基站的专用频率隔离，承载网具备基于灵活以太网（flexible Ethernet, FlexE）的物理隔离机制，

表1 配电网涉控业务通信需求

配电网典型涉控业务	综合带宽业务带宽速率需求	时延需求	可靠性要求
分布式能源调控控制类	≥ 2 Mbit/s	主站-终端通信时延 ≤ 1 s	99.999%
配电自动化“三遥”	≥ 19.2 kbit/s	主站-终端通信时延 ≤ 2 s	99.999%
分布式馈线自动化	≥ 2 Mbit/s	终端-终端通信时延速动型： ≤ 20 ms缓动型： ≤ 1 s	99.999%
精准负荷控制	48.1 kbit/s~1.13 Mbit/s	控制主（子）站-终端时延 ≤ 50 ms	99.999%
配电网差动保护	≥ 2 Mbit/s	终端-终端通信时延 < 15 ms	99.999%
配电网微型同步相量测量PMU	> 10 Mbit/s	终端-主站 ≤ 50 ms	99.999%

核心网根据用户需求进行网元的独享定制化部署，为配电网涉控类业务的低时延、高可靠、差异化速率等性能的确定性提供了根本保证。

1.2 配电网5G典型通信架构

上述配电网涉控业务主要为市域部署架构，因此按用户面功能（user plane function，UPF）部署于地市考虑，构建5G配电网硬切片，配电网5G通信典型架构如图3所示。

为实现业务本地分流，在地市供电公司中心机房部署电力专用UPF（双机热备份），与运营商承载网通过光纤链路对接，保证承载网升级过程中业务不中断。承载网部分，为配电网业务划分1个FlexE切片，切片内划分虚拟专用网络（vital private network，VPN）做逻辑隔离；核心网部分，UPF独立部署，由电力独享专用，承载生产控制大区业务。不同业务在UPF上做逻辑隔离，控制面会话管理功能（session manage-

ment function，SMF）及接入与移动管理功能（access and mobility management function，AMF）网元可按需实现电力独享专用；无线部分，5G具备部分PRB频率资源块给行业用户的专用能力。通过核心网、承载网、无线空口端到端的硬切片，为配电网涉控类业务提供了确定性的性能保障，提升了刚性隔离能力。

2 配电网5G时延分析

2.1 配电网5G时延分配

在端到端的5G通信过程中，承载网和核心网为有线通信，其误码性能可控制在“10⁻⁹”水平，时延也稳定可控。例如，对于5G承载网，相关规范对单设备的时延指标做了明确要求^[14]，5G承载网规范指标见表2。

相对而言，5G空中接口部分是对时延、误码性能不确定性最大的因素，时延、误码性能的

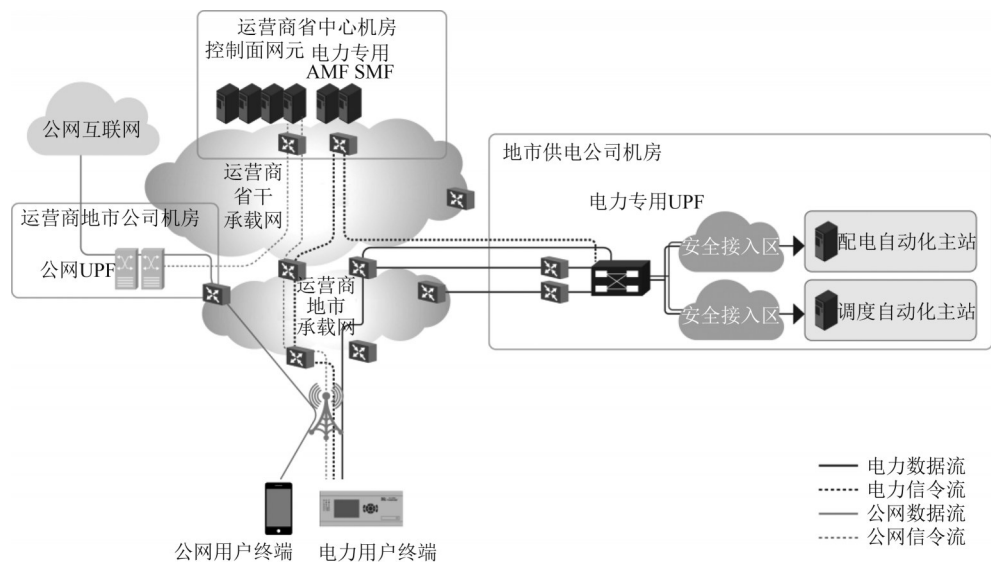


图3 配电网5G通信典型架构

表2 5G承载网规范指标

端到端承载方案	切片形式	网络正常情况下单设备最高时延/ μs		网络拥塞情况下单设备平均时延（高优先级业务）/ μs	
		核心设备	接入汇聚设备	核心设备	接入汇聚设备
FlexE+VPN QoS	FlexE之间硬切片，FlexE之内软切片	30	20	50	50
FlexE交叉	FlexE之间硬切片，FlexE之内硬切片	10	3	10	3



占比最大,下面对5G空口的时延和可靠性进行重点分析和仿真研究。

2.2 5G空口时延模型

2.2.1 空口时延组成

5G空口的时延为数据包从到达发送端媒体访问控制(medium access control, MAC)层调度器开始,直到所有信息位在接收端MAC层成功解码的持续时间^[10,14],该时延与帧结构和业务调度方式紧密相关,包括数据传输时延、处理和调度时延以及重传时延。

在时分双工(time-division duplex, TDD)网络中,每个时隙中的符号需要区别是上行传输还是下行传输。其中D和U时隙分别表示符号是下行传输和上行传输,而S表示符号中既有上行传输也有下行传输。频分双工(frequency-division duplex, FDD)网络下的时隙则上下行均可传输。

处理时延和调度时延的计算与5G NR的具体传输模式紧密相关,TDD/FDD、帧结构、授权/免授权等因素都会影响其大小。无论对于TDD还是FDD,上行均需要分为基于授权和免授权两种情况,TDD/FDD传输时序如图4所示。

2.2.2 TDD下行时延分析

对于下行链路传输,基站调度时频资源后会直接下发数据,而后根据用户反馈的混合自动重传请求(hybrid automatic repeat request, HARQ)信号判断是否需要重传,直至收到确认数据已正

确解码的确认符(acknowledge character, ACK)反馈为止^[10]。因此,下行链路传输的端到端时延包括以下部分:

$$L_{DL} = L_{Tx} + L_{RxProc} + L_{Schl} + (N-1)L_{RTT} \quad (1)$$

其中, L_{Tx} 表示基站在物理下行共享信道(physical downlink shared channel, PDSCH)发送数据的传输时延; L_{RxProc} 表示用户接收到数据的处理时延; L_{Schl} 表示用户在物理上行控制信道(physical uplink control channel, PUCCH)回复HARQ反馈的调度时延; N 表示满足可靠性要求的传输次数; L_{RTT} 表示重传时延,其中包括基站从收到NACK反馈到下发数据的处理及传输时延、用户的处理时延以及回复HARQ反馈的调度时延^[15-17]。

以图4的5G空口帧结构为例,当选择箭头所指向的时隙下行传输数据时,单次传输的时延是最短的。目前考虑终端的处理能力,终端的处理时延设置为典型值2个时隙,在S或U时隙发送HARQ反馈,此时最小单次传输时延为1.5 ms。当选择在三角形所指向的时隙传输下行数据时,基站必须等待至D或S时隙出现才能下发数据;再继续等待至U或S时隙上传HARQ反馈。

2.2.3 TDD上行时延分析

上行链路传输分为基于授权和免授权两种传输模式。基于授权的上行传输需要用户先发送调

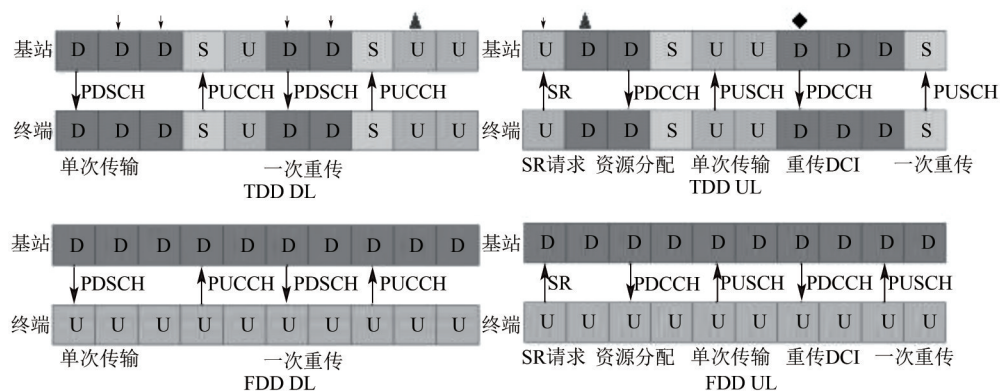


图4 TDD/FDD传输时序

度请求 (scheduling request, SR), 等待基站回复下行链路控制信息 (downlink control information, DCI) 授权之后, 方可在基站分配的时频资源上传数据。若基站无法正确解码, 则会下发控制信息指示用户重传。因此, 基于授权的上行链路传输时延将包括以下部分:

$$L_{UL} = L_{Sch2} + L_{RxProc} + L_{Sch3} + L_{Tx} + (N-1)L_{RTT} \quad (2)$$

其中, L_{Sch2} 表示用户在 PUCCH 发送 SR 请求的调度时延; L_{RxProc} 表示基站接收到 SR 后的处理时延; L_{Sch3} 表示基站在物理下行控制信道 (physical downlink control channel, PDCCH) 发送 DCI 信号分配传输资源的调度时延; L_{Tx} 表示用户在物理上行共享信道 (physical uplink shared channel, PUSCH) 发送数据的传输时延; L_{RTT} 表示重传时延, 其中包括基站从收到数据到发送重传 DCI 的时延以及用户从收到调度 DCI 到重新发送数据的处理时延。免授权传输时, 基站会为用户保留部分资源, 用户无须发送 SR 即可传输数据, 此时, 式 (2) 中的前 3 项时延均为零。

当终端在箭头所指时隙上传数据时, 在第一个 U 时隙发送 SR, 等待 2 个时隙后收到上行调度 DCI, 再等待 2 个时隙后在 U 时隙上传数据, 此时时延最低为 2.5 ms。当基站在三角形所指时隙上传数据时, 需要等待至 S 时隙发送 SR, 再等待至 D 时隙接收 DCI, 最后在 U 时隙发送数据, 此时单次传输时延最大为 5 ms。上行免授权的情况不需要考虑 SR 的发送至接收过程, 终端只需要等待 U 时隙传输数据即可^[16]。因此数据在 U 时隙到达上传的时延最小, 在菱形所指时隙上传的时延最大。遍历一个 TDD 帧中的每个时隙进行式 (2) 的时延计算后, 可得到不同传输次数下的 TDD UL 平均时延。

2.2.4 FDD 下行时延分析

FDD 模式下, 不必像 TDD 一样遍历帧中的每个时隙, 因为它的时隙对于上下行没有传输限

制。当基站在需要发送下行数据时, 首先通过 PDCCH 调度 PDSCH, 图 4 中是不进行跨时隙调度的情况, L_{Tx} 为 1 个时隙。终端在经过 PDSCH-to-PUCCH 的处理时延 L_{RxProc} 后发送 HARQ 反馈。目前考虑终端的处理能力, 此 L_{RxProc} 一般取典型值 2 个时隙。 L_{Sch1} 为发送 ACK/NACK 的调度时延。如果终端需要重传, L_{RTT} 包括基站 PUCCH-to-PDSCH 的处理时延、再次下发数据的传输时延、终端 PDSCH-to-PUCCH 的处理时延、发送 HARQ 反馈的调度时延。

2.2.5 FDD 上行时延分析

当终端基于调度发送上行数据时, 终端首先发送 SR, 其调度时延为 L_{Sch2} 。基站接收 SR 后需要 PUCCH-to-PDCCH 的处理时延 L_{RxProc} 产生上行调度指令, 再经过调度时延 L_{Sch3} 发送 DCI。终端收到调度信息后经过 PDCCH-to-PUSCH 的处理时延后发送数据, 这部分时延之和为 L_{Tx} 。如须重传, L_{RTT} 包括基站从收到数据到产生再次发送调度信息的 PUSCH-to-PDCCH 处理时延、基站发送 DCI 的调度时延、终端 PDCCH-to-PUSCH 处理时延、终端发送数据的传输时延。如果上行免授权, 终端直接发送上行数据。

2.3 国内运营商 5G 时延数值测算

中国移动、中国联通、中国电信等运营商的 5G 现网空口帧结构如图 5 所示。结合第 2.1 节和第 2.2 节的分析方法, 遍历各 5G 帧结构时隙, 可推算出三大运营商 5G 空口 1 至 3 次传输的时延数值, 综合考虑承载网、核心网确定性时延后, 5G 端到端时延测算数值 (UPF 地市部署) 见表 3。

上述时延为各类配电网 5G 通信应用提供理论数值依据和目标方式。从数据可见, 采用运营商公网, 在目前的帧结构、免调度或预调度方式下, 在保证信号质量 (体现在信噪比) 的前提下, 可保证端到端 10 ms 数量级的时延。

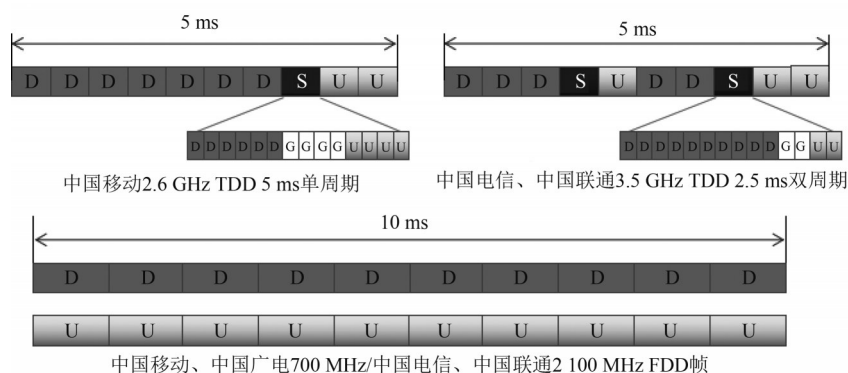


图5 国内运营商5G现网空口帧结构

表3 5G端到端时延测算数值(UPF地市部署)

5G 频段	空口传输次数/次	空口上行时延 (免调度) 均值/ms	空口下行时延 均值/ms	承载网时延/ms	核心网时延/ms
中国移动 2.6 GHz TDD	1	2.3	2.9	1.5	0.6
	2	7.25	7.75	1.5	0.6
	3	12.2	12.6	1.5	0.6
中国电信/中国联通 3.5 GHz TDD	1	1.3	1.95	1.5	0.6
	2	3.75	4.3	1.5	0.6
	3	6.2	6.65	1.5	0.6
中国广电 700 MHz/中国电信/ 中国联通 2 100 MHz FDD	1	1	3	1.5	0.6
	2	5	7	1.5	0.6
	3	9	11	1.5	0.6

注:根据中兴通讯典型实测数据,在64 Gbit/s吞吐量情况下,UPF转发时延为0.6 ms。回传网按照4核心、4汇聚、8接入、100 km光缆测算。

3 配电网5G可靠性模型仿真及与时延的关联分析

3.1 5G调制与编码策略

调制与编码策略(modulation and coding scheme, MCS)决定了5G系统中物理层资源块的配置,并直接影响业务速率和误码率。3GPP TS 38.214^[10]中以影响通信速率的因素为表的列,将MCS索引作为行,形成可配置的速率表。调制编码方案的选择即确定调制速率表中MCS索引值。由于3GPP Release-16(Rel-16)聚焦uRLLC业务可靠性和网络时延,一般Rel-16使用最高支持64QAM的低码率速率表。速率表中的每个MCS索引其实对应了一组特定参数配置下的物理传输速率。在给定边缘速率的条件下,调

制编码方案的选择需要使对应的业务速率满足该要求。出于可靠性角度考虑,应选择满足最低业务速率要求的最低阶MCS索引(MCS index)。MCS index的选择主要影响业务速率和误码率,其中对业务速率的影响主要取决于传输块大小(transport block size, TBS)。综上,调制编码方案的选择首先基于业务速率要求算得TBS,然后根据TBS计算流程进一步确定合适的MCS索引值,即在MCS速率表中搜索可以满足上述TBS要求的最低阶索引值。在给定边缘速率的条件下,调制编码方案的选择需要使对应的业务速率满足该要求。出于可靠性角度考虑,应选择满足最低业务速率要求的最低阶MCS index。

3.2 可靠性链路仿真

在确定了满足边缘速率要求的调制编码方案

后,为得到采用该方案传输数据包的正确译码概率,进而分析满足可靠性要求的传输次数,需要对不同调制编码方案下的传输过程进行 Monte-Carlo 仿真。在不同调制编码方案、信噪比及系统参数配置下仿真了约 106 个独立时隙上的数据传输过程。通过分析这些时隙中的数据包能否被正确接收,可以得到信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 与误块率 (block error rate, BLER) 的关系曲线,为下一步计算传输次数提供依据。

仿真的参数配置参考了 3GPP 对电力场景的仿真设计^[3]以及 URLLC 容量评估的仿真设计^[18],见表 4。

表 4 仿真参数

参数	参数设置
信道模型	TDL-C (时延扩展: 300 ns)
终端运动速度/(km·h ⁻¹)	3
BS 天线端口数量	4 接收天线端口
终端 天线端口数量	2 发送天线端口
带宽/MHz	40
子载波间隔/kHz	30
合并方式	最小均方误差 (MMSE)
DMRS 个数	1
DMRS 种类	Type1/单符号 DMRS
时域插值方式	线性
频域插值方式	sinc 函数
Slot 个数	1 000 000
终端个数	1
BS 个数	1
信噪比范围/dB	-14~25

由于上行信道功率受限,往往是覆盖及可靠性的瓶颈,因此本文简要分析 PUSCH 的仿真结果。3GPP Rel-15 MCS 表 1 仿真结果如图 6 所示,3GPP Rel-16 MCS 表 3 (低码率) 仿真结果如图 7 所示。

可见,对于 Rel-15 的常规 MCS 表,即便用最低的编码速率 (MCS=0),在 SNR=1 dB 时,其误码性能 BLER 依然难以达到 99.999%。要保证 SNR>4 dB,才可实现 99.999% 的可靠性。当

一次传输达不到配电网涉控业务要求 99.999% 的可靠性时,需要通过多次重传以逼近可靠性指标;对于 3GPP Rel-16 的低码率 MCS 表,用最低的编码速率 (MCS=0),在 SNR=-2.5 dB 时,即可达到 99.999% 的可靠性。可见 3GPP Rel-16 的低码率 MCS 表以频谱效率的降低带来了可靠性的提升。在相同的信道环境下,降低了传输次数,也就缩短了可靠性约束下的时延。

3.3 时延与可靠性联合分析流程

根据可靠性的定义,传输 N 次的可靠性为 R 意味着一个数据包经 N 次传输后仍解码失败的概率小于 $1-R$ 。因此可靠性为 R 时所需的最小传输次数与单次传输的 BLER 之间具有如下关系。

$$1 - \text{BLER}^N \geq R \quad (3)$$

当 SNR 给定时,根据瀑布曲线即可获得满足特定可靠性要求所需的最小传输次数,也就制约了时延。综合本文第 2 节、第 3 节内容,5G 时延可靠性联合分析与计算流程如图 8 所示,为定量评估配电网业务与 5G 时延、可靠性提供了系统性的流程和仿真数值。

以业务速率要求 2 Mbit/s、可靠性要求 99.999%、无线带宽资源 2 MHz (对应 6 个 PRB 资源) 为例,业务空口时延与 PRB 资源数换算包括如下步骤。

步骤 1 计算 MCS。

将载波间隔为 30 kHz、天线参数、带宽 2 Mbit/s 代入式 (4):

$$W = \text{MIMO} \times 2^u \times \text{TBS} \times 1\,000 \quad (4)$$

其中, W 为业务速率,此处取 2 048 kbit/s; u 为载波模式,载波间隔 30 kHz 对应 $u=1$; MIMO 为天线流数 2; TBS 为传输块大小。

计算得出 $\text{TBS}=512$, 根据 3GPP TS 38.214 表 5.1.3.2-2, 得出 $N_{\text{info}}=504$, 其中 N_{info} 为 TS 38.214 定义的中间变量。

$$N_{\text{info}} = N_{\text{RE}} \times R \times Q_m \times v \quad (5)$$

$$N_{\text{RE}} = \text{PRB} \times 12 \times \text{ofdm} - k \quad (6)$$

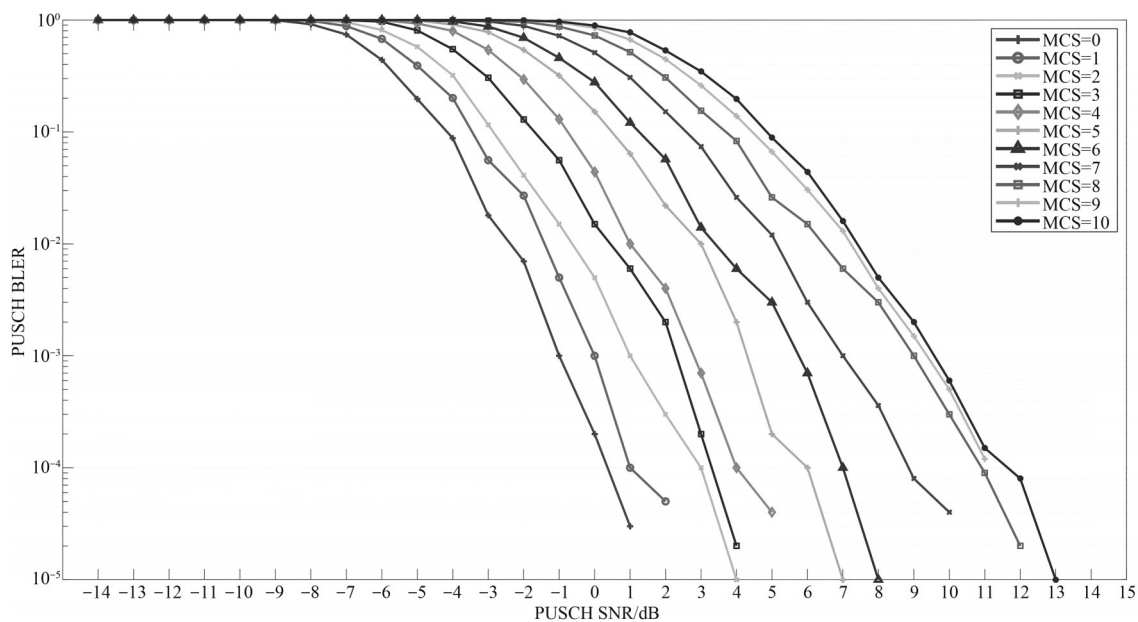


图6 3GPP Rel-15 MCS表1仿真结果

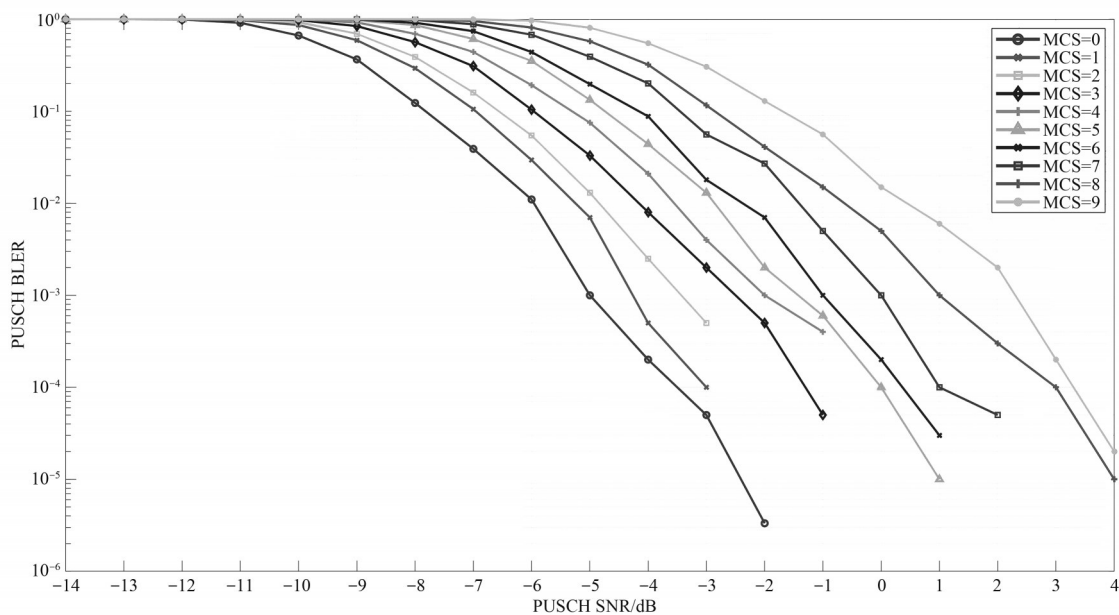


图7 3GPP Rel-16 MCS表3(低码率)仿真结果

将 $PRB=6$ 、 $v=1$ 、 $ofdm=14$ 、 $k=0$ 代入式(5)、式(6),得:

$$R \times Q_m = 0.5 \quad (7)$$

其中, R 和 Q_m 分别为MCS index对应的目标码率和调制阶数, v 为层数, $ofdm=14$ 为分配给数据传输的符号数, $k=0$ 为用于开销的资源单元 (re-

source element, RE) 数。

根据 TS 38.214 表 5.1.3.1-3 可选择频谱效率 0.601 6, MCS index=10。

步骤2 瀑布曲线仿真。

仿真 MCS index=10、调制方式为 16QAM、目标码率为 308/1 024 的瀑布曲线。

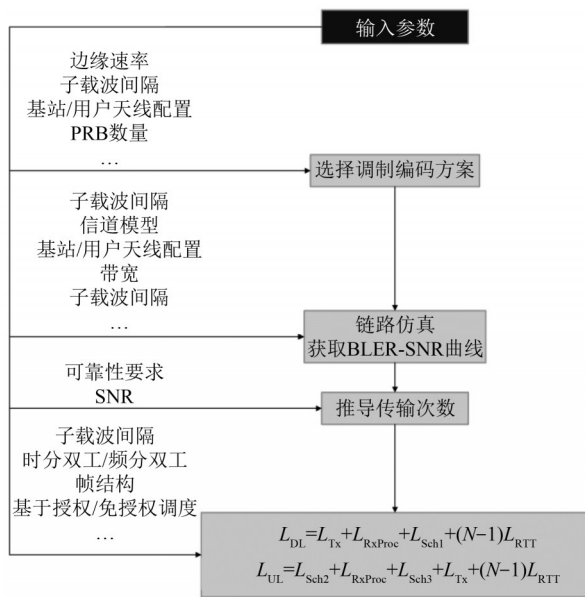


图8 5G时延可靠性联合分析与计算流程

步骤3 获取BLER及计算传输次数。

本文图6和图7曲线给出了不同SINR值对应的BLER，如确定BLER为0.01，则代入式（8）。

$$1 - 0.01^N \geq 0.999\ 99 \quad (8)$$

得到传输次数 N 为3次。

步骤4 时延计算。

根据本文第2.3节不同运营商的5G空口帧结构数据，可测算出该业务在此信道条件（SINR）、5G空口系统参数（子载波间隔、天线、层数、OFDM符号数等）、带宽资源（PRB数量）下的时延。

利用上述方法，对我国5G典型的3.5 GHz频段进行了仿真测算，针对2~10 Mbit/s业务速率、99.999%业务可靠性需求，得出SINR=1 dB、表4的空口参数、不同频率资源（5RB、10RB、15RB）下的时延数值。可评估5G对表1中配电网典型业务的承载能力和频率资源需求。典型3.5 GHz频段时延仿真数值@SINR=1 dB见表5。

例如，当频率资源为5RB时，对2 Mbit/s速率的业务，为了使可靠性达到99.999%，UL+DL空口时延为15.7 ms，加上表3中承载网和核心网的时延数值，业务端到端通信时延可控制在20 ms以内。根据表1中的业务需求，只能保证1个分布式馈线自动化业务。但对于配电自动化“三遥”业务，时延需求为秒级，5RB的频率资源至少可以支持6 Mbit/s的业务量（6 000/19.2=312个配电自动化“三遥”业务）时延不超秒级（UL+DL=99.15 ms+86.55 ms=185.7 ms）。其他业务结合速率、时延可做类似联合分析。

4 结束语

本文首先分析了配电网5G关键业务部署及其典型5G架构。对5G时延模型进行了深入分析，并结合各运营商的帧结构给出了端到端时延数值。根据3GPP标准建立了5G链路级仿真平台，进行了配电场景信道参数下的Rel-15和Rel-16 5G调制

表5 典型3.5 GHz频段时延仿真数值@SINR=1 dB

频率资源	时延类型	业务速率要求				
		2 Mbit/s	4 Mbit/s	6 Mbit/s	8 Mbit/s	10 Mbit/s
5RB	UL时延/ms	9.05	17	99.15	2 197.95	4 609.45
	GRANT-FREE UL时延/ms	6.2	13.55	89.5	2 029.9	4 259.4
	DL时延/ms	6.65	13.7	86.55	1 947.75	4 086.25
10RB	UL时延/ms	6.4	9.05	11.7	17	43.5
	GRANT-FREE UL时延/ms	3.75	6.2	8.65	13.55	38.05
	DL时延/ms	4.3	6.65	9	13.7	37.2
15RB	UL时延/ms	3.75	6.4	9.05	9.05	11.7
	GRANT-FREE UL时延/ms	1.3	3.75	6.2	6.2	8.65
	DL时延/ms	1.95	4.3	6.65	6.65	9



编码的可靠性仿真,最后提出了时延与可靠性联合分析的方法和流程。

通过本文的数值推算和仿真结果,若需要在5G公网广泛承载配网差动保护、分布式FA等低时延高可靠业务,可从3个方面进行优化:一是对上行调度方式进行优化,采用上行预调度、免调度方式;二是采用低码率的调制编码策略,减少空口重传次数,提高一次传输正确率;三是采用FDD技术体制,目前中国移动/中国广电在N28 700 MHz频段正在推进,中国电信/中国联通也将在N1频段1 900/2 100 MHz频段推动5G FDD的使用。

本文提供的三大运营商的5G时延测算和可靠性与时延的联合分析与仿真,可为配电网涉控业务5G通信的广泛部署应用提供系统性的理论框架和数值参考。一方面可以有效评估5G系统参数和频率资源对配电网业务时延、可靠性、速率的保障能力;另一方面,在电力企业与运营商合作建设应用5G时,可针对业务明确频率资源等直接影响费用的要求,同时,还可以指导行业定制化的芯片、模组の開発,提高终端与业务的适配性,降低5G规模化应用成本。

参考文献:

- [1] 颜湘武,王晨光,贾焦心,等.基于小交流信号的低压配电网中分布式光伏辅助调压控制策略[J].中国电力,2022,55(5): 134-142.
YAN X W, WANG C G, JIA J X, et al. Distributed PV auxiliary voltage control strategy in low voltage distribution network based on small AC signals[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 134-142.
- [2] 黄子硕,刘营芳,张新鹤,等.乡村配电网供能范围与负荷调控技术协同优化方法[J].中国电力,2022,55(9): 46-55.
HUANG Z S, LIU Y F, ZHANG X H, et al. A synergic optimization method for service scope and load management technologies of rural power distribution network[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 46-55.
- [3] 3GPP. Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC): TR 38.824[R]. 2019.
- [4] 熊轲,张锐晨,王蕊,等.5G助力电力物联网:网络架构与关键技术[J].中国电力,2021,54(3): 99-108.
XIONG K, ZHANG R C, WANG R, et al. 5G-enabled electricity Internet of things: the network architecture and key technologies[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 99-108.
- [5] 张丽,郝佳恺.5G网络切片电力通信业务与测试技术研究[J].电力信息与通信技术,2022,20(5): 74-79.
ZHANG L, HAO J K. Research on 5G network slicing technology in power communication service and testing[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(5): 74-79.
- [6] 高厚磊,徐彬,向珉江,等.5G通信自同步配网差动保护研究与应用[J].电力系统保护与控制,2021,49(7): 1-9.
GAO H L, XU B, XIANG M J, et al. Research and application of self-synchronized differential protection for distribution networks using 5G as the communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 1-9.
- [7] 宋志伟,马天祥,沈宏亮,等.基于5G通信的智能分布式配电保护技术研究与应用[J].供用电,2021,38(2): 6-11, 18.
SONG Z W, MA T X, SHEN H L, et al. Research and application of intelligent distributed distribution protection technology based on 5G communication[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2): 6-11, 18.
- [8] 李娜,杨振亿,曾杰,等.基于5G的智能配电网业务场景应用分析[J].湖南电力,2022,42(2): 98-104.
LI N, YANG Z Y, ZENG J, et al. Analysis of smart distribution network business scenario application based on 5G[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(2): 98-104.
- [9] 徐群,程琳琳,孟建,等.5G在智能电网的应用研究[J].信息通信技术,2022,16(4): 55-62.
XU Q, CHENG L L, MENG J, et al. 5G technology applications in smart grid[J]. Information and Communications Technologies, 2022, 16(4): 55-62.
- [10] 3GPP. Physical layer procedures for data: TS 38.214[R]. 2020.
- [11] 许洪强,尚学伟,张令涛,等.大电网调控系统业务中台设计与研究[J].电网技术,2022,46(6): 2222-2230.
XU H Q, SHANG X W, ZHANG L T, et al. Design of business middle platform of bulk power grid dispatch and control system[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2222-2230.
- [12] 国家能源局.国能安全(2015)36号发电厂电力监控系统安全防护方案[Z].2015.
National Energy Administration. GNQ [2015] No.36 power plant power monitoring system security protection scheme[Z]. 2015.
- [13] 窦开明.配电网WAMS通信规约及组网技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
DOU K M. Research on Communication Protocol and Network Technology of Distribution WAMS Network[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.

- [14] 中国移动. 中国移动切片分组网(SPN)设备技术规范 V2[S]. 2020.
China Mobile. Technical specification for China Mobile sliced packet network (SPN) equipment V2[S]. 2020.
- [15] JI H, PARK S, YEO J, et al. Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: physical layer aspects[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 124-130.
- [16] JANG H, KIM J, YOO W, et al. URLLC mode optimal resource allocation to support HARQ in 5G wireless networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 126797-126804.
- [17] LE T K, SALIM U, KALTENBERGER F. Enhancing URLLC uplink configured-grant transmissions[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [18] 3GPP. URLLC system level simulation assumptions: R1-166398[S]. 2016.

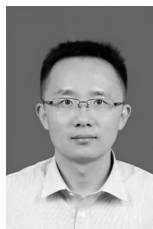
[作者简介]



王海洋 (1984-), 男, 山东电力工程咨询院有限公司高级工程师, 主要从事电力通信规划设计与研究工作。



王玉东 (1970-), 男, 国网经济技术研究院有限公司教授级高级工程师, 主要从事电力系统通信领域研究工作。



刘晗 (1979-), 男, 国网山东省电力公司数字化部建设技术处处长、高级工程师, 主要从事电力数字化建设管理工作。

孙海蓬 (1982-), 男, 山东电力工程咨询院有限公司电网设计研究院配网信通部主任、教授级高级工程师, 主要从事电力系统通信领域研究工作。

杨瑾 (1997-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要从事无线通信领域的研究工作。

李正浩 (1991-), 男, 国网山东省电力公司高级工程师数字化部建设技术处专责, 主要从事 5G 及电力数字化建设管理工作。